

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Análisis experimental de la permeabilidad al agua en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar

Autor: María Cascajo González

Tutores: Rafael González Almenara

Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Análisis experimental de la permeabilidad al agua en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar

Autor:

María Cascajo González

Tutores:

Rafael González Almenara

Lourdes García Rodríguez

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

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Análisis experimental de la permeabilidad al agua en módulos de membranas para desalación eficiente de agua de mar

Autor: María Cascajo 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:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

A mi tío Gabriel.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis padres darme la oportunidad de estudiar fuera de casa. Así como, por apoyarme y confiar en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida.

A mis hermanos en especial a Sara, por estar siempre atenta y pendiente de mí.

A mi abuela, mi pilar fundamental, por está siempre ahí cuando más lo necesito.

A mi familia en general, les agradezco de todo corazón por su amor, aliento y comprensión. Vuestra confianza en mí y vuestro apoyo constante me han impulsado a dar lo mejor de mí y a superar cualquier obstáculo que se presentara en mi camino.

A mis amigos a Miriam, Carmen y Hugo por acompañarme en todo este recorrido y no dejar nunca de darnos la mano para levantarnos tras cada caída. Ese 'A por todas' que nos decíamos los unos a los otros.

Gracias a mis tutores Lourdes y Rafa por su tiempo y su confianza desde el primer momento. Especialmente a Rafa, por su paciencia y ayudarme con sus conocimientos.

Finalmente, estoy profundamente agradecida a todos aquellos que han sido parte de este viaje.

María Cascajo González

Sevilla, 2023

Resumen

EL marco general de este trabajo es el análisis experimental de la permeabilidad al agua en módulos de membranas con el objetivo de lograr una desalación eficiente del agua de mar.

El análisis experimental se ha llevado a cabo mediante ensayos en un banco de pruebas, donde se han evaluado diferentes variables como la presión de alimentación, la temperatura y el flujo de agua. Para ello se ha utilizado la membrana FO4040 de Toray diseñada para la desalación de agua de mar, con alta permeabilidad al agua y eficiencia de separación.

Basado en los resultados obtenidos, se proponen recomendaciones para futuros estudios, como la variación de las condiciones de operación y la evaluación de diferentes tipos de membranas. Estas recomendaciones buscan abordar las limitaciones identificadas en el análisis y mejorar el rendimiento y la viabilidad de la desalación de agua de mar mediante la tecnología de ósmosis inversa.

En conclusión, este análisis experimental proporciona información valiosa sobre la permeabilidad al agua en módulos de membranas y su impacto en la eficiencia de la desalación de agua de mar. Los resultados y recomendaciones de este estudio pueden ser de utilidad para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la desalación y el tratamiento de agua.

Abstract

The general objective of this Final Degree Project is the experimental analysis of water permeability in membrane modules with the aim of achieving efficient seawater desalination.

The experimental analysis has been carried out by means of tests in a test bench, where different variables such as feed pressure, temperature and water flux have been evaluated. Toray's FO4040 membrane, designed for seawater desalination, with high water permeability and separation efficiency, was used.

Based on the results obtained, recommendations for future studies are proposed, such as varying the operating conditions and evaluating different types of membranes. These recommendations aim to address the limitations identified in the analysis and improve the performance and feasibility of seawater desalination using reverse osmosis technology.

In summary, this experimental analysis provides valuable information on water permeability in membrane modules and its impact on seawater desalination efficiency. The results and recommendations of this study may be useful for future research and development in the field of desalination and water treatment.

Agradecimientos	viii
Resumen	x
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xiv
Índice de Figuras	xv
Notación	¡Error! Marcador no definido.
1 Introducción	21
1.1 Proyecto SOLMIDIFF y MONSIEUR	21
1.2 Metodología y estructura del documento	21
2 La desalación de agua mediante ósmosis inversa	22
2.1 Fundamentos de la Ósmosis Inversa	25
2.2 Principales configuraciones	25
3 Instalación experimental	28
3.1 Material y método	29
3.1.1 Componentes	29
3.1.2 Instrumentación	34
3.2 Gestión de datos	39
4 Determinación experimental de la permeabilidad al agua de la membrana FO4040	42
4.1 Resultado de los ensayos	43
4.1.1 Ensayo 1	43
4.1.2 Ensayo 2	46
4.1.3 Ensayo 3	48
4.1.4 Ensayo 4	51
4.1.5 Ensayo 5	53
4.1.6 Ensayo 6	56
4.1.7 Ensayo 7	58
4.1.8 Ensayo 8	61
4.1.9 Ensayo 9	63
4.1.10 Ensayo 10	66
4.2 Análisis de resultados	68
5 Conclusiones	70
6 ANEXO	71
Referencias	73

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación tipos de agua (International Desalination Association)</i>	22
<i>Tabla 3. Características de la membrana</i>	33
<i>Tabla 4. Dispositivos de Instrumentación</i>	34
<i>Tabla 5. Características del manómetro</i>	34
<i>Tabla 6. Características del presostato</i>	35
<i>Tabla 7. Características del transmisor de presión</i>	36
<i>Tabla 8. Características del transmisor de caudal</i>	37
<i>Tabla 9. Características Analizador de conductividad</i>	38
<i>Tabla 10. Explicación nomenclaturas</i>	43
<i>Tabla 11. Comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos</i>	69

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución global de las instalaciones operativas de desalinización y capacidades (N1000m³ /día) por usuario del agua producida por sector. (Jones et al., 2019)</i>	23
<i>Figura 2. Número de publicaciones sobre desalinización por categorización (total, técnica, social, medio ambiente, energía y economía). (Jones et al., 2019)</i>	23
<i>Figura 3. Predicciones del estrés hídrico para 2040 (World Resources Institute, 2023).</i>	24
<i>Figura 4. Evolución hacia el equilibrio osmótico</i>	25
<i>Figura 5. Flujo inverso provocado por una presión superior a la osmótica.</i>	25
<i>Figura 6. Diagrama conceptual de un sistema de desalación.</i>	26
<i>Figura 7. Sistema NC SWRO para acoplarlo a planta convencional de desalación</i>	26
<i>Figura 8. Diagrama conceptual de la membrana de ósmosis inversa a contracorriente</i>	28
<i>Figura 9. Válvula de esfera</i>	29
<i>Figura 10. Válvula de regulación de presión</i>	30
<i>Figura 11. Válvulas de regulación de presión</i>	30
<i>Figura 12. Válvulas de entrada y salida</i>	30
<i>Figura 13. Diagrama de la instalación</i>	31
<i>Figura 14. Bomba de Alimentación</i>	32
<i>Figura 15. Bomba de Alta presión</i>	33
<i>Figura 16. Membrana Toray F4040</i>	33
<i>Figura 17. Manómetros</i>	34
<i>Figura 18. Presostato</i>	35
<i>Figura 19. Transmisor de presión</i>	36
<i>Figura 20. Transmisor de caudal</i>	37
<i>Figura 21. Analizador de conductividad (PT100)</i>	38
<i>Figura 22. Registrador de datos MultiCon CMC-99/141.</i>	39
<i>Figura 23. Descripción de las terminales</i>	40
<i>Figura 24. Módulo UN5</i>	40
<i>Figura 25. Módulo I24</i>	40
<i>Figura 26. Módulo UN5</i>	40
<i>Figura 27. Conexión Módulo I24</i>	41
<i>Figura 28. Conexión Módulo UN5</i>	41
<i>Figura 29. Conexión en MultiCon</i>	41
<i>Figura 30. Grupos y canales lógicos.</i>	41
<i>Figura 31. 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}</i>	43

Figura 32. 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. 44

Figura 33. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 3 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. 44

Figura 34. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 1. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv . 45

Figura 35. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 1. El valor promedio de la permeabilidad es 6. 45

Figura 36. 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} . 46

Figura 37. 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. 46

Figura 38. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{HC_IN_1}$ Y $P_{HC_IN_2}$, entrada y salida de la bomba respectivamente. P_{HC_OUT} , tras la válvula de regulación de presión. Para la corriente de alta presión; $P_{LC_IN_1}$ Y $P_{LC_IN_2}$, entrada y salida de la bomba respectivamente. P_{LC_OUT} , tras la válvula de regulación de presión. 47

Figura 39. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 2. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv . 47

Figura 40. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 2. El valor promedio de la permeabilidad es 6. 48

Figura 41. 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} . 48

Figura 42. 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. 49

Figura 43. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 3 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. 49

Figura 44. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 3. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv . 50

Figura 45. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 3. El valor promedio de la permeabilidad es 5,6. 50

Figura 46. 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} . 51

Figura 47. 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. 51

Figura 48. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 4 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. 52

Figura 49. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 4. Para la

<i>fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv.</i>	52
<i>Figura 50. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 4. El valor promedio de la permeabilidad es 5,9.</i>	53
<i>Figura 51. 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}.</i>	53
<i>Figura 52. 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.</i>	54
<i>Figura 53. 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC}, entrada y salida de la membrana respectivamente.</i>	54
<i>Figura 54. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 5. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv.</i>	55
<i>Figura 55. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 5. El valor promedio de la permeabilidad es 6,1.</i>	55
<i>Figura 56. 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}.</i>	56
<i>Figura 57. 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.</i>	56
<i>Figura 58. 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC}, entrada y salida de la membrana respectivamente.</i>	57
<i>Figura 59. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 6. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv.</i>	57
<i>Figura 60. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 6. El valor promedio de la permeabilidad es 7,2.</i>	58
<i>Figura 61. 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}.</i>	58
<i>Figura 62. 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.</i>	59
<i>Figura 63. 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC}, entrada y salida de la membrana respectivamente.</i>	59
<i>Figura 64. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 7. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv.</i>	60
<i>Figura 65. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 7. El valor promedio de la permeabilidad es 6.</i>	60
<i>Figura 66. 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}.</i>	61
<i>Figura 67. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de</i>	

alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente. 61

Figura 68. 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. 62

Figura 69. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 8. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv . 62

Figura 70. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 8. El valor promedio de la permeabilidad es 6,4. 63

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} . 63

Figura 72. 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. 64

Figura 73. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 9. 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. 64

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 y para el caudal transferido, qv . 65

Figura 75. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 9. El valor promedio de la permeabilidad es 6,4. 65

Figura 76. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 10. 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 77. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 10 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 78. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 10. 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; $P_{AlimHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. 67

Figura 79. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 10. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv . 67

Figura 80. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 10. El valor promedio de la permeabilidad es 6,4. 68

Figura 81. Evolución de la temperatura frente a la permeabilidad en los diferentes ensayos. 69

1 INTRODUCCIÓN

En este primer capítulo se presentan los objetivos y los distintos elementos que forman la base del desarrollo del presente proyecto. Además, se explica la metodología y organización del documento.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es evaluar experimentalmente un sistema de membranas de 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 marco de los proyectos de investigación SOLMIDIFF y MONSIEUR.

1.1 Proyecto SOLMIDIFF y MONSIEUR

El primer proyecto se centra en la recolección y concentración de energía solar mediante un colector de disco parabólico. La energía solar se convierte en electricidad mediante una microturbina de gas y un receptor solar. El aire atmosférico se comprime y se suministra al receptor solar, donde se produce un intercambio de calor y se genera aire a alta presión y temperatura. Este aire se utiliza para generar energía eléctrica y para alimentar una máquina desalinizadora basada en ósmosis inversa. El calor residual de la microturbina se utiliza para tratar la salmuera generada por la desalinización.

El segundo proyecto se enfoca en la creación teórica y experimental de un sistema de producción combinada de electricidad y agua potable. Este sistema está diseñado para aplicaciones no conectadas a la red en áreas remotas y se caracteriza por su capacidad de descarga líquida nula. El proyecto se basa en los hallazgos y la instalación experimental del proyecto SOLMIDIFF, pero se agregan aspectos adicionales para asegurar la capacidad técnica del sistema en condiciones cambiantes. Se incorpora una nueva turbina de gas completamente instrumentada para simular las condiciones de una instalación solar y se investigan técnicas y protocolos de operación óptimos. Además, se analizan los beneficios económicos y ambientales, y se busca crear una tecnología con especificaciones operativas y un impacto ambiental mínimo.

Por tanto, los objetivos generales de dichos proyectos son mejorar la eficiencia de la microturbina de gas solar a carga parcial, validar modelos de operación a carga parcial de sistemas de ósmosis inversa y sugerir nuevas configuraciones.

Este trabajo se centra en la primera parte del proyecto SOLMIDIFF en el cual a través de un prototipo de escala de laboratorio RO se evaluará experimentalmente las características de la unidad de desalinización.

La segunda parte del proyecto SOLMIDIFF se continuará en el Trabajo Fin de Grado de mi compañera Carmen Navarro donde se evaluará el comportamiento experimental en condiciones de funcionamiento típicas y también durante maniobras fuertemente transitorias, permitiendo así un análisis más profundo de la tecnología. Además, implementar una herramienta de simulación de la tecnología incluyendo la explotación de los resultados del proyecto.

1.2 Metodología y estructura del documento

Este documento se estructura en cinco capítulos, siendo este el primero llamado "Introducción". En el segundo, se explican los fundamentos de la ósmosis inversa y las principales configuraciones, exponiendo la utilidad propuesta de la membrana que se evalúa experimentalmente en este trabajo. El banco de ensayos con los dispositivos empleados y sus características y conexionado se presentan en el capítulo tres. En el cuarto capítulo, se describen y analizan los resultados de los ensayos realizados. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones y posibles ampliaciones del proyecto. Además, este documento cuenta con un anexo, en el cual se adjunta un breve manual del correcto uso de la instalación que se ha utilizado para el desarrollo de este proyecto.

2 LA DESALACIÓN DE AGUA MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA

En este capítulo se profundizará en el contexto mundial de la desalación, los fundamentos que rigen la técnica de la ósmosis inversa, así como en sus principales configuraciones y parámetros característicos.

La desalación de agua es producida por el ciclo hidrológico natural a través de la aportación energética de la radiación solar. La radiación evapora el agua de los lagos, ríos y océanos, produciendo nubes y disuelve minerales al discurrir sobre la tierra. Debido a que el proceso natural de evaporación, precipitación y arrastre lleva continuamente sales de la tierra al mar, los mares y océanos mantienen su contenido salino de esta manera.

La idea de separar las sales del agua es muy antigua y se remonta a tiempos en los que la obtención de sal y no del agua era lo más importante. Sin embargo, a medida que aumentaba la demanda de agua dulce, se comenzó a considerar la posibilidad de producir agua en lugares áridos y remotos, especialmente en barcos.

Es muy difícil encontrar agua pura en la Tierra. Se refiere al agua dulce, al agua de río o con baja concentración de sales, al agua salobre, al agua marina, a la salmuera y al agua residual según su contenido de sales. La International Desalination Association (IDA) ha clasificado las aguas en diferentes categorías, como se muestra en la *Tabla 1*:

Tipos de aguas	SDT (mg/L)
Agua pura	STD < 500 mg/L
Agua de río o baja concentración	500 < STD < 1.500
Agua salobre	1.500 < STD < 20.000
Agua marina	20.000 < STD < 50.000
Salmuera	STD > 50.000
Agua residual	Agua de núcleos urbanos o industrias

Tabla 1. Clasificación tipos de agua (International Desalination Association)

El término desalación se refiere a una variedad de procesos tecnológicos que se utilizan para extraer sal de agua de una variedad de calidades. La potabilización del agua para uso doméstico y urbano y el tratamiento del agua para procesos industriales son solo algunos de los objetivos de estos procesos tecnológicos.

El crecimiento de la población, el aumento del consumo de agua y la contaminación están exacerbando la escasez de agua en todo el mundo. El 40% de la población mundial enfrenta una grave escasez de agua, que aumentará al 60% para 2025. Las fuentes convencionales de agua ya no son suficientes para satisfacer la demanda humana en áreas escasas de agua. Es necesario un enfoque radical para la gestión de los recursos hídricos que incluya la explotación de recursos hídricos no convencionales. La desalinización de agua de mar y agua altamente salobre se considera una opción viable para satisfacer principalmente las necesidades domésticas y municipales.

En un análisis bibliométrico que se realizó utilizando la base de datos Web of Science para evaluar las tendencias de investigación en el campo de la desalinización de agua de mar (Jones et al., 2019). Las publicaciones fueron categorizadas según los principales temas de investigación, como tecnología, medio ambiente, economía y energía e intereses sociales. Dentro de la categoría de tecnología, se examinaron las tendencias en la investigación sobre tecnologías específicas, incluyendo ósmosis inversa, destilación de múltiple efecto, destilación de múltiples etapas, electrodiálisis, tecnologías emergentes y otras tecnologías. El estudio cubrió el período de 1980 a 2018.

Un porcentaje muy pequeño del total de plantas de desalinización. La tecnología de desalinización se clasificó en las siguientes seis categorías: 1) Ósmosis inversa; 2) Destilación térmica ;3) Electrodiálisis; 4) Ósmosis hacia adelante; 5) Destilación por membrana; y 6) Nanofiltración.

Se determinó el volumen de salmuera para cada planta, esto permitió estimar la cantidad total de salmuera producida en cada país y en todo el mundo como se puede ver en la *Figura 1*.

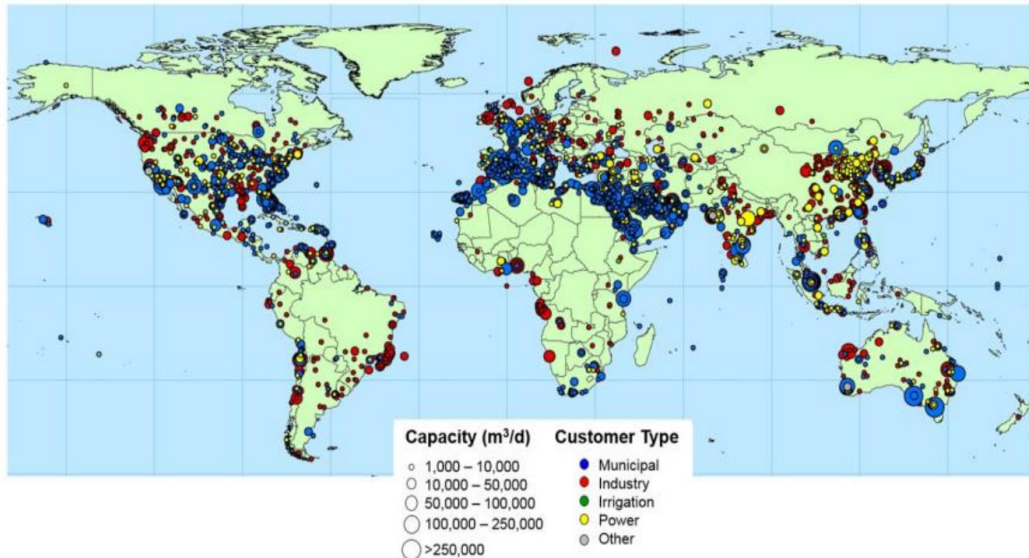


Figura 1. Distribución global de las instalaciones operativas de desalinización y capacidades (N1000m³ /día) por usuario del agua producida por sector. (Jones et al., 2019)

En las últimas décadas se puede apreciar un considerable aumento en la investigación tecnológica frente a los aspectos económicos y ambientales (*Figura 2*). Por un lado, la investigación económica se ha centrado en temas como los costos de capital y operativos, la evaluación de la viabilidad económica y el impacto en la economía local. Por otro lado, la investigación ambiental ha examinado cuestiones como los impactos en el medio ambiente, la eficiencia energética, la huella de carbono y la gestión de residuos. También se están desarrollando nuevas tecnologías y procesos que buscan minimizar los impactos ambientales de la desalinización, como la recuperación de energía y la gestión de residuos.

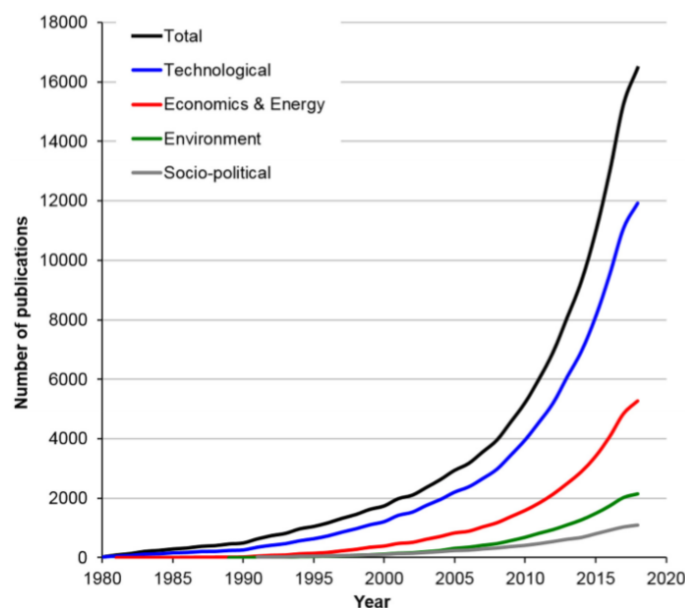


Figura 2. Número de publicaciones sobre desalinización por categorización (total, técnica, social, medio ambiente, energía y economía). (Jones et al., 2019)

En general, se espera que el aumento en la investigación en aspectos económicos y ambientales de la desalinización tenga un impacto significativo en la forma en que se implementa y se utiliza esta tecnología en el futuro. Esto incluye el desarrollo de políticas y regulaciones que aborden los impactos ambientales y económicos de la desalinización, así como la adopción de tecnologías y prácticas que reduzcan estos impactos.

Esta escasez de agua comentada anteriormente debido al aumento de población es lo conocido como estrés hídrico. Este problema se ve agravado por extracciones excesivas de aguas superficiales, políticas inadecuadas de gestión de recursos públicos, diversas formas de contaminación, urbanización, expansión urbana y crecimiento de la población, así como los efectos del cambio climático.

El siguiente mapa, basado en datos del Think Tank estadounidense World Resources Institute, muestra las predicciones del estrés hídrico para 2040. Estas predicciones se derivan de la relación entre la extracción anual total de agua y la cantidad total de recursos renovables disponibles. Los números más altos indican una mayor competencia entre los usuarios y afectan a una gran parte de la población mundial: el oeste de los Estados Unidos, México, la costa oeste de América Latina, la región mediterránea, Oriente Medio, Asia occidental y el norte de China.

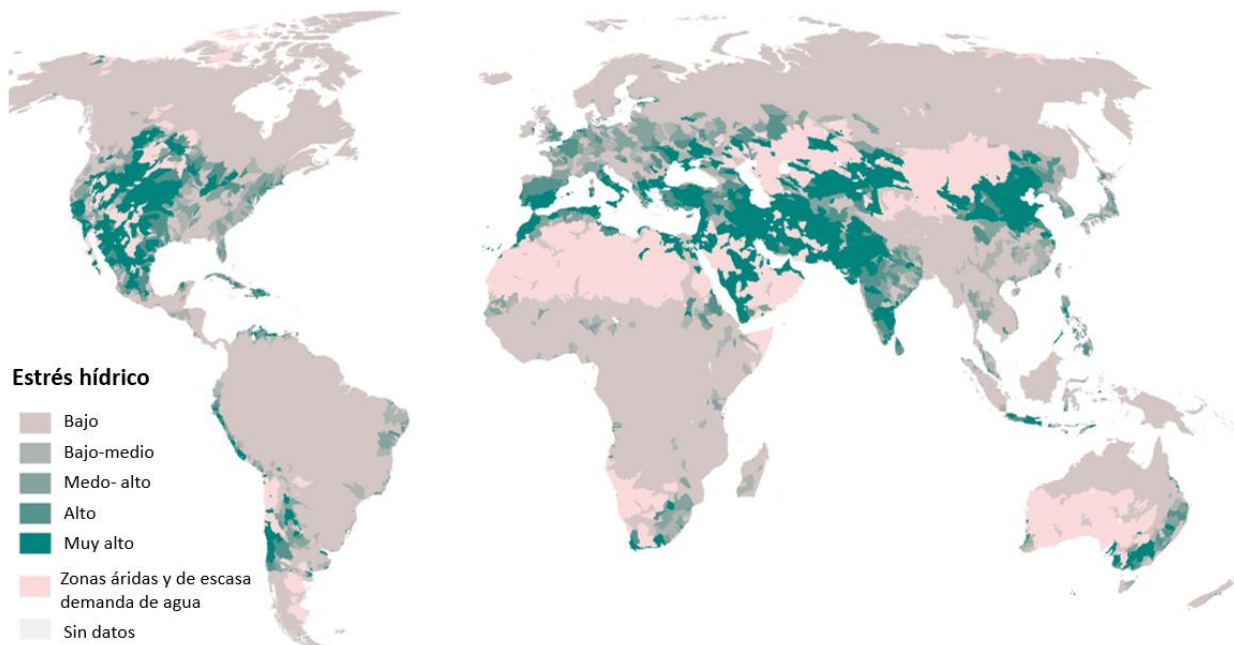


Figura 3. Predicciones del estrés hídrico para 2040 (World Resources Institute, 2023).

Por tanto, la desalinización se ha convertido en una tecnología importante para el suministro de agua en muchas partes del mundo, especialmente en regiones áridas o con problemas de escasez de agua. A medida que la tecnología ha mejorado y se ha vuelto más eficiente, el costo de producción de agua desalinizada también ha disminuido, lo que la hace más accesible para una variedad de usuarios, desde industrias hasta comunidades pequeñas. A pesar de esto, todavía existen desafíos importantes relacionados con la energía necesaria para la desalinización y la gestión de los residuos producidos por el proceso de desalinización.

Este hecho definirá las diferentes configuraciones posibles, comenzando por la más básica, la *Figura 6*. En la desalación de agua de mar, el número de elementos de membrana en cada serie y etapas varía, aunque siempre se instalan 7 a 8 elementos de membrana en el primer paso y con frecuencia se instala un segundo paso, pero rara vez se instala una segunda etapa. Para el tratamiento de efluentes y la desalación de agua salobre, los diseños de ósmosis inversa son distintos, siempre incluyen dos etapas y generalmente no es necesario un segundo paso.

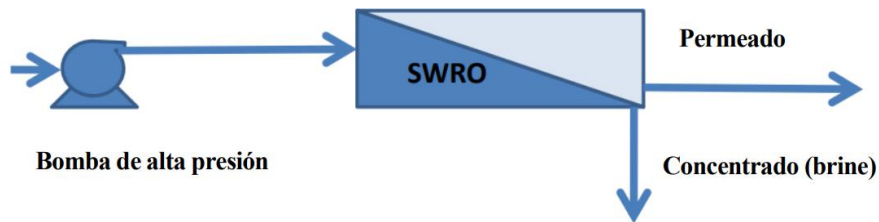


Figura 6. Diagrama conceptual de un sistema de desalación.

Los componentes de la membrana están conectados en serie dentro de un cilindro llamado tubo de presión. El número recomendado de elementos de membrana por tubo es de 7 a 8.

Sabemos que el proceso de desalación de ósmosis inversa utiliza una membrana semipermeable para separar la sal y otras impurezas del agua. Sin embargo, al acoplarlos a plantas de desalación convencionales, los sistemas de ósmosis inversa no convencionales pueden ser más eficientes y menos costosos.

Un sistema de ósmosis inversa no convencional (NC) con turbocargador acoplado a una planta de desalación convencional (*Figura 7*), es una configuración que combina la tecnología de ósmosis inversa con la tecnología de turbocharger para aumentar la eficiencia y reducir los costos de desalación del agua de mar.

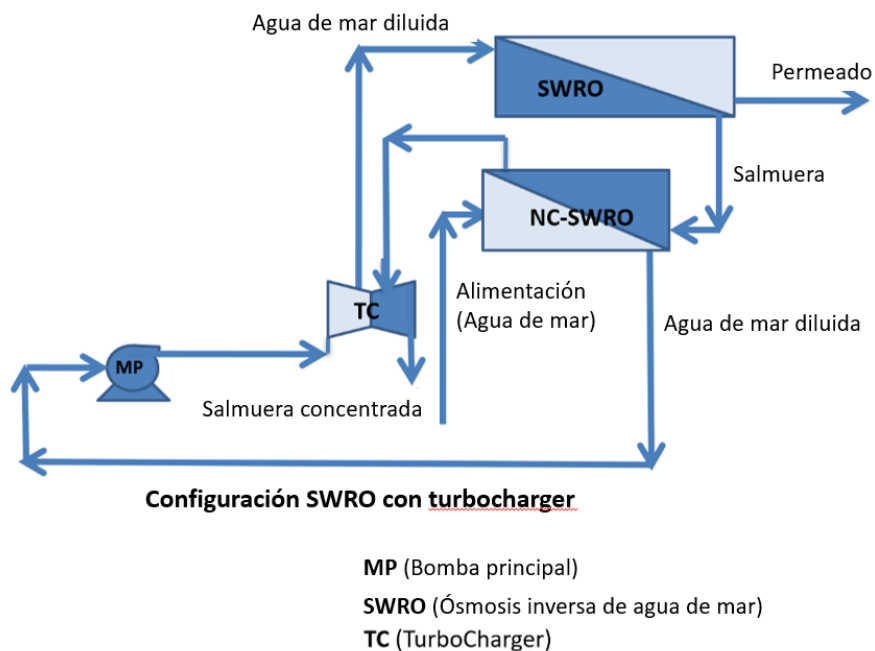


Figura 7. Sistema NC SWRO para acoplarlo a planta convencional de desalación

Para crear la presión necesaria para el proceso de ósmosis inversa, este sistema utiliza un turbocharger en lugar de bombas convencionales. Un turbocharger es un dispositivo que utiliza una turbina impulsada por gases de escape para comprimir el aire de admisión de un motor. En los sistemas NC SWRO comprime el agua del mar y crea la presión necesaria para el proceso de ósmosis inversa.

Al impulsar la turbina utilizando la energía cinética del agua de mar, el turbocharger reduce significativamente el consumo de energía eléctrica externa y los costos operativos.

Las membranas de ósmosis inversa de alta eficiencia y bajo consumo de energía se utilizan para separar sales y otros contaminantes del agua de mar. Además, el sistema NC SWRO con turbocharger se controla y monitorea mediante sensores y sistemas de automatización para garantizar un funcionamiento óptimo y una alta calidad del agua desalada.

En resumen, un sistema NC SWRO con t turbocharger acoplado a una planta de desalación tradicional utiliza un turbocharger r para producir la presión necesaria para el proceso de ósmosis inversa, lo que reduce el consumo de energía y los costos operativos. Esto proporciona una forma más económica y efectiva de obtener agua potable del agua de mar.

3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El objetivo de este capítulo es determinar de una forma experimental la permeabilidad al agua de la membrana FO4040 de TORAY mediante una serie de ensayos realizados con un prototipo de ósmosis inversa a contracorriente.

Como se ha explicado anteriormente este proyecto consiste en reducir significativamente el consumo de energía específico del proceso, por ello se propone un nuevo concepto de planta de desalación basada en el flujo a contracorriente a través de una membrana de ósmosis inversa (Modelo FO4040). Las dos corrientes que participarán en la instalación son: agua de mar y salmuera, esta segunda con mayor concentración de los valores estándar para agua de mar.

La finalidad de la ósmosis inversa es reducir la concentración de sales a través de una membrana semipermeable. Para ello es necesario aplicar una fuerza de empuje superior a la presión osmótica en dirección opuesta al proceso de ósmosis. De esta forma se obtiene a la salida una salmuera más concentrada en sales (concentrado), mientras que la corriente de agua de mar tiene menos salinidad (permeado). Para realizar esa fuerza de empuje superior a la presión osmótica, la instalación dispone de una bomba que permite aumentar la presión de las corrientes hasta los valores requeridos para que el proceso se dé lugar.

En el siguiente diagrama (*Figura 88*) se observa de forma conceptual las diferentes corrientes que se mencionaban anteriormente, agua de mar (S3) y salmuera (S1).

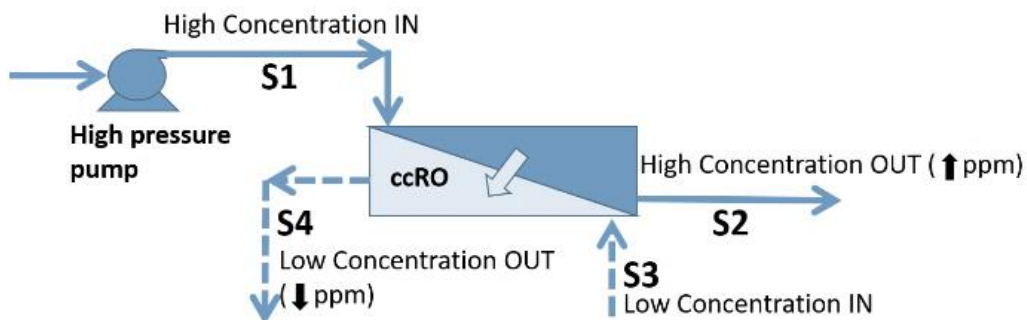


Figura 8. Diagrama conceptual de la membrana de ósmosis inversa a contracorriente

- 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 absorción de agua pura procedente de la corriente 1-2.

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 las mostradas en la siguiente ecuación:

$$p_{s1} - s_2 - p_{s3} - s_4 > \Pi_{s1} - s_2 - \Pi_{s3} - s_4 \quad (1)$$

3.1 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.

La instalación desempeña un papel fundamental en este proyecto. Su correcto funcionamiento depende en gran medida de los componentes y la instrumentación utilizada, los cuales interactúan de manera sinérgica para garantizar un rendimiento óptimo y confiable. Por lo tanto, es esencial comprender en detalle cómo estos elementos trabajan en conjunto para lograr los objetivos de la instalación.

3.1.1 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 99* *Figura 9. Válvula de esfera*) y las válvulas de regulación de presión (*Figura 1010*).

Una válvula de esfera es un tipo de válvula que utiliza una bola perforada para controlar el flujo de fluido. Esta válvula consta de un cuerpo con una cavidad pasante, en cuyo centro hay una bola con un orificio pasante.

Cuando la válvula de esfera está en la posición abierta, el orificio de la bola está alineado con el canal, lo que permite que el fluido fluya continuamente. Por otro lado, al girar la palanca o volante de la válvula se posiciona la bola de modo que el orificio quede perpendicular al flujo, bloqueando completamente el paso del líquido.



Figura 9. 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 manteniendo unos 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 10. Válvula de regulación de presión

La instalación consta de seis válvulas (Figura 11 y Figura 12), las cuales desempeñan un papel esencial en el control del flujo de agua, la regulación de la presión y la operación eficiente del sistema. Su correcto funcionamiento garantiza la obtención de agua purificada de alta calidad y la protección de la membrana semipermeable.

- Válvula de entrada HC (BR-RO-01)
- Válvula de salida HC (BR-RO-02)
- Válvula de entrada LC (BR-RO-03)
- Válvula de salida LC (BR-RO-04)
- Válvula de regulación de presión HC (NE-RO-01)
- Válvula de regulación de presión LC (NE-RO-02)



Figura 12. Válvulas de entrada y salida



Figura 11. Válvulas de regulación de presión

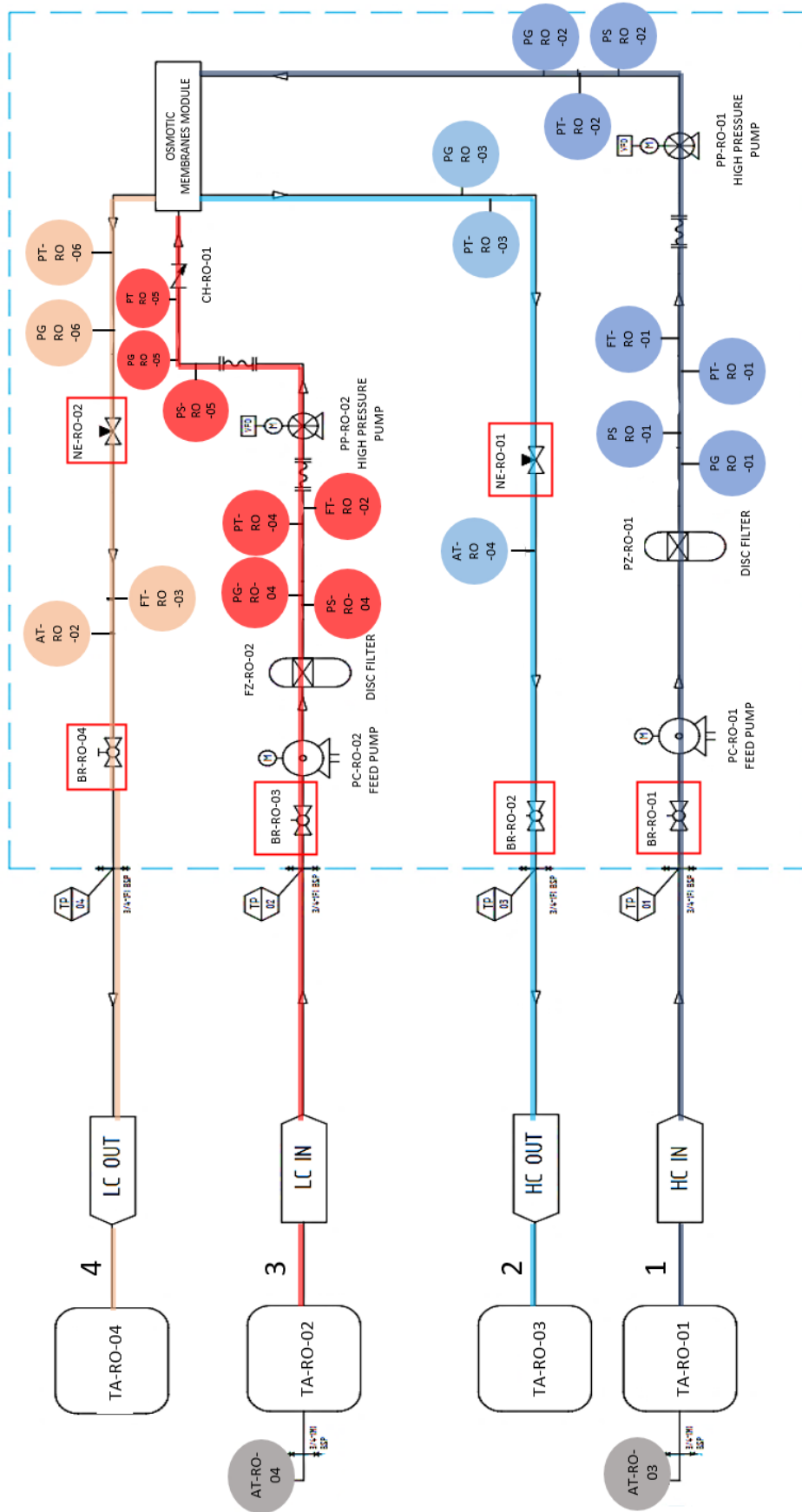


Figura 13. Diagrama de la instalación

Como se puede apreciar en el diagrama de la instalación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3**) existen cuatro corrientes, dos de entrada y dos de salida. Por un lado, está la corriente de alta presión donde la corriente 1 es la entrada y la corriente 2 es la salida. Por otro lado, está la corriente de baja presión donde la corriente 3 es la entrada y la corriente 4 es la salida. A lo largo de ambas corrientes encontramos la instrumentación necesaria para medir las diferentes señales.

- ❖ La corriente 1 es la entrada principal de agua sin tratar al sistema de ósmosis inversa. El agua proviene del depósito TA-RO-01. Antes de ingresar al sistema, generalmente se realizan procesos previos de filtración y eliminación de sedimentos para proteger la membrana de ósmosis inversa.
- ❖ La corriente 2 es la corriente que, tras pasar a través de la membrana de ósmosis inversa, una porción del agua cruda se convierte en agua purificada o permeado. Esta corriente de salida es la primera de las dos corrientes de agua purificada que se obtienen.
- ❖ La corriente 3 es la segunda corriente de agua, conocida como corriente de concentrado o rechazo, que se utiliza para controlar la concentración y la presión en el sistema de ósmosis inversa. Esta corriente de entrada se combina con el agua sin tratar para formar la corriente de alimentación, que fluye hacia la membrana.
- ❖ La corriente 4 es la corriente que, después de que la corriente de alimentación pasa a través de la membrana de ósmosis inversa, se divide en dos corrientes de salida. Una de ellas es la corriente de permeado (agua purificada y de mayor calidad), que corresponde a la corriente 4. La otra corriente es la corriente de concentrado o rechazo, que contiene una mayor concentración de impurezas y contaminantes y se descarta del sistema.

Además, en el diagrama se pueden observar la estratégica distribución de las válvulas mencionadas anteriormente en las diferentes corrientes. Así como, 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 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4**) y baja presión (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5**) 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 14. Bomba de Alimentación



Figura 15. 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, espaciadores, entradas y salidas de agua, y sellado adecuado para garantizar un funcionamiento eficiente y confiable del proceso como se puede observar en la *Figura 16*.

Se fabrica al enrollar membranas en forma de espiral, suelen medir entre 40 y 60 pulgadas de largo, y los diámetros más comunes son de 4 a 8 pulgadas. Durante la operación el agua entra a presión por un lado de la membrana, a medida que esta fluye de forma tangencial a través de esta, parte de esa presión pasa por la superficie hacia el colector de permeado, mientras que el agua, con alta concentración de sales, sale por el otro extremo de la membrana. Se alberga en un vaso de presión de acero inoxidable dúplex a 70 barg.

Módulo de Ósmosis Inversa	
Fabricante	Toray
Modelo	F4040
Tipo membrana	Composite de película fina con revestimiento de poliamida
Flux(L/m²/h)	30±5
Flux inverso específico de NaCl(g/L)	<0,5
Rango de operación de pH	2-11

Tabla 2. Características de la membrana



Figura 16. Membrana Toray F4040

3.1.2 Instrumentación

Continuaremos con la instrumentación utilizada en la instalación (*Tabla 3*). 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.

Tipo	Cantidad	TAG	Precisión
Manómetro	6	PG-RO-01 a PG-RO-06	Clase 1.6
Presostato	4	PS-RO-01 a PS-RO-02	±0,5 % span.
Transmisor de presión	6	PT-RO-01 a PT-RO-06	±0,5 % span.
Transmisor de caudal	3	FT-RO-01 a FT-RO-03	±0,5 % span.
Analizador conductividad	4	AT-RO-01 a AT-RO-04	±0,5 % span.

Tabla 3. Dispositivos de Instrumentación

- Manómetro

Los manómetros (*Figura 17*) 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.

Tipo	Burdon
Clase precisión	1.6
Protección	IP65
Dial	DN63
Conexión	Posterior ¼" BSP-M
Material	Inox. 316
Relleno	Glicerina

Tabla 4. Características del manómetro



Figura 17. 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 y una producción eficiente de agua purificada. Es un dispositivo que se utiliza para cerrar o abrir un circuito eléctrico en función de la presión que ejerce un fluido sobre un pistón interno, que se mueve hasta que se unen dos contactos. Es un interruptor de presión que actúa dependiendo de la presión del agua.

Los presostatos (Figura 188) 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.

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

Tabla 5. Características del presostato



Figura 18. Presostato

- Transmisor de presión

Un transmisor de presión (*Figura 19*) es un dispositivo utilizado para medir y transmitir la presión del agua en tiempo real a través de una señal eléctrica.

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

Estos transmisores no disponen de indicador local. Como medida de seguridad, el equipo dispone de manómetros analógicos con indicación local según el estándar de Gefico.

Tipo	Modelo A-10
Material partes mojadas	Inox 316L
Material de la caja	Inox 316L
Tipo de medida	Presión relativa
Conexión a proceso	½" BSP-M
Señal de salida	4-20 mA
Tensión de alimentación	8-30Vdc
Salida de Cable	Prensa M12
Protección	IP65
Precisión	±0,5 % span.

Tabla 6. Características del transmisor de presión



Figura 19. Transmisor de presión

- Transmisor de caudal

Transmisor de caudal (*Figura 20*) un transmisor de caudal es un dispositivo utilizado para medir y transmitir la tasa de flujo del agua en tiempo real a través de una señal eléctrica. Este dispositivo proporciona información precisa sobre la cantidad de agua que circula a través del sistema.

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

asociados con el proceso de ósmosis inversa.

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

Tipo	Electromagnético
Alimentación	100-240 Vac/24Vac/24Vdc
Señal de salida	4-20 mA
Entrada cable	M20
Conexión a proceso	Brida EN1092-1. PN16
Protección	IP66
Precisión	±0,5 % span.

Tabla 7. Características del transmisor de caudal



Figura 20. Transmisor de caudal

- Analizador de conductividad

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

Un analizador de conductividad (*Figura 21*) es un dispositivo utilizado para medir la conductividad del

agua en tiempo real. La conductividad es una medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad y se utiliza como indicador de la calidad del agua y del rendimiento del sistema de ósmosis inversa.

El analizador de conductividad PT100 utiliza una sonda o electrodo de conductividad sumergido en el agua para medir la conductividad eléctrica. La sonda contiene dos electrodos, y al aplicar una corriente eléctrica a través del agua, se mide la resistencia al flujo de la corriente. Esta resistencia está directamente relacionada con la conductividad del agua.

El PT100 se refiere a un termistor de platino que se utiliza en el analizador de conductividad para medir y compensar la temperatura del agua. La conductividad del agua varía con la temperatura, por lo que el PT100 ayuda a corregir la medición de conductividad en función de la temperatura actual.

Por tanto, proporciona una lectura precisa de la conductividad del agua y puede mostrarla en unidades como microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) o milisiemens por centímetro (mS/cm). Esta información es esencial para controlar y ajustar el sistema de ósmosis inversa, ya que una conductividad alta puede indicar una menor eficiencia de remoción de sales y una posible necesidad de mantenimiento o limpieza de los componentes del sistema.

Tipo	Inductiva
Variable medidas	Conductividad y temperatura
Protección	IP66
Comunicaciones	4-20 mA
Alimentación	100-240 Vac/24Vac/24Vdc
Entrada de cable	M20
Protección	IP65

Tabla 8. Características Analizador de conductividad



Figura 21. Analizador de conductividad (PT100)

3.2 Gestión de datos

En este apartado se desarrolla el conexionado de los diferentes dispositivos de instrumentación que se han usado para medir las señales de la instalación con el registrador de datos por el que se han obtenido los resultados.

Para la gestión de los datos se ha utilizado el registrador de datos MultiCon CMC-99/141 (*Figura 22*). 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 22.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.

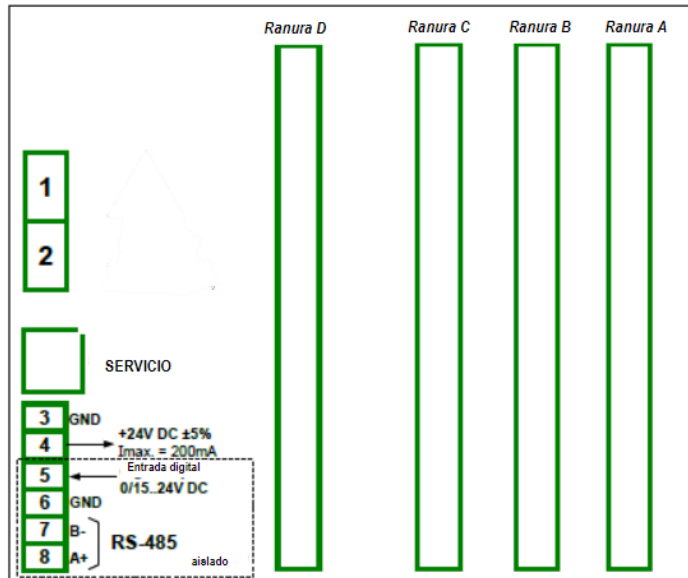


Figura 23. Descripción de las terminales

Dependiendo de las necesidades, se pueden añadir más o menos módulos (Figura 23). En nuestro caso tenemos un módulo de comunicación (interfaces seriales, USB y Ethernet adicionales instaladas en la ranura D). Además de otros tres módulos (instalados en un lugar designado como Ranura A, Ranura B, Ranura C).

A continuación, se muestra la configuración de los módulos instalados (Figura 24, Figura 25, Figura 26):

Ranura A

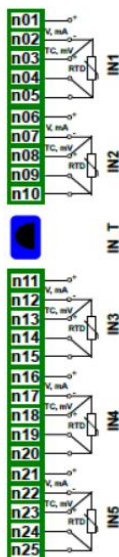


Figura 24. Módulo UN5
(5 entradas universales)

Ranura B

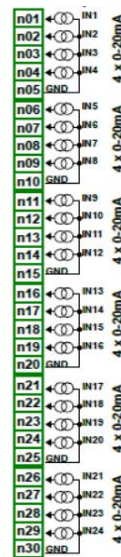


Figura 25. Módulo I24
(24 entradas de corriente)

Ranura C

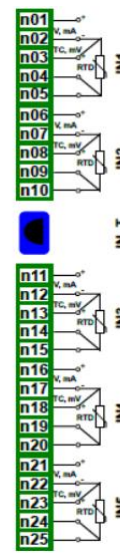


Figura 26. Módulo UN5
(5 entradas universales)

Por un lado, a la ranura B (Figura 27) se le han conectado los sensores de caudal (FT1, FT2, FT3), presión (PT1, PT2, PT3, PT4, PT5, PT6) y salinidad (AT1, AT2, AT3, AT4). Por otro lado, a la ranura C (Figura 28) se le han conectado los sensores de temperatura (THCout, TLCout). En cuanto a la ranura A, no ha sido utilizada para este experimento.

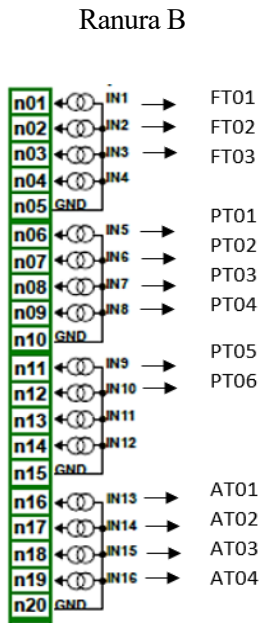


Figura 27. Conexión Módulo I24

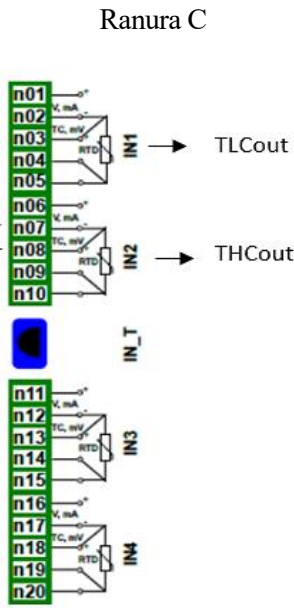


Figura 28. Conexión Módulo UN5



Figura 29. Conexión en MultiCon

A la hora de realizar el conexionado es importante tener bien diferenciados los polos positivos de los negativos de cada dispositivo, así como, su correcta etiquetación. Debido a que esto repercutirá en la adquisición de los datos asociados a dicho dispositivo.

Una vez ya se ha realizado el conexionado de los sensores a los módulos, se procede a la creación de los canales lógicos.

Un canal lógico es un flujo de datos existente en la memoria del dispositivo, que tiene su propio nombre y se puede visualizar de casi cualquier forma. Cada señal tiene un canal lógico asignado, así mismo tenemos conjuntos de canales lógicos que forman un grupo. Para este caso se han creado 5 grupos: caudal, presión, temperatura, salinidad y MGT.

Un grupo es un conjunto de 1-6 canales lógicos. El MultiCon CMC-99/141 puede mostrar en la misma pantalla sólo los canales que pertenecen al mismo grupo (Figura 30). Cada canal lógico puede pertenecer a uno o más grupos simultáneamente.

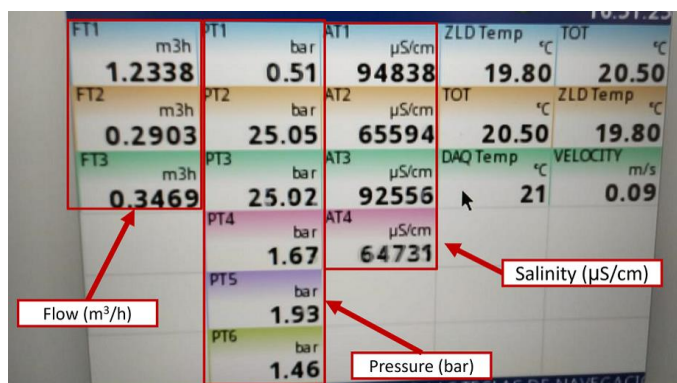


Figura 30. Grupos y canales lógicos.

Para realizar un registro de datos en el Sistema de Adquisición de Datos pulsar para cada grupo de medida (caudal, presión y salinidad): Menú/Grupos/Comenzar registro de datos. Es importante que, una vez creado el nuevo registro de datos para un grupo, se vuelva hacia la pantalla principal donde se muestran las medidas en tiempo real y se repita de nuevo el proceso con el siguiente grupo, ya que de no ser así es posible que los nuevos

registros no se generen correctamente.

4 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA PERMEABILIDAD AL AGUA DE LA MEMBRANA FO4040

EN este apartado se va a determinar experimentalmente la permeabilidad al agua de la membrana a través de una serie de ensayos.

Uno de los parámetros más importantes en los fenómenos de transporte de disolvente y sales a través de la membrana en un proceso de desalación por ósmosis inversa es la constante de permeabilidad al agua de la membrana, L_w . El caudal que atraviesa la membrana es directamente proporcional a la permeabilidad de esta, por lo que una caída en la constante de permeabilidad al agua da como resultado un valor de flujo de permeado más bajo y, en consecuencia, un peor rendimiento de la planta.

$$q_{Vw} = f \cdot L_w \cdot A \cdot NDP \quad (2)$$

- q_{Vw} , caudal de agua de transferencia (m^3/h).
- f , factor de ensuciamiento. ($f=1$, membrana nueva)
- L_w , permeabilidad ($kg/(h \cdot m^2 \cdot bar)$).
- A , superficie de la membrana (m^2).
- NDP (Net Driving Pressure), fuerza motriz del proceso (bar).

La fuerza motriz se puede definir como la diferencia entre las salinidades y las presiones que afectan al transporte del disolvente.

$$NDP = [(P_{HC} - P_{LC}) - (\pi_{HC} - \pi_{LC})] \quad (3)$$

Como se opera con agua de red ($<500ppm$) $\pi_{HC} = \pi_{LC} \cong 0$, de forma que la fuerza motriz solo se ve afectada por la diferencia de presiones.

$$NDP = (P_{HC} - P_{LC}) \quad (4)$$

Para obtener el valor de la permeabilidad de la membrana, basta con recoger los datos de los sensores de la instalación para determinar la fuerza motriz del proceso y conocer el caudal circulante.

A continuación, en la *Tabla 9. Explicación nomenclaturas* *Tabla 9* 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 9. Explicación nomenclaturas

4.1 Resultado de los ensayos

En este apartado, se presentan los resultados recogidos en los diferentes ensayos realizados. Cada ensayo cuenta con los Figuras de las medias directas (caudal, temperatura, presión), una Figura comparativa donde se aprecia la dependencia que existe entre los valores que toma el caudal transferido frente a la fuerza motriz y una Figura con la evolución que tiene la permeabilidad en cada ensayo.

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.

4.1.1 Ensayo 1

Fecha	Duración
12-12-2022	34:30 minutos

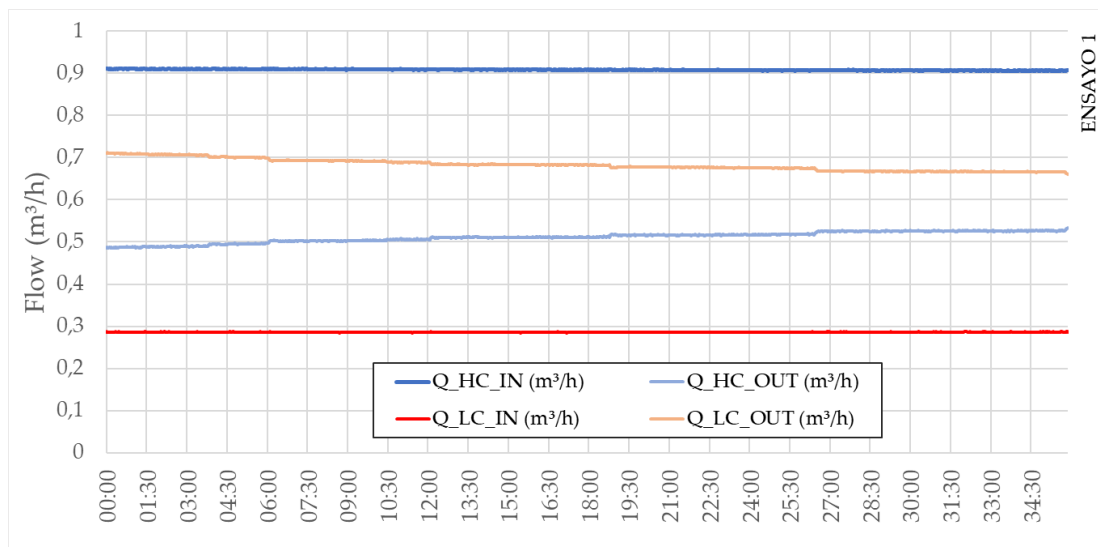


Figura 31. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 1. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT}

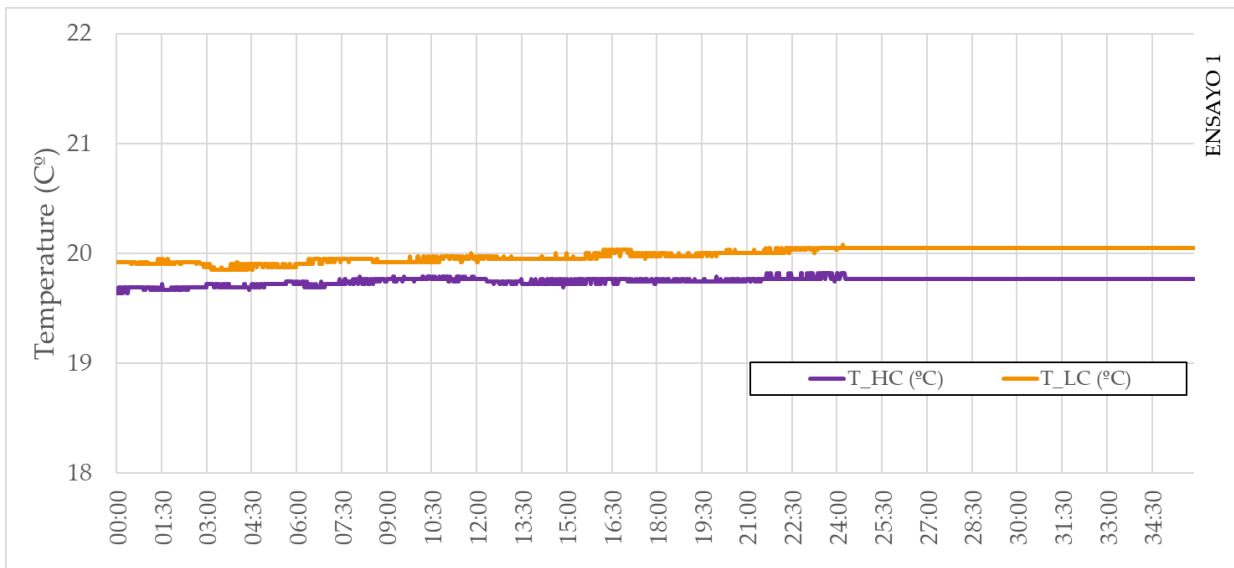


Figura 32. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 1 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.



Figura 33. 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.

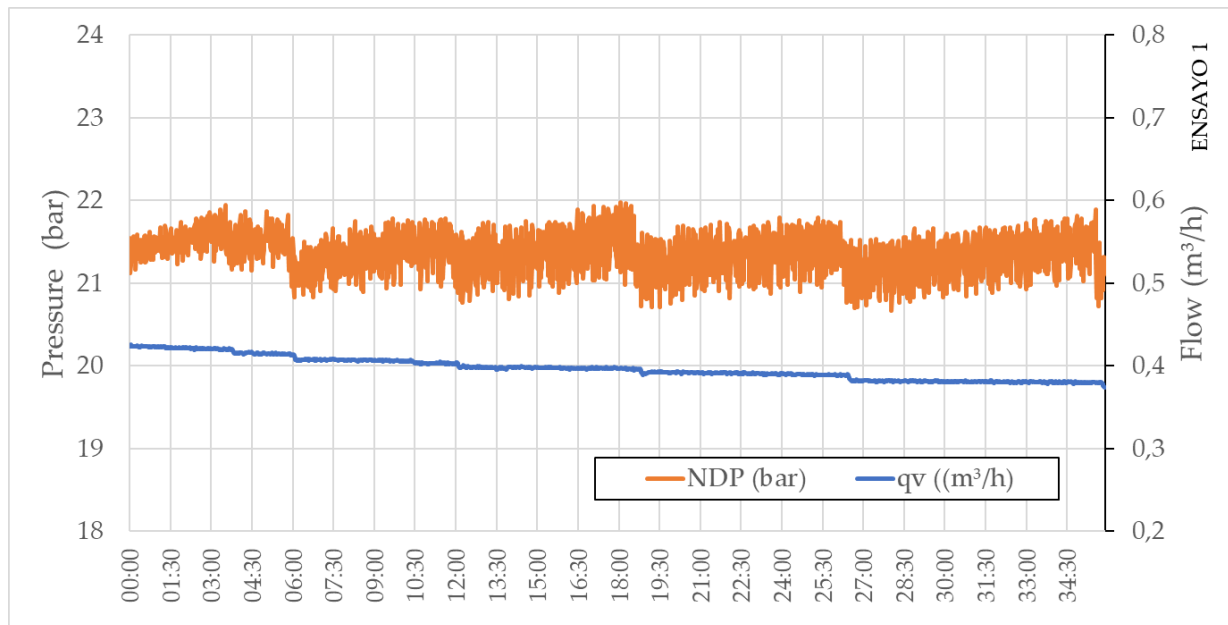


Figura 34. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 1. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

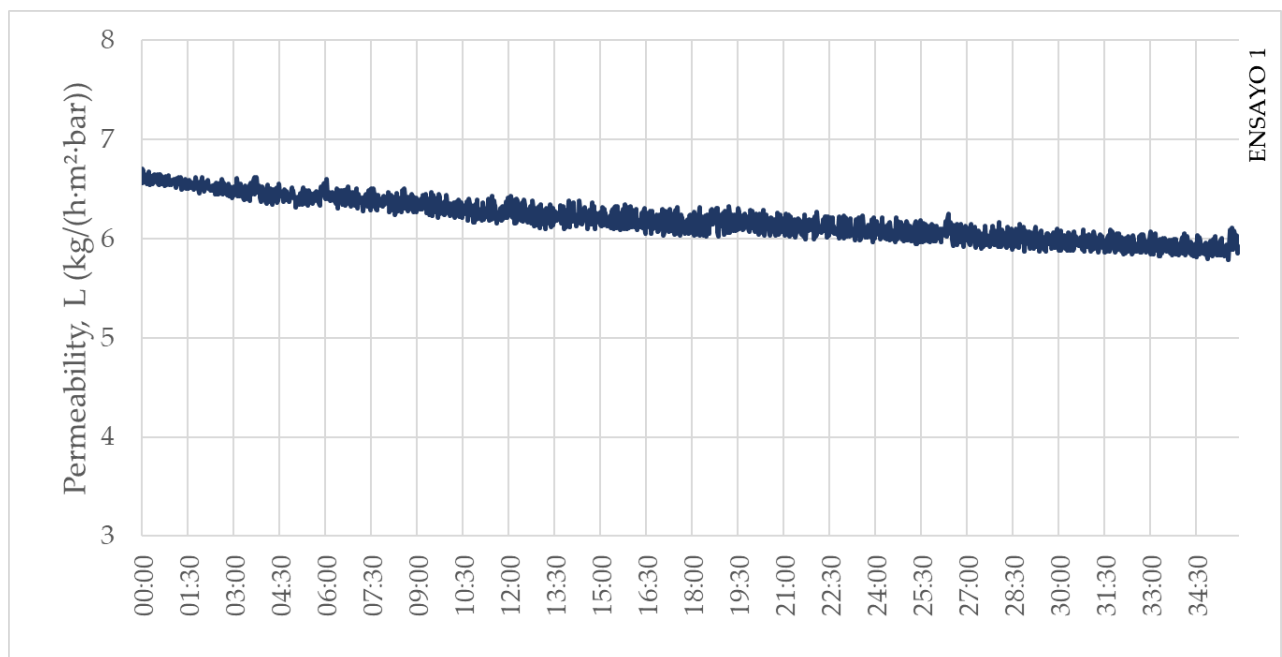


Figura 35. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 1. El valor promedio de la permeabilidad es 6.

A la hora de analizar los resultados obtenidos podemos comenzar observando cómo no se cumple el objetivo referido en el inicio de este apartado comentando que el objetivo a la hora de realizar los ensayos es mantener una presión de baja de 2.5 bar y una presión de alta de 25 bar. En la Figura 33 se puede apreciar como este objetivo no es la presión real a la que se opera el ensayo puesto que dichas presiones deben ser estabilizadas manualmente a lo largo del ensayo, ya que tienden a aumentar con el paso del tiempo. Debido a esto, puede apreciar una pequeña variación en las presiones tanto de baja como de alta, sobre todo en la de baja debido a que la sensibilidad del sensor es mayor.

Por un lado, observando las *Figura 31* y *Figura 32* se podría decir que la temperatura y el caudal son valores que se mantienen prácticamente constantes a lo largo del ensayo.

Por otro lado, en la *Figura 34* se puede observar cómo el caudal transferido está condicionado a la fuerza motriz del proceso.

En cuanto a la permeabilidad, en la *Figura 35* se puede observar como en los últimos 10 minutos aproximadamente se estabiliza en un valor próximo a 6.

4.1.2 Ensayo 2

Fecha	Duración
08-11-2022	34 minutos

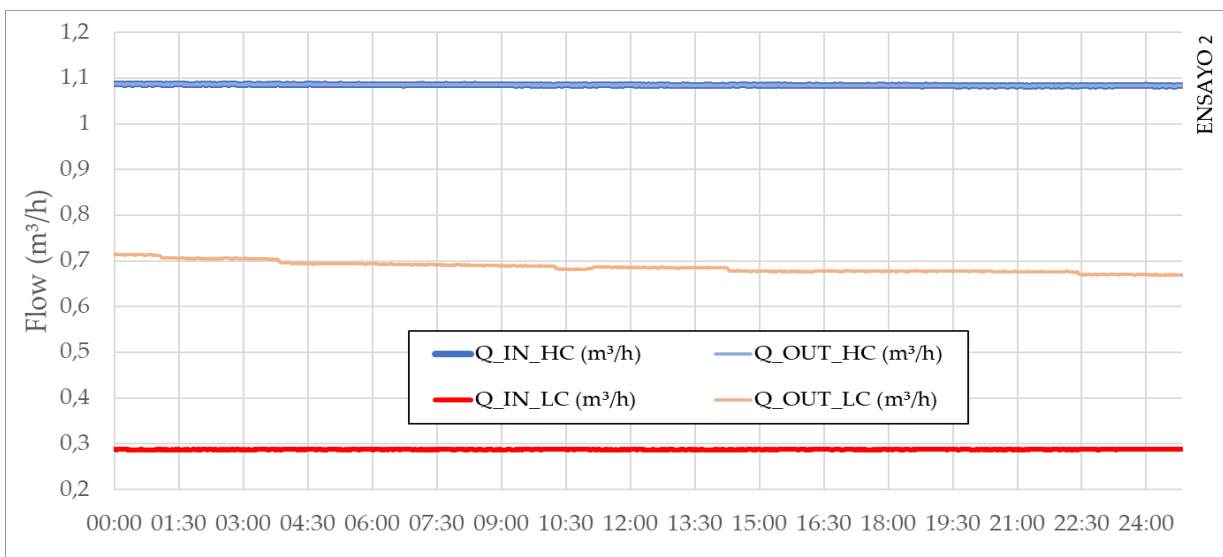


Figura 36. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 2. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

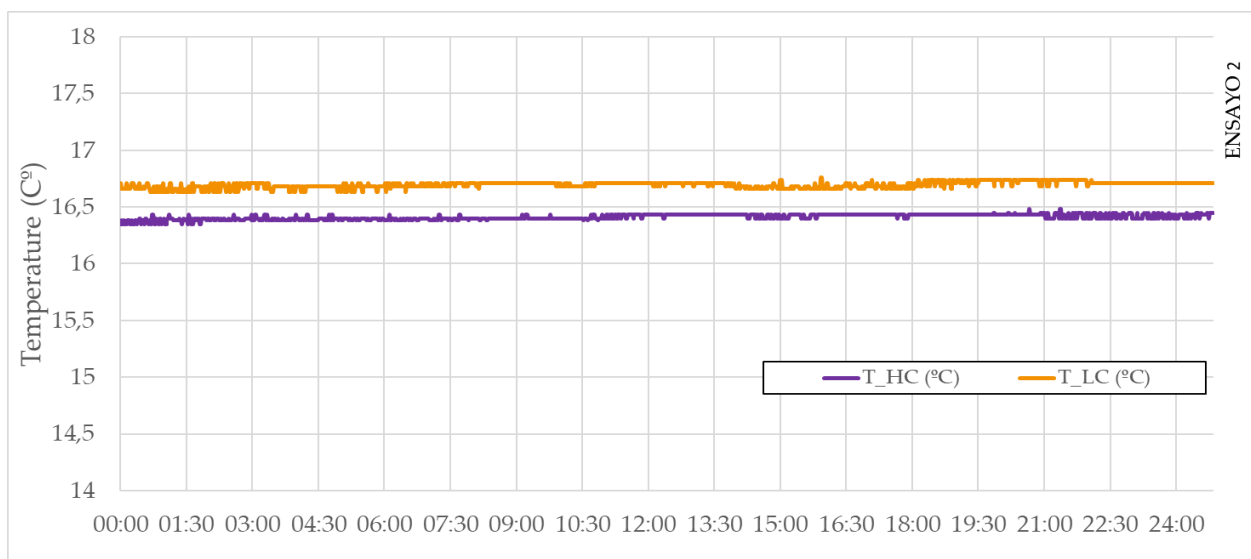


Figura 37. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

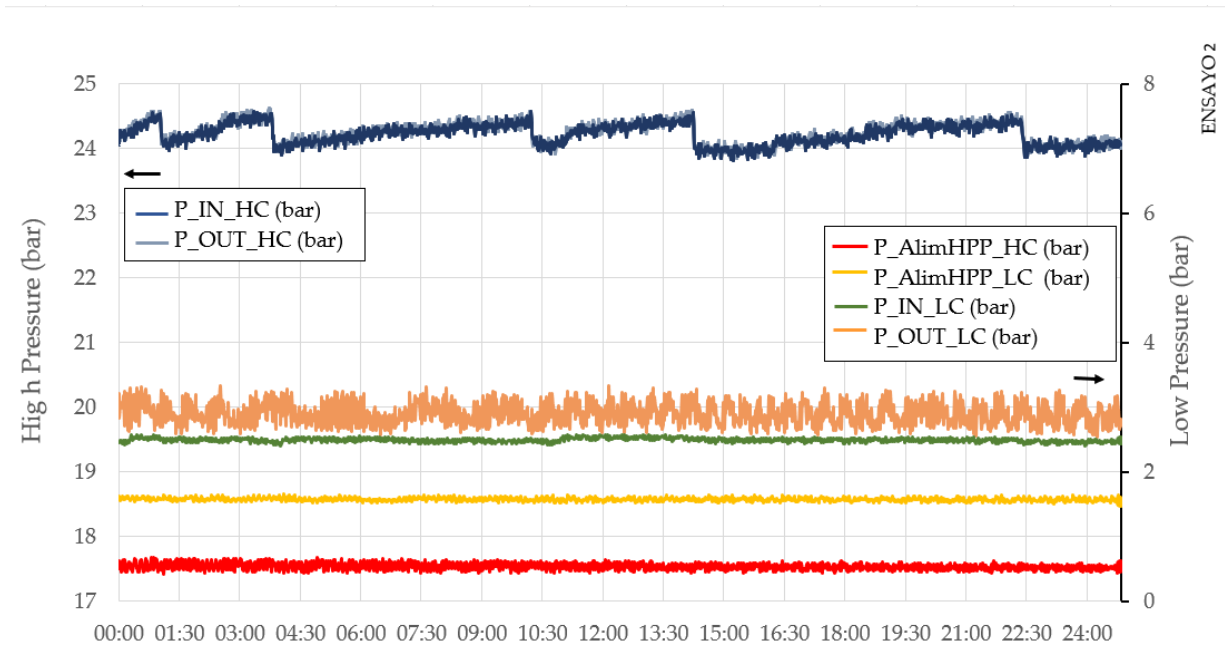


Figura 38. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 2 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{HC_IN_1}$ y $P_{HC_IN_2}$, entrada y salida de la bomba respectivamente. P_{HC_OUT} , tras la válvula de regulación de presión. Para la corriente de baja presión; $P_{LC_IN_1}$ y $P_{LC_IN_2}$, entrada y salida de la bomba respectivamente. P_{LC_OUT} , tras la válvula de regulación de presión.

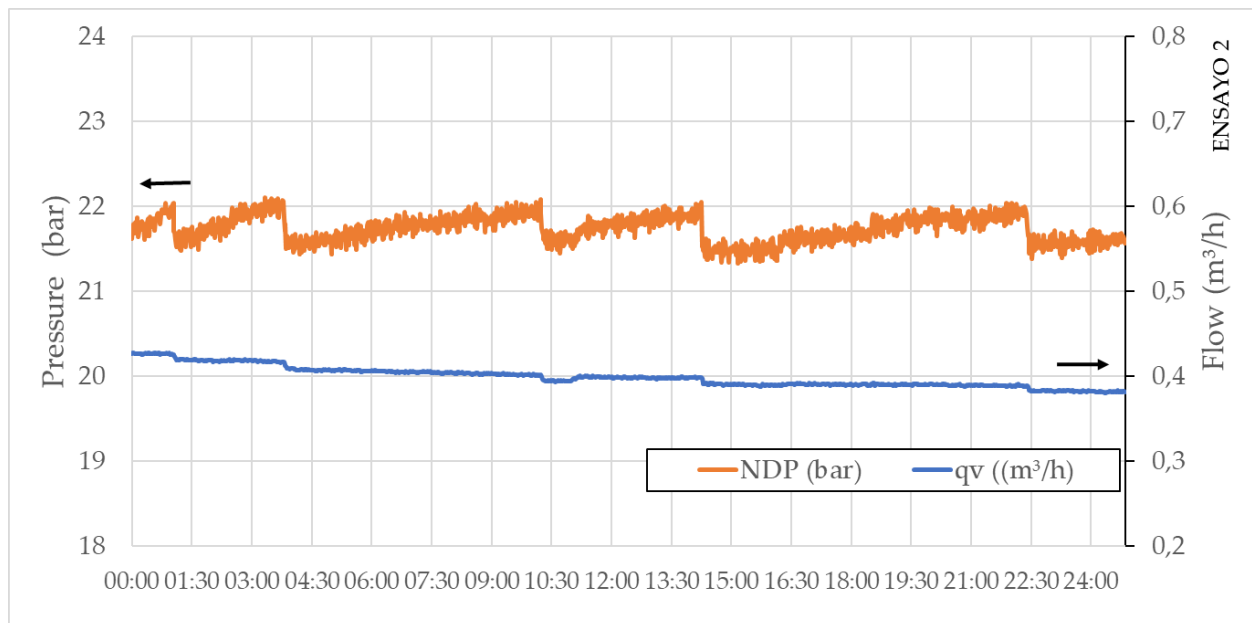


Figura 39. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 2. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

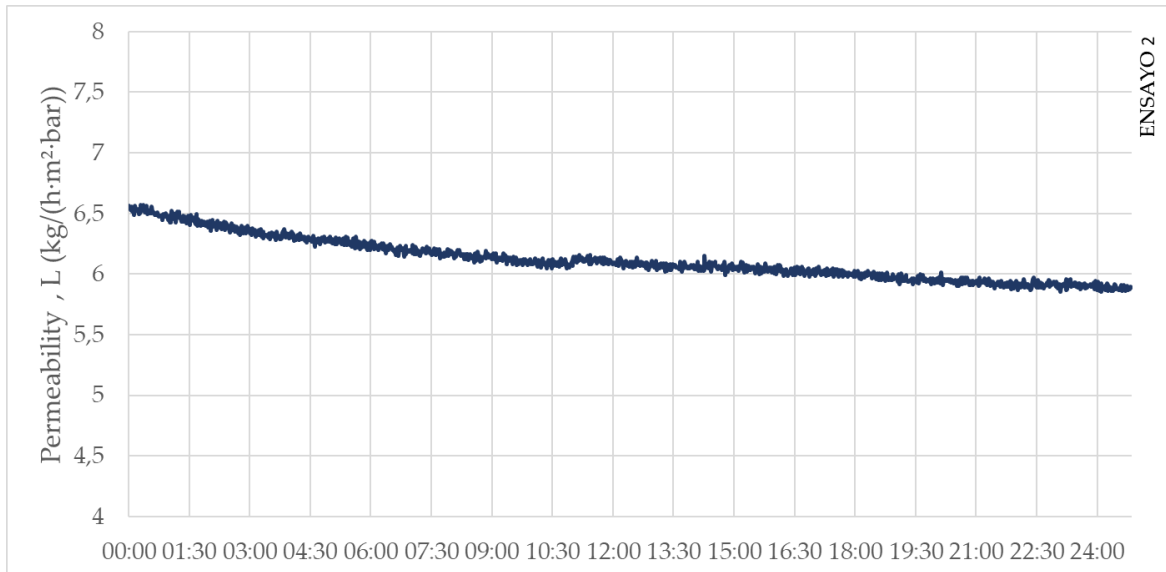


Figura 40. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 2. El valor promedio de la permeabilidad es 6.

4.1.3 Ensayo 3

Fecha	Duración
11-01-2023	39:00 minutos

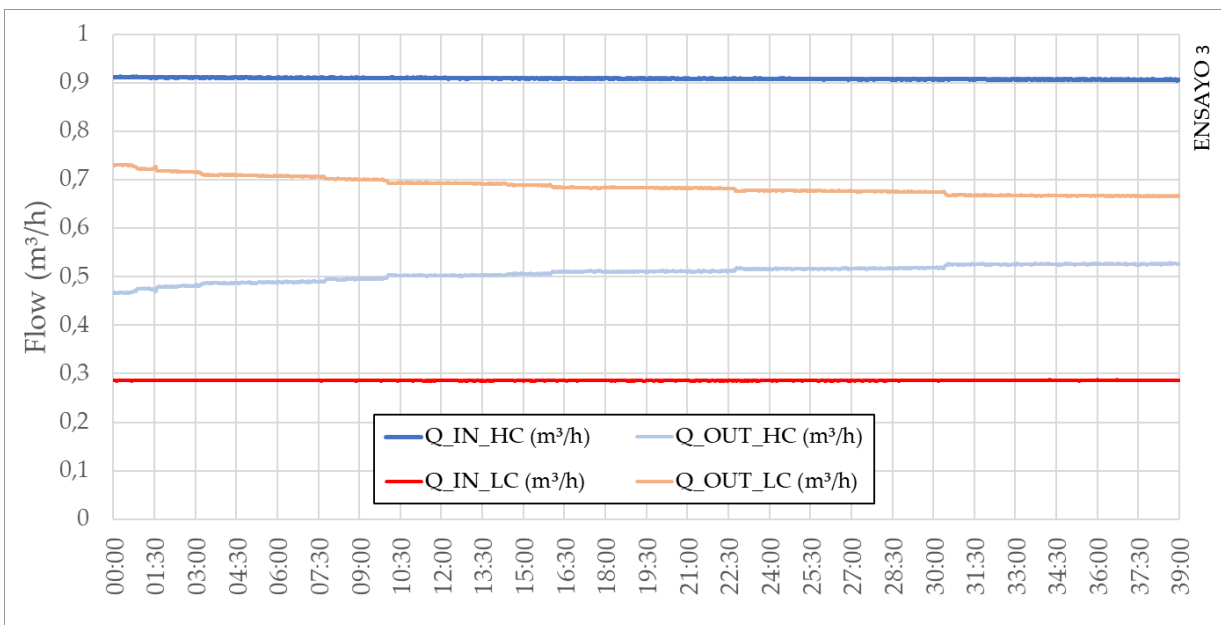


Figura 41. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 3. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

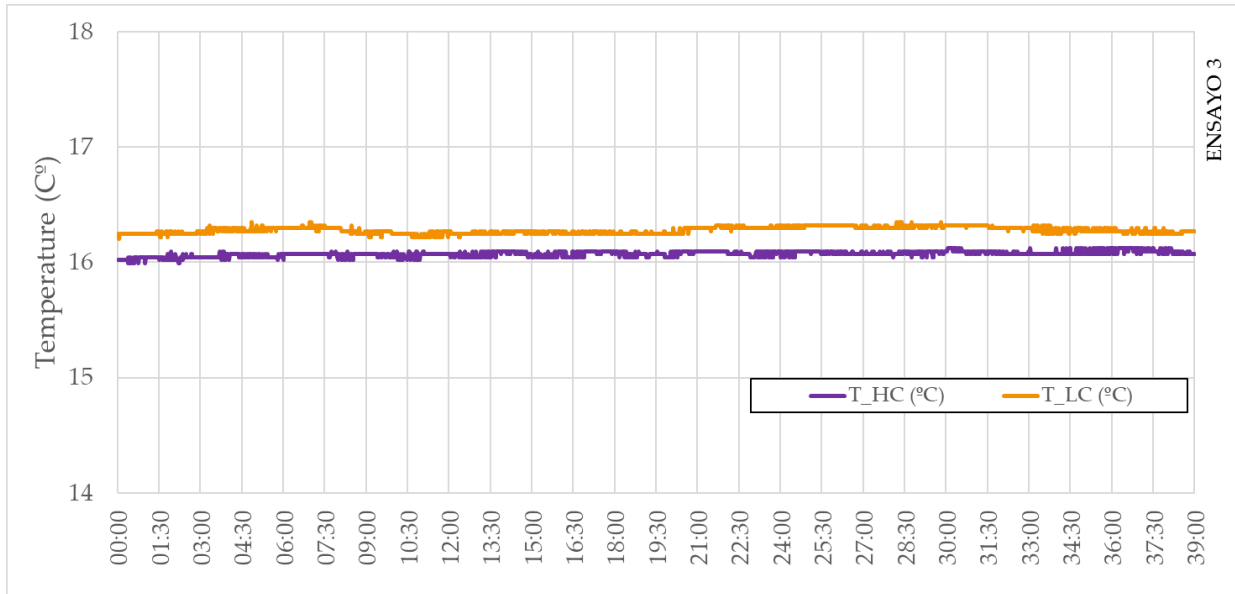


Figura 42. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

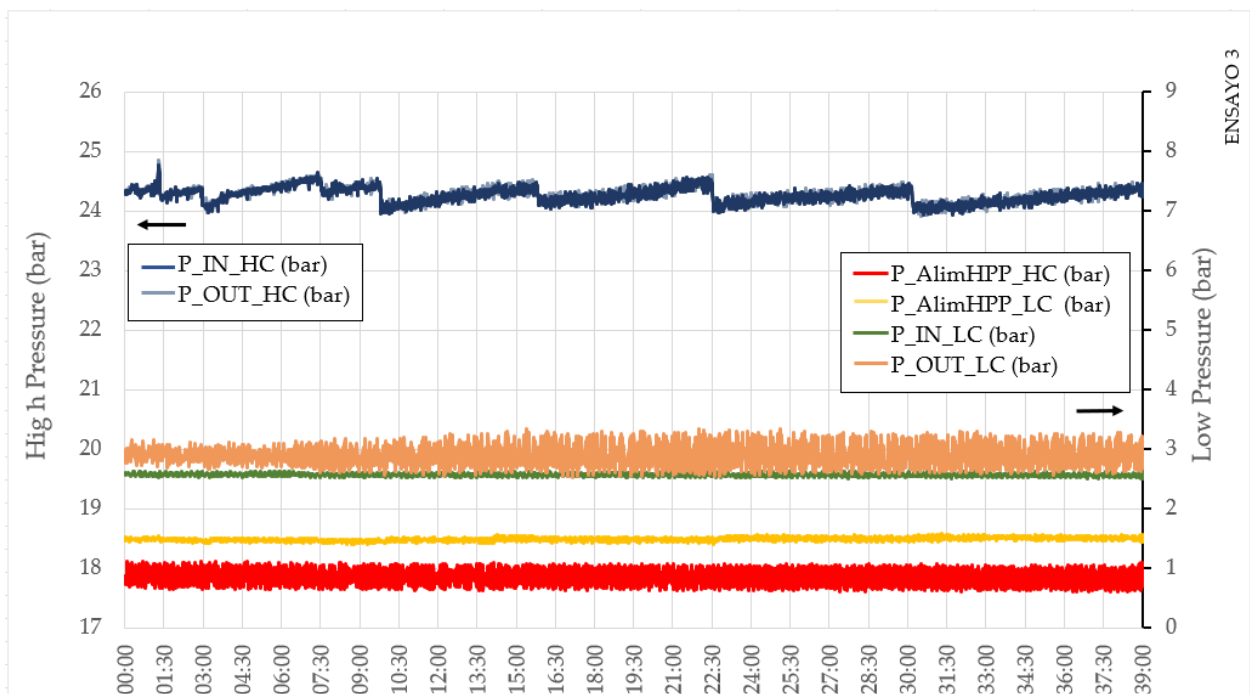


Figura 43. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 3 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

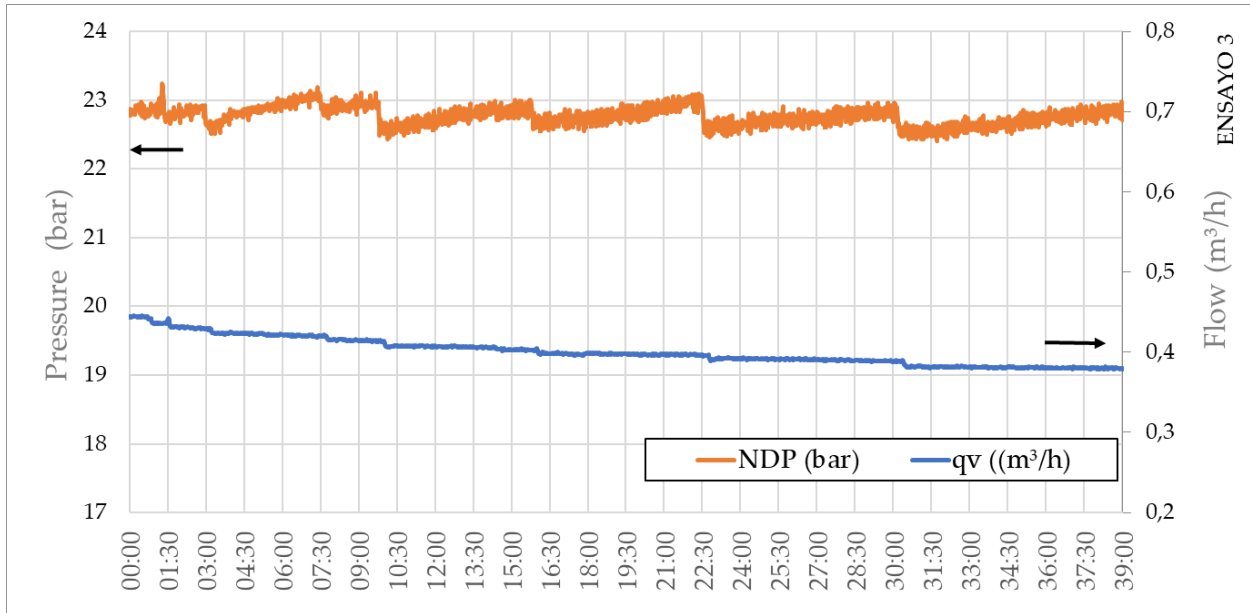


Figura 44. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 3. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

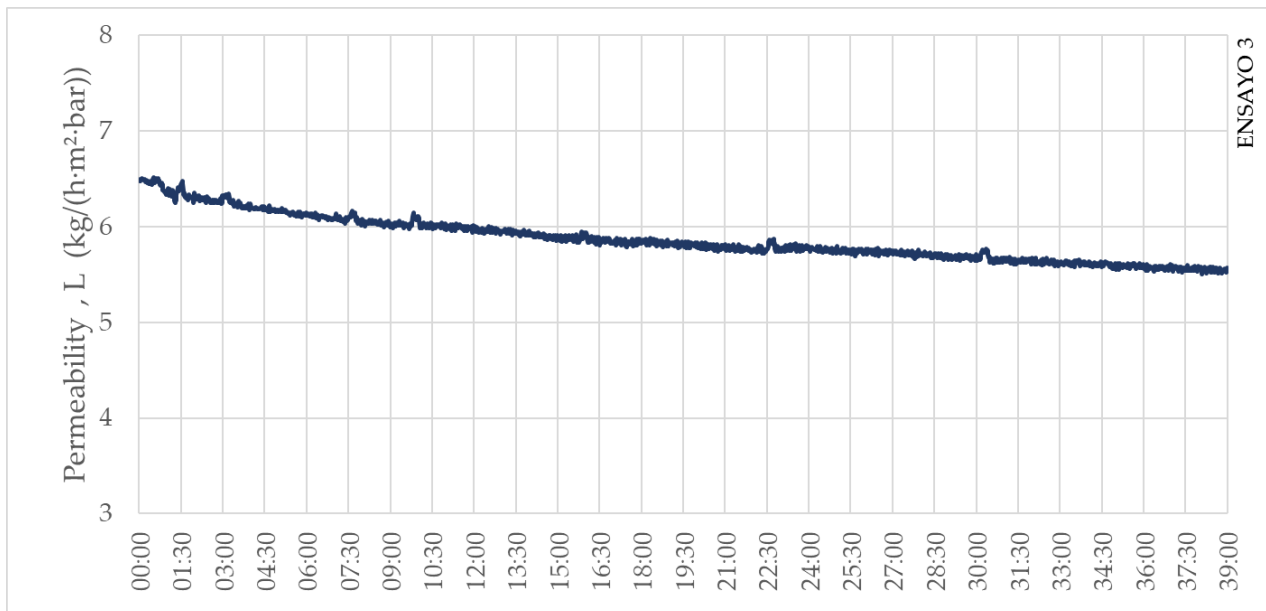


Figura 45. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 3. El valor promedio de la permeabilidad es 5,6.

4.1.4 Ensayo 4

Fecha	Duración
11-01-2023	37:30 minutos

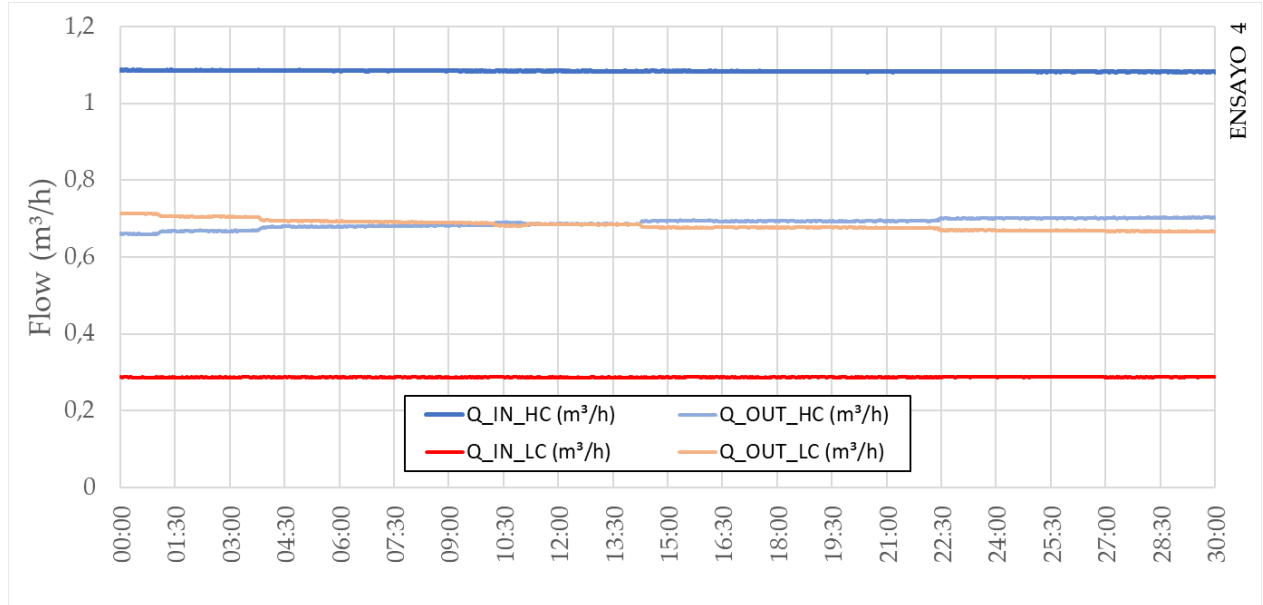


Figura 46. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 4. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

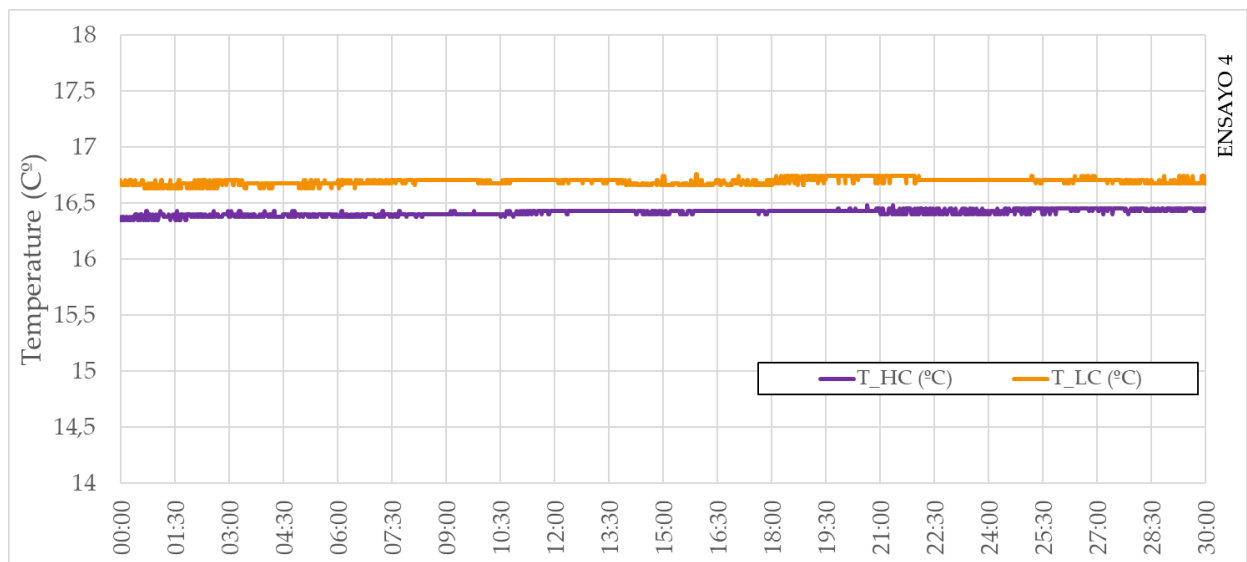


Figura 47. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

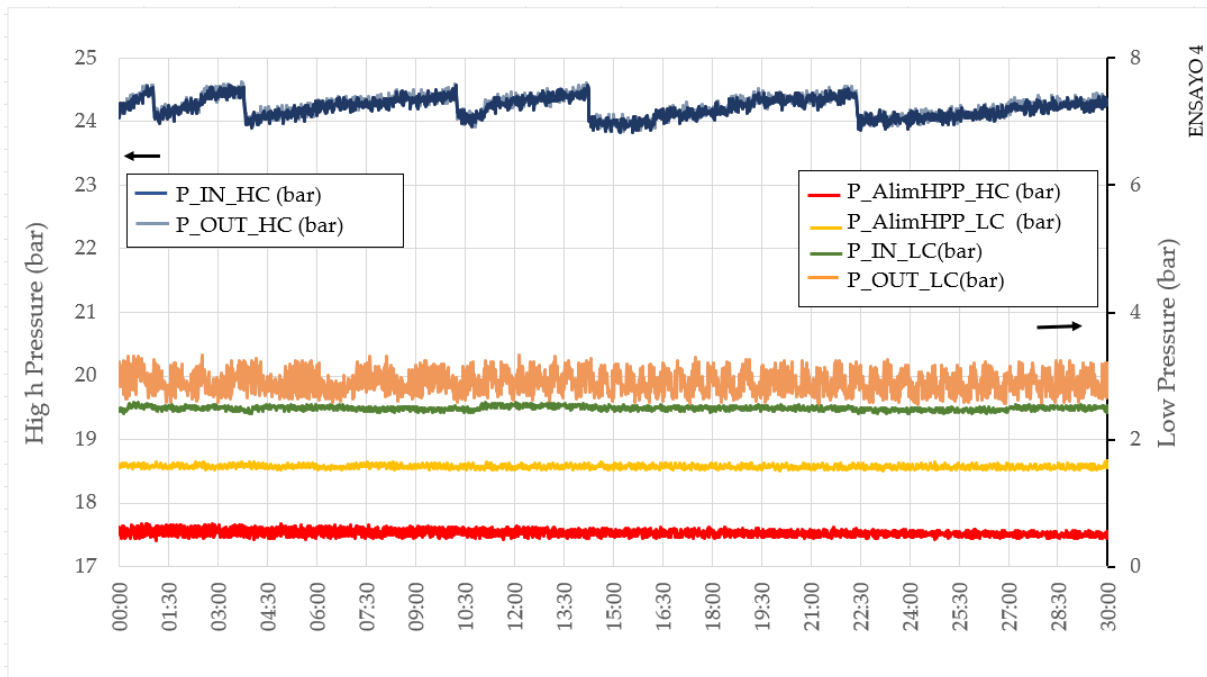


Figura 48. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 4 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

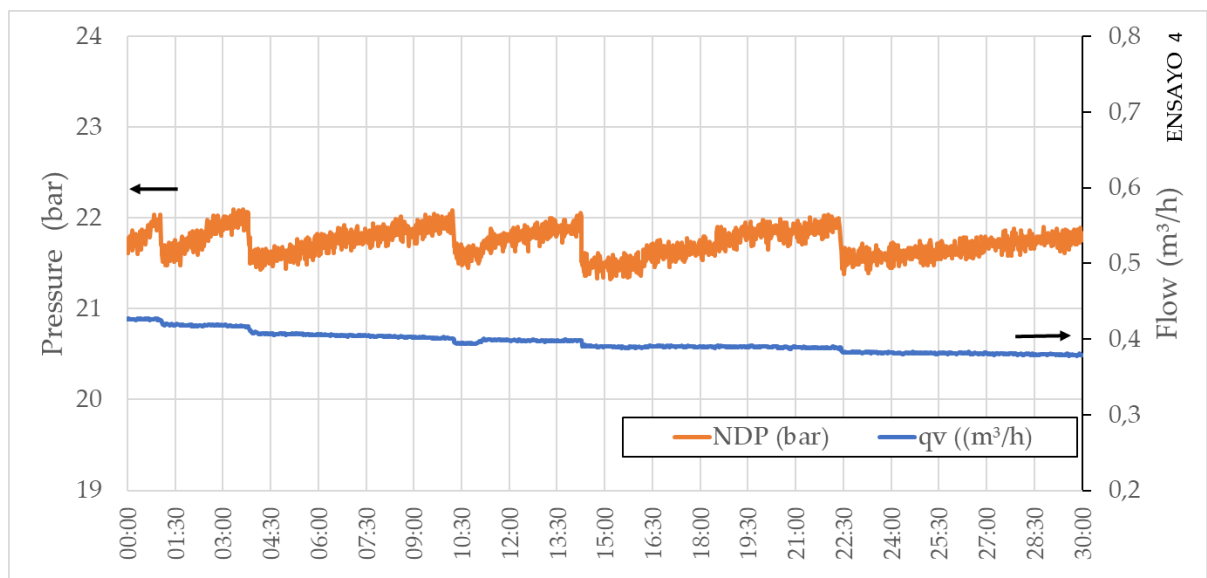


Figura 49. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 4. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

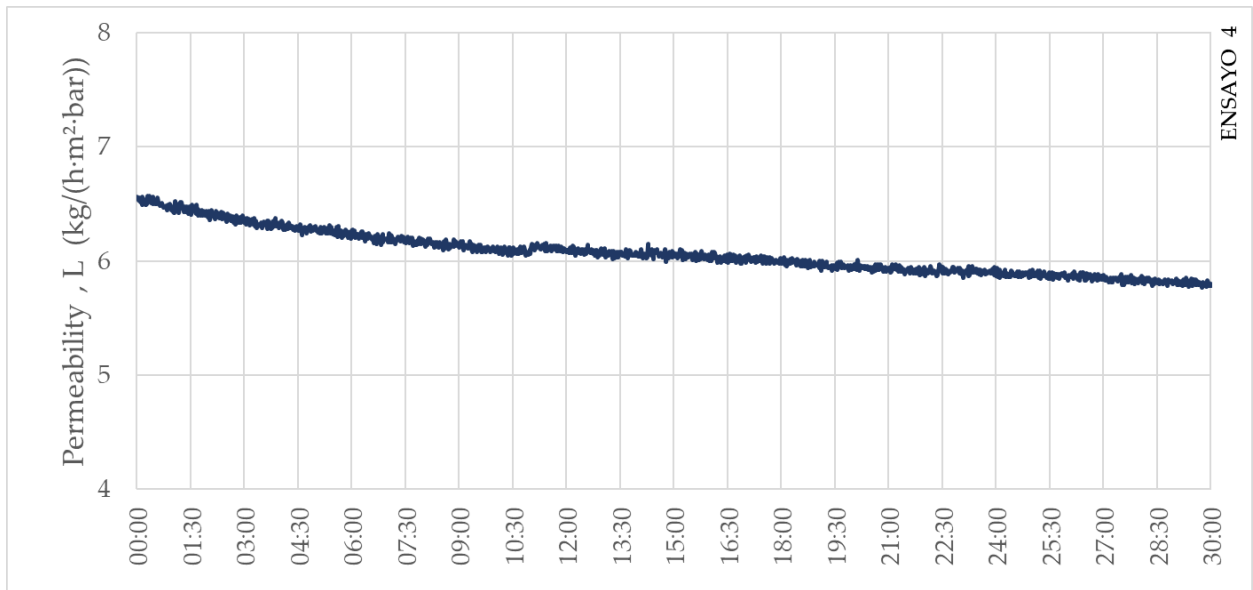


Figura 50. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 4. El valor promedio de la permeabilidad es 5,9.

4.1.5 Ensayo 5

Fecha	Duración
11-11-2022	30 minutos

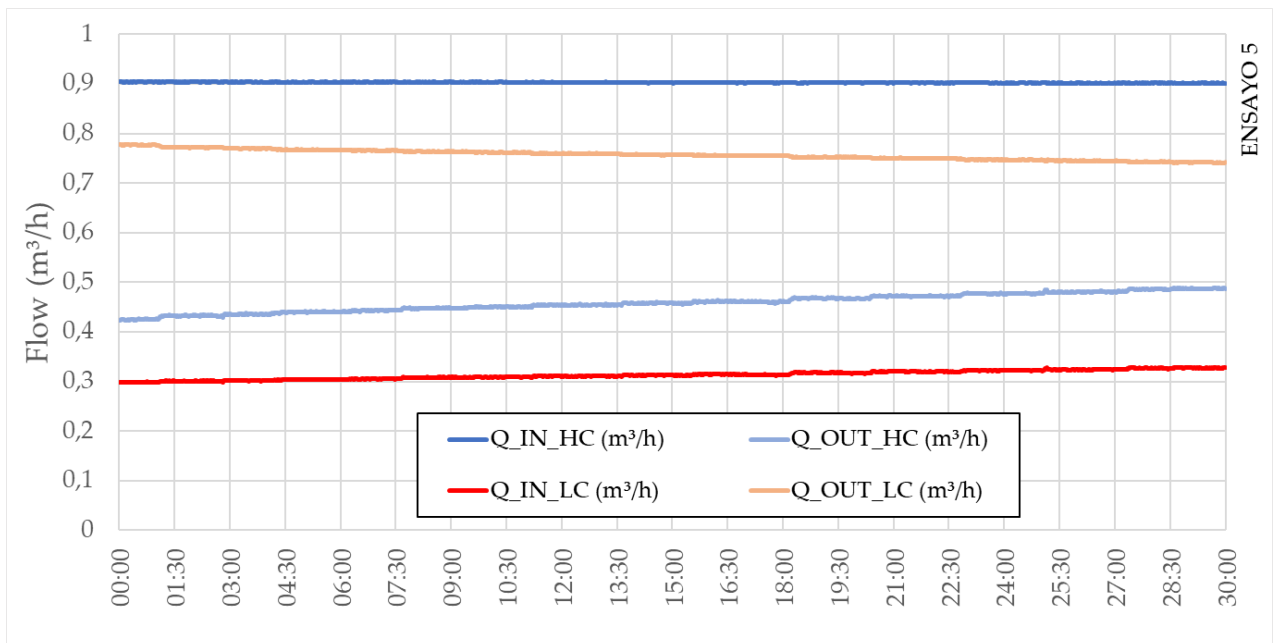


Figura 51. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 5. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

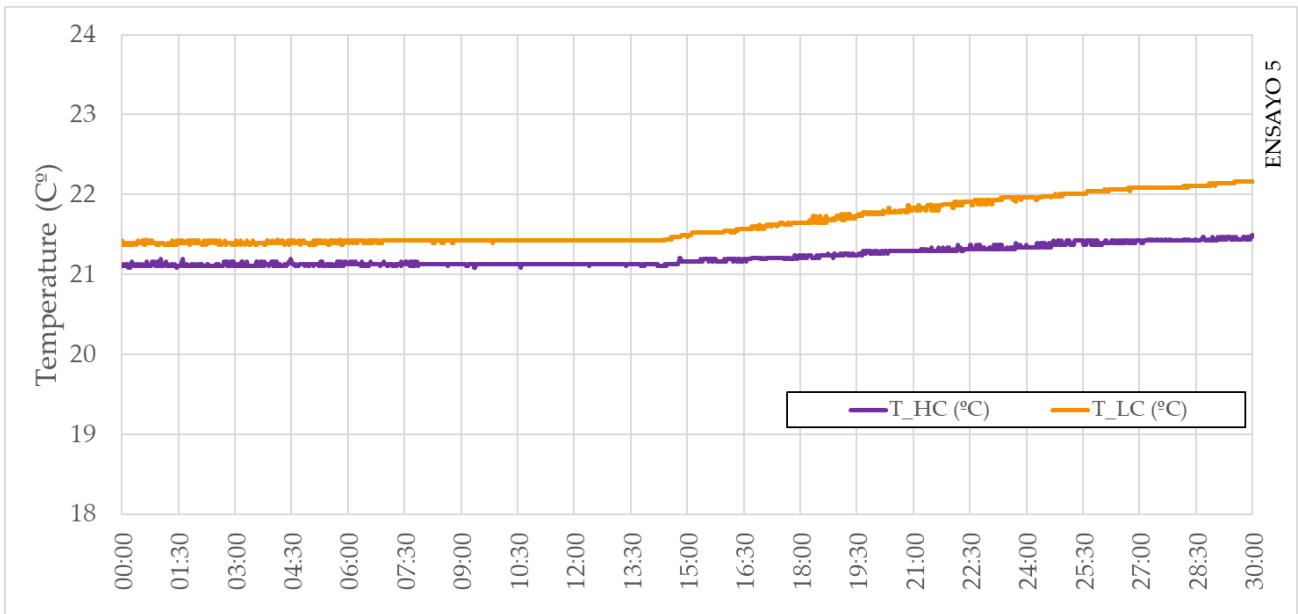


Figura 52. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

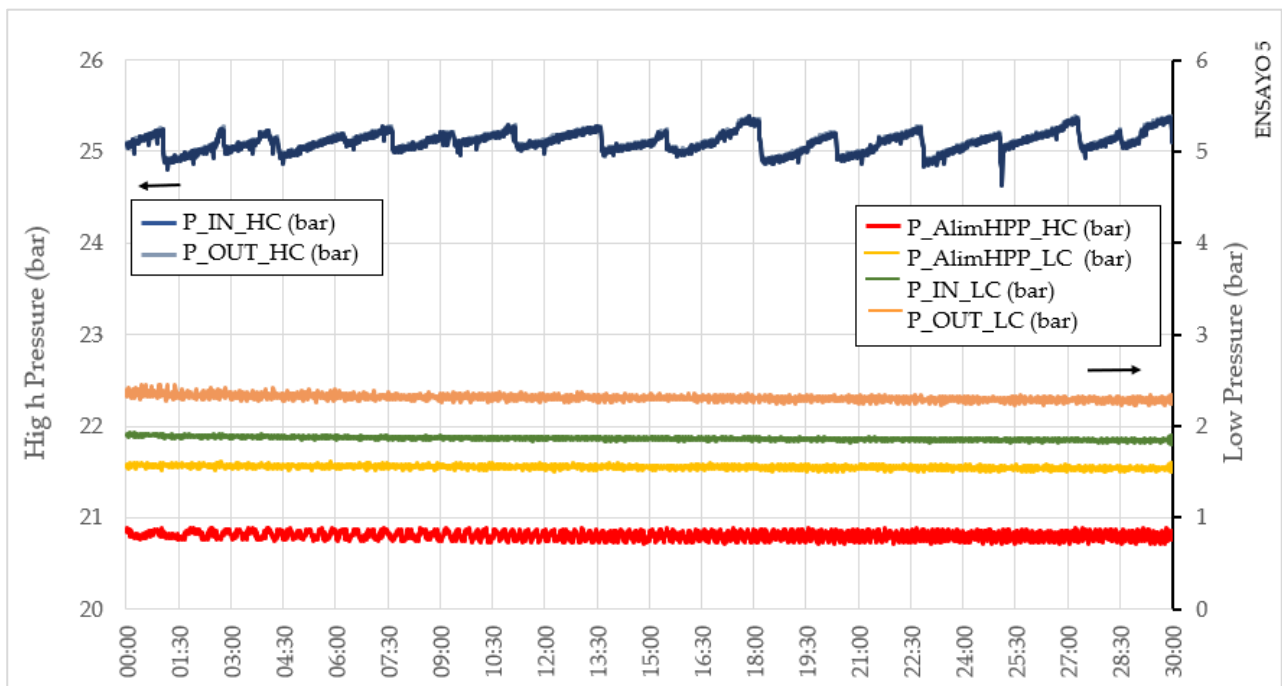


Figura 53. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 5 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

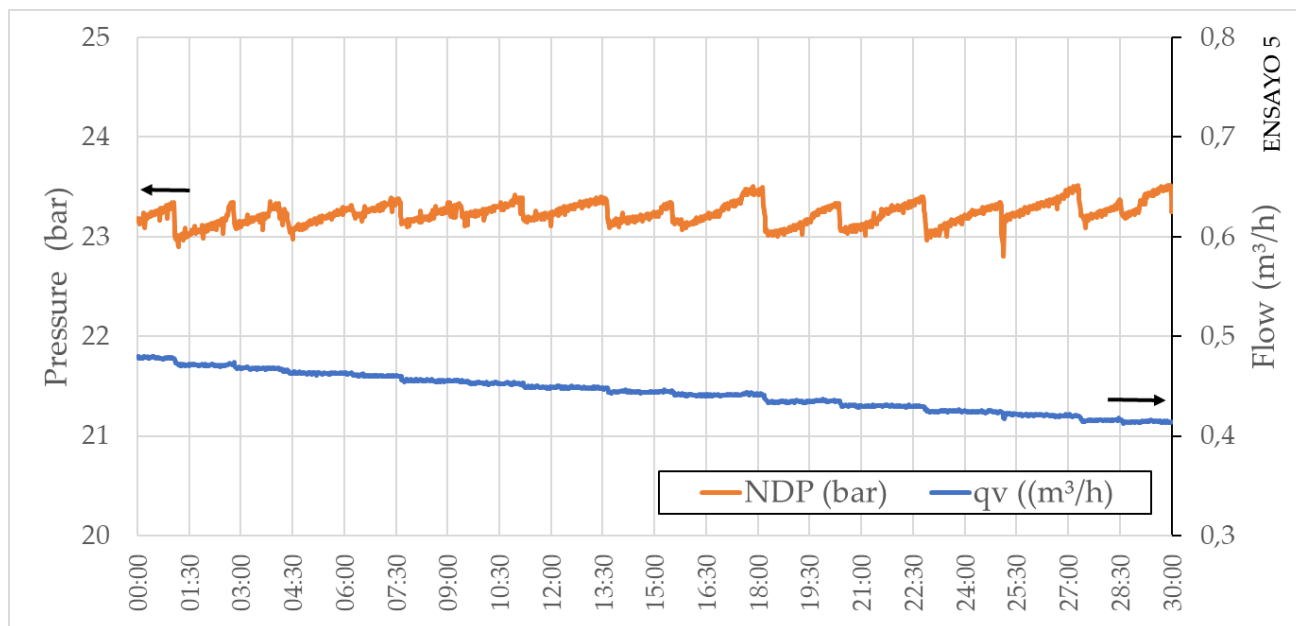


Figura 54. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 5. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

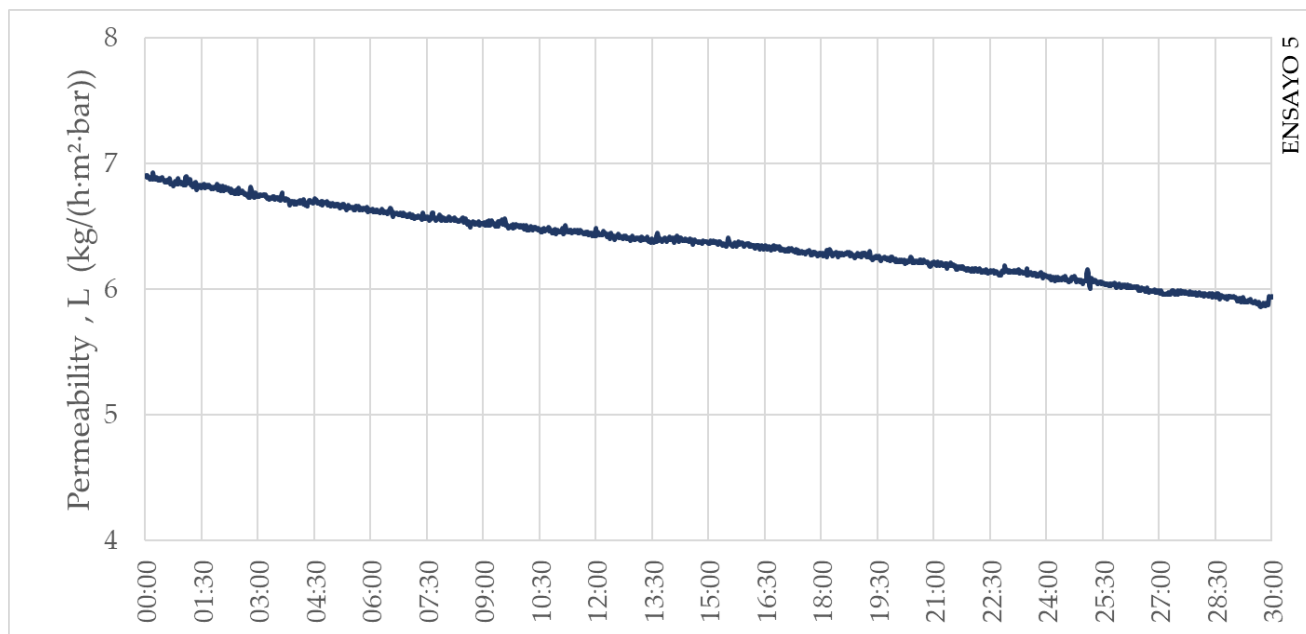


Figura 55. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 5. El valor promedio de la permeabilidad es 6,1.

4.1.6 Ensayo 6

Fecha	Duración
11-11-2022	28:30 minutos

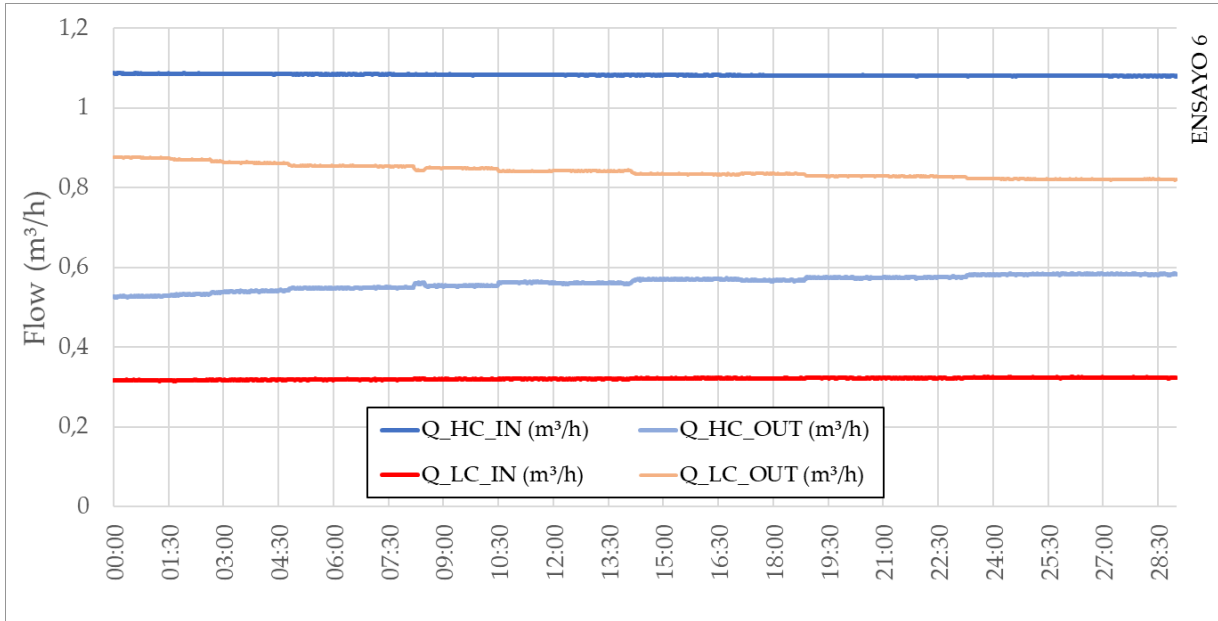


Figura 56. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 6. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

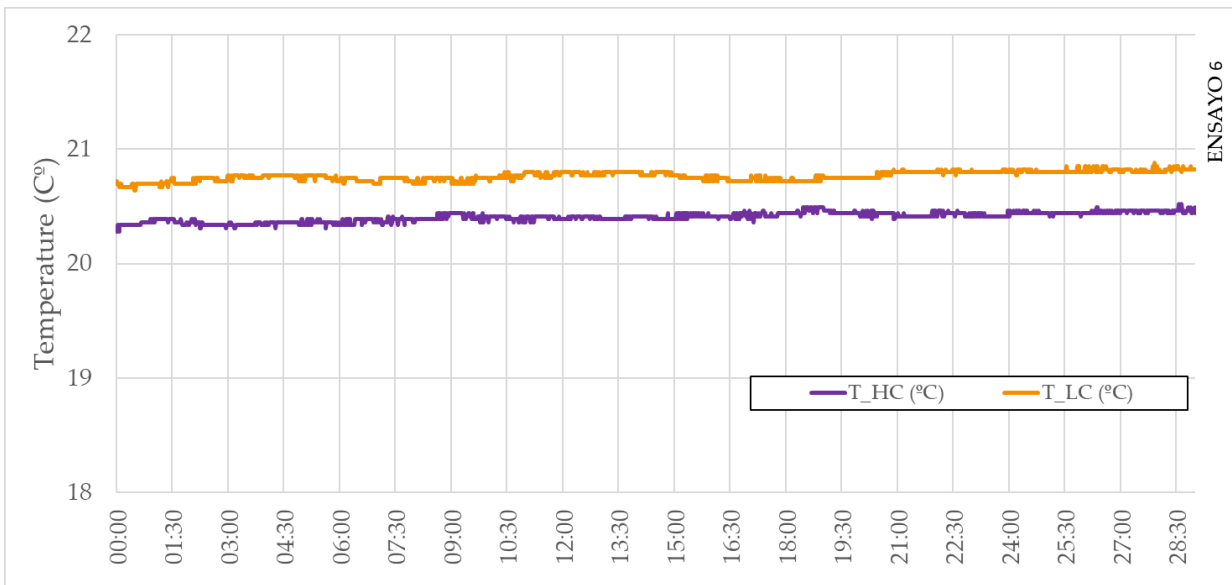


Figura 57. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

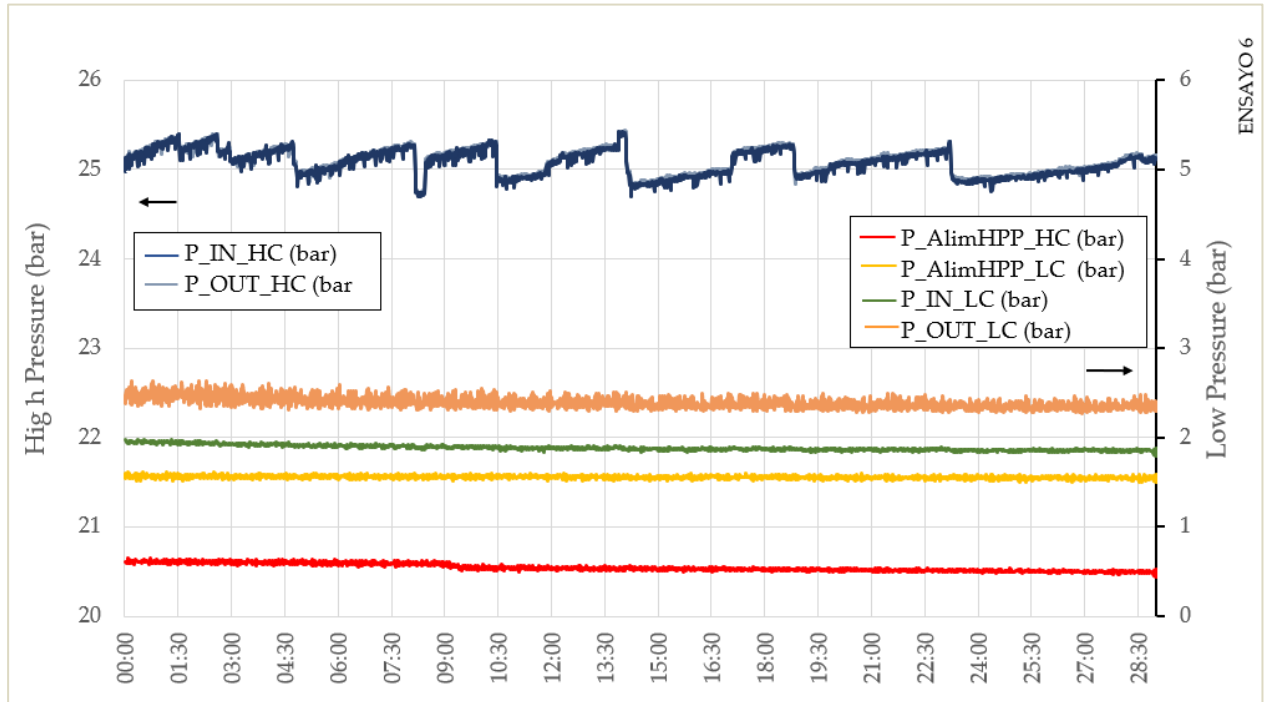


Figura 58. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 6 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

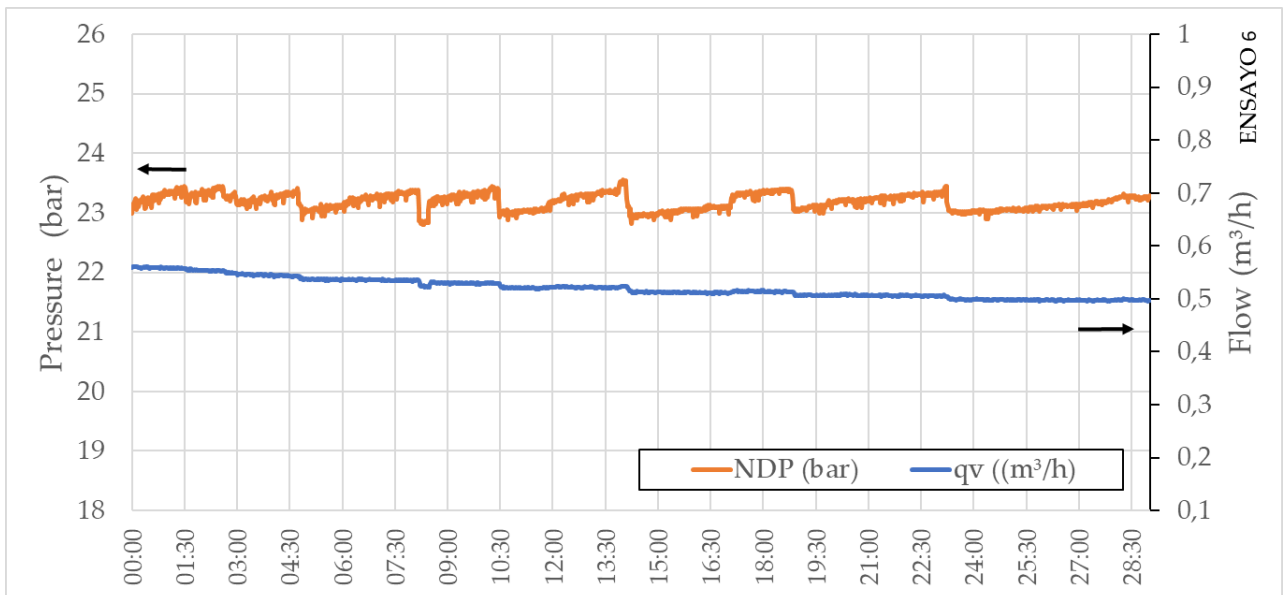


Figura 59. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 6. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

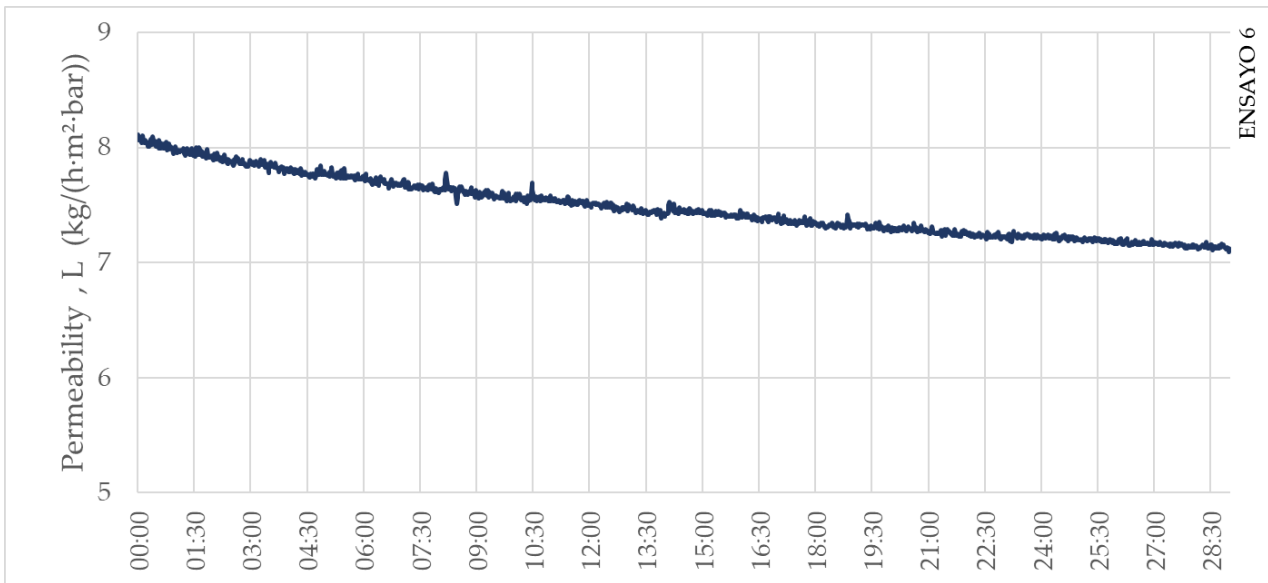


Figura 60. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 6. El valor promedio de la permeabilidad es 7,2.

4.1.7 Ensayo 7

Fecha	Duración
12-01-2023	34:30 minutos

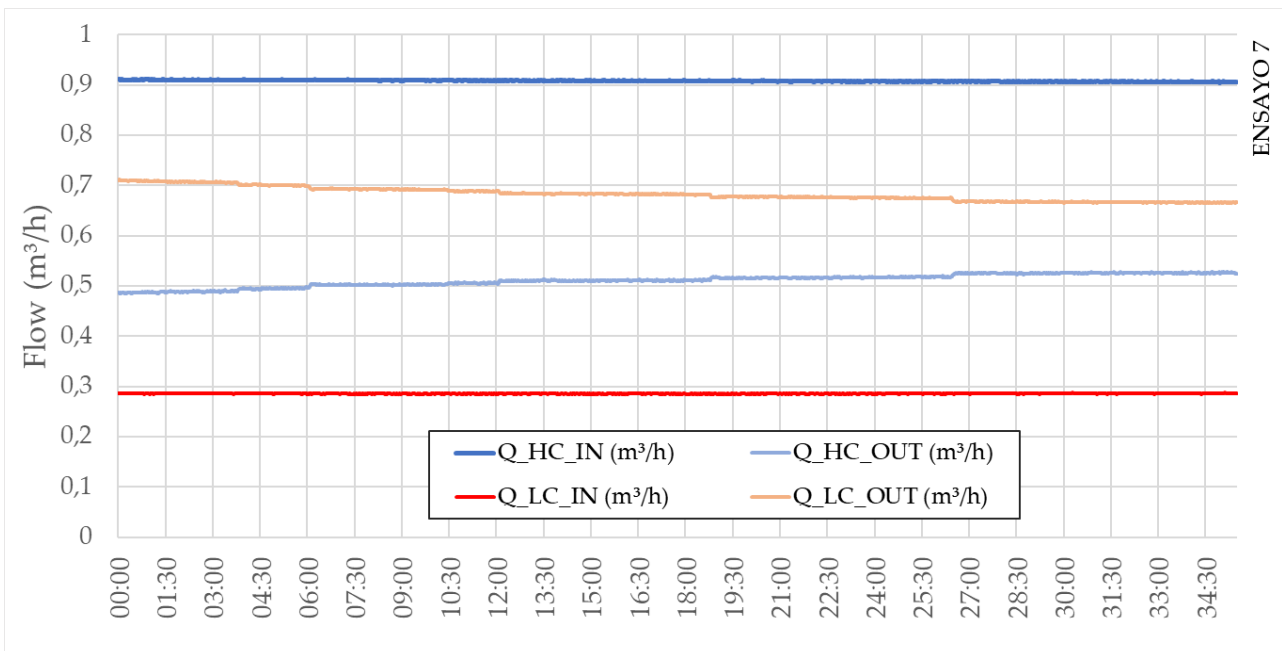


Figura 61. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 7. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

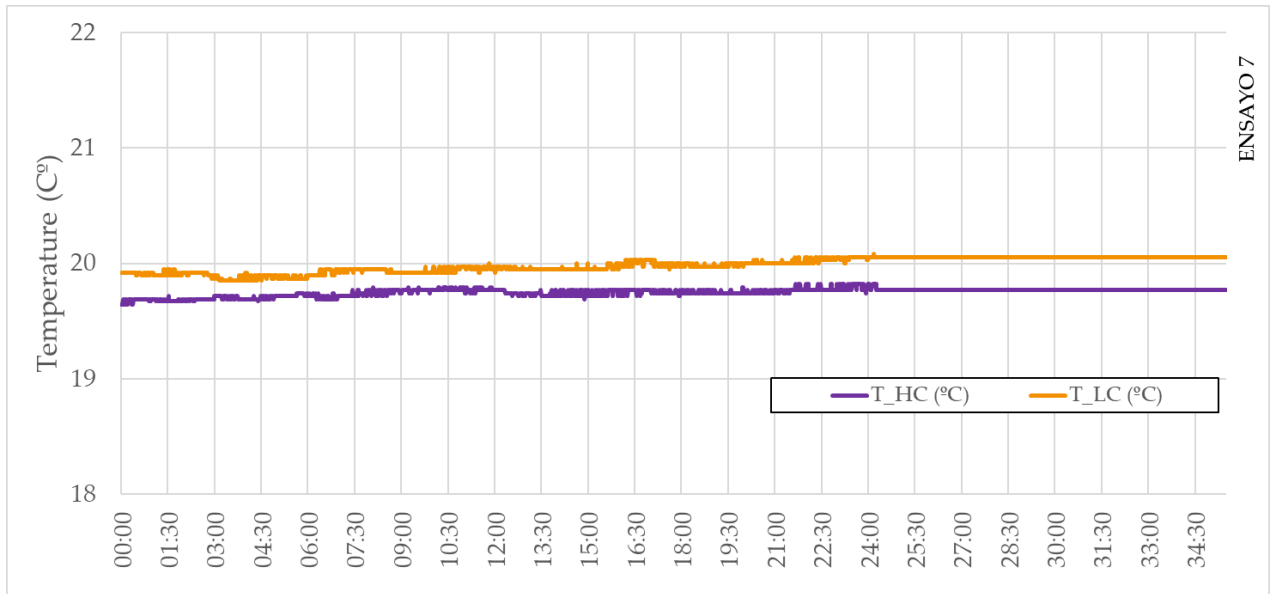


Figura 62. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

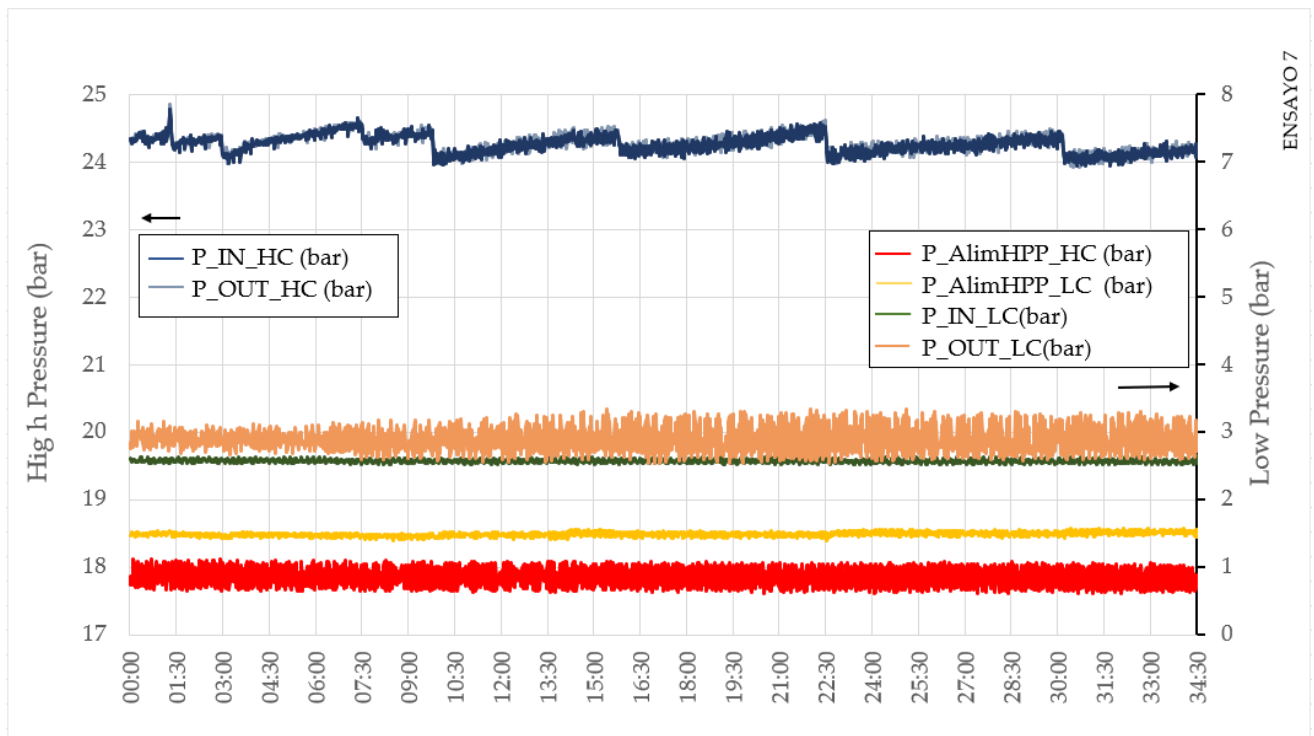


Figura 63. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 7 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

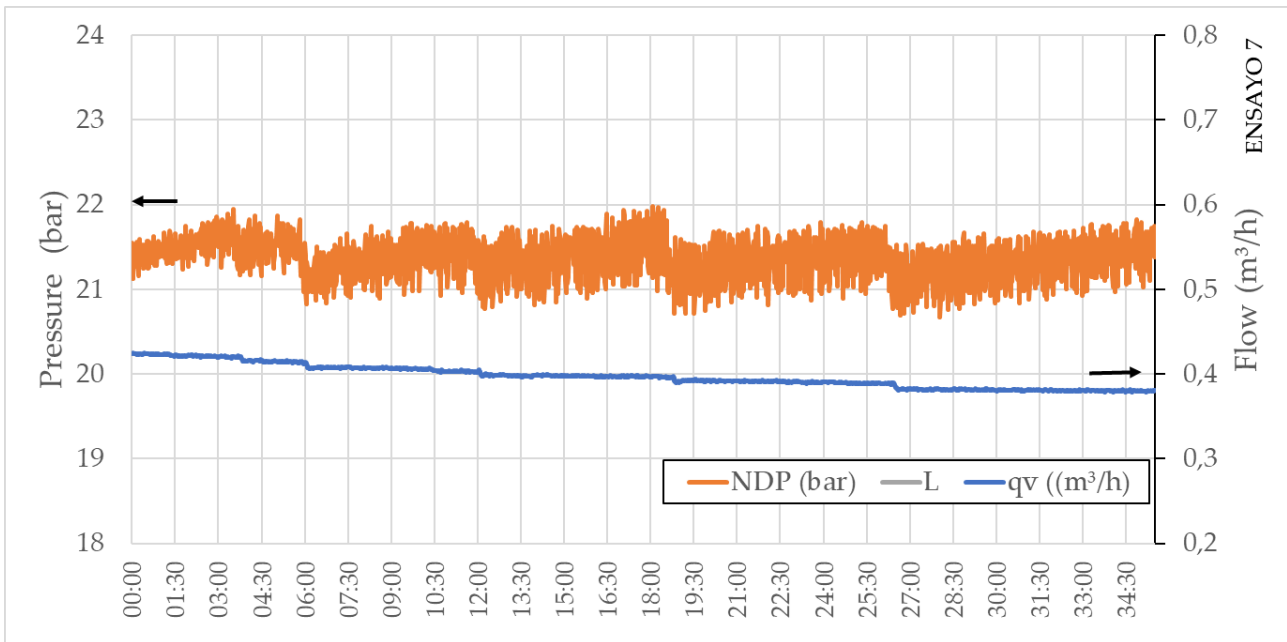


Figura 64. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 7. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

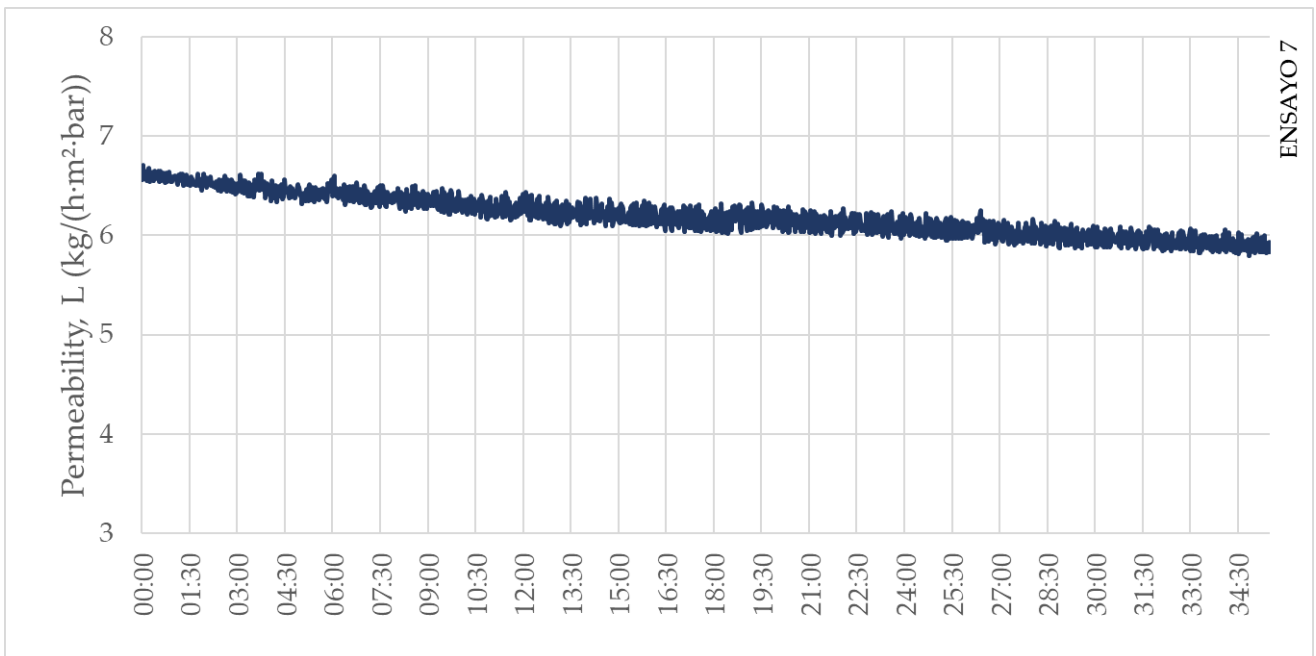


Figura 65. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 7. El valor promedio de la permeabilidad es 6.

4.1.8 Ensayo 8

Fecha	Duración
12-01-2023	37:30 minutos

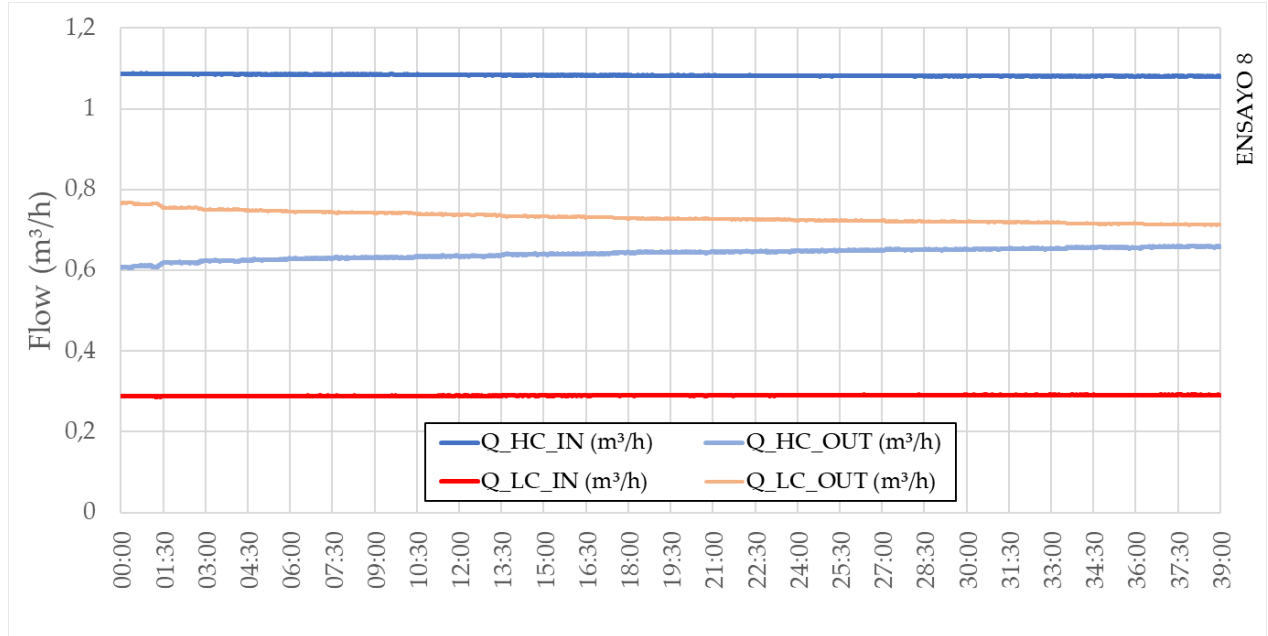


Figura 66. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 8. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

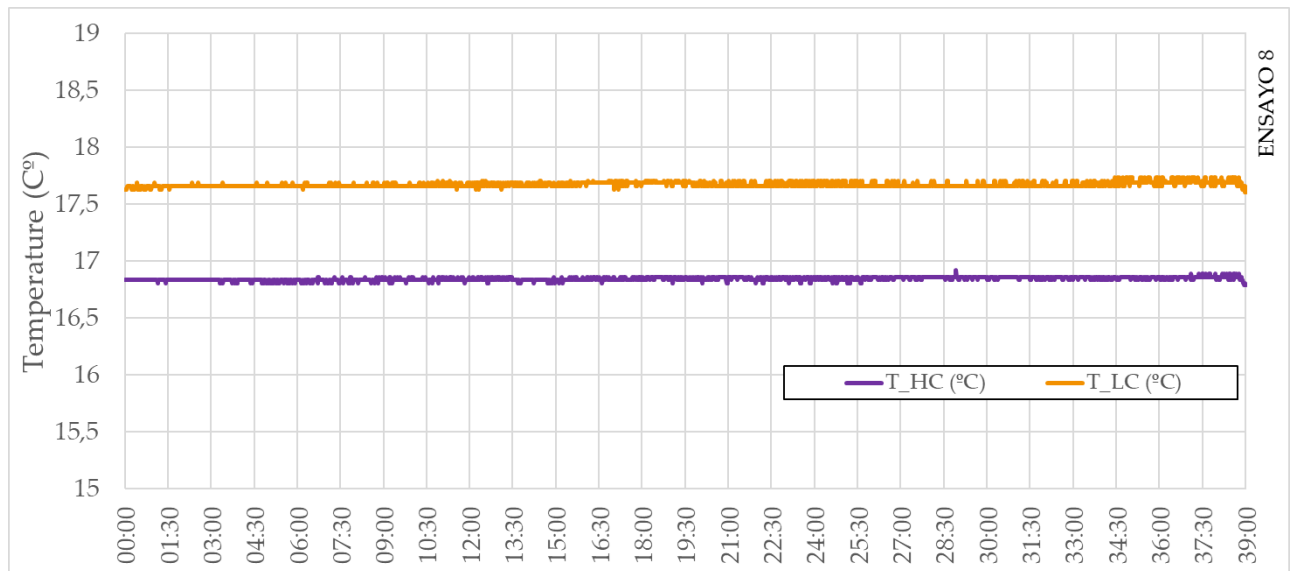


Figura 67. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

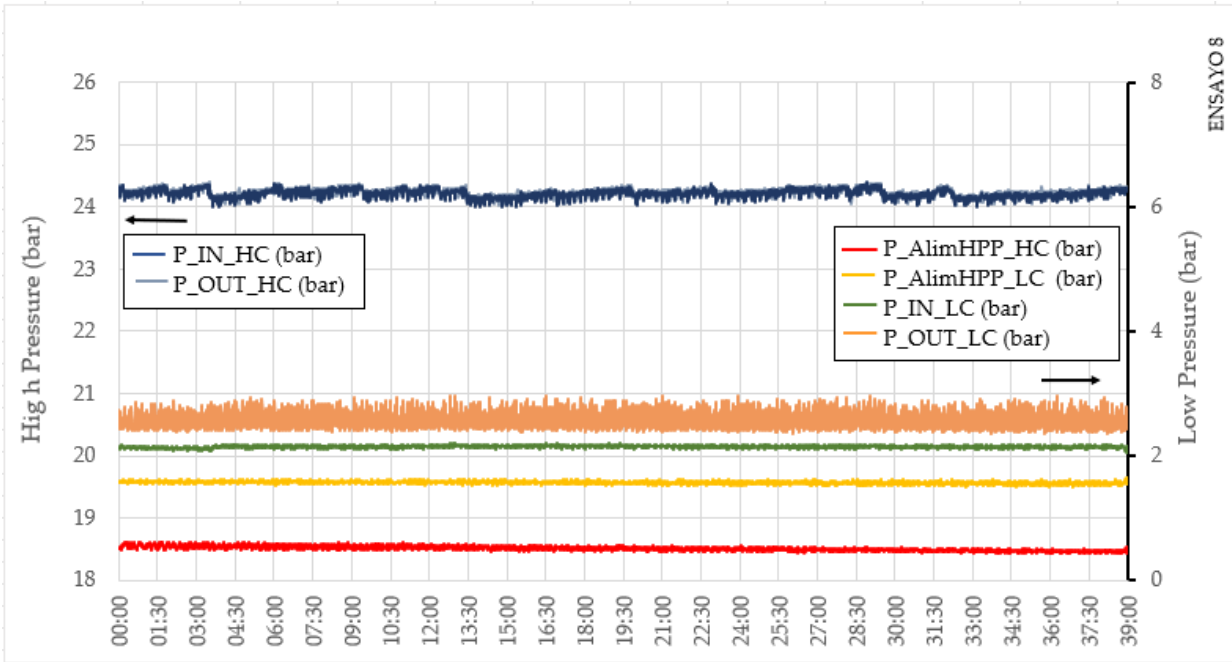


Figura 68. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 8 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

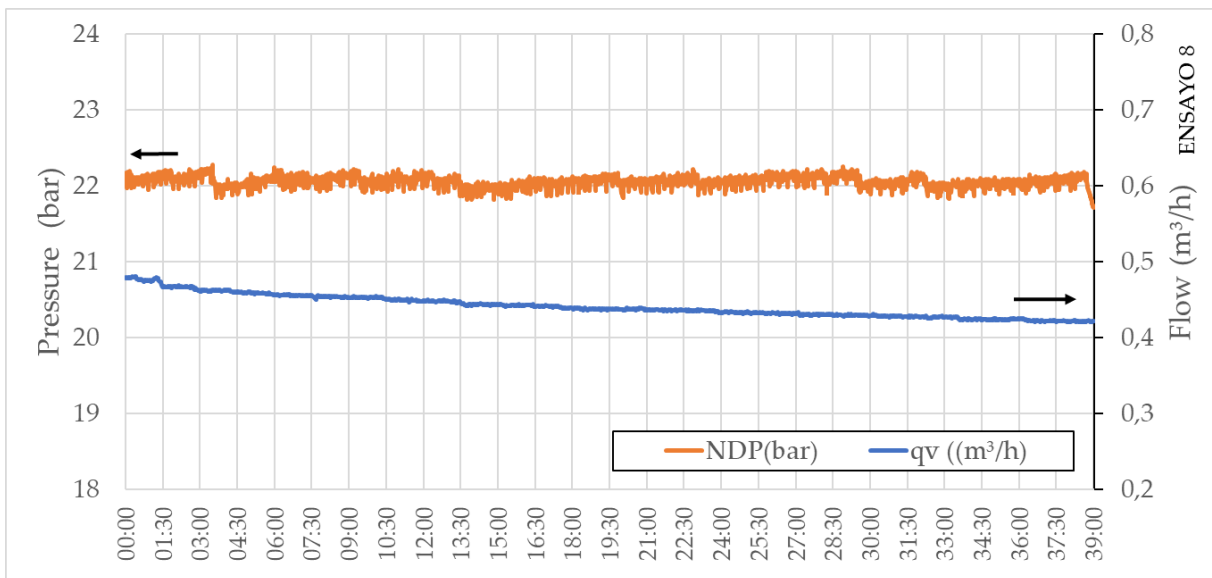


Figura 69. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 8. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv .

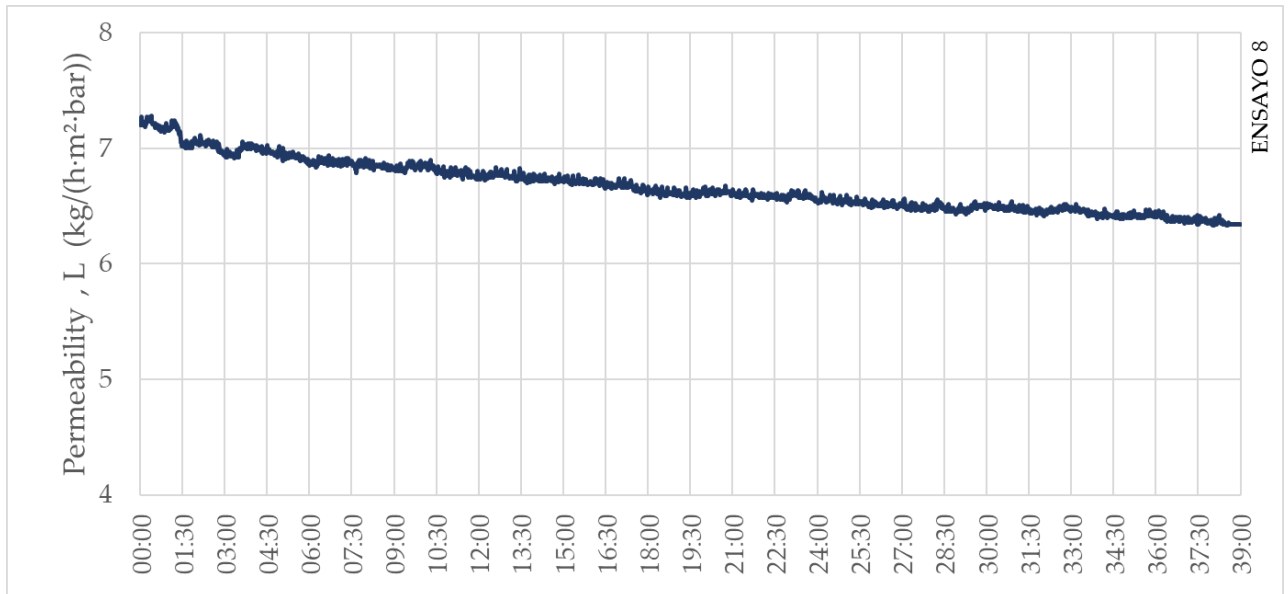


Figura 70. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 8. El valor promedio de la permeabilidad es 6,4.

4.1.9 Ensayo 9

Fecha	Duración
14-02-2023	39 minutos

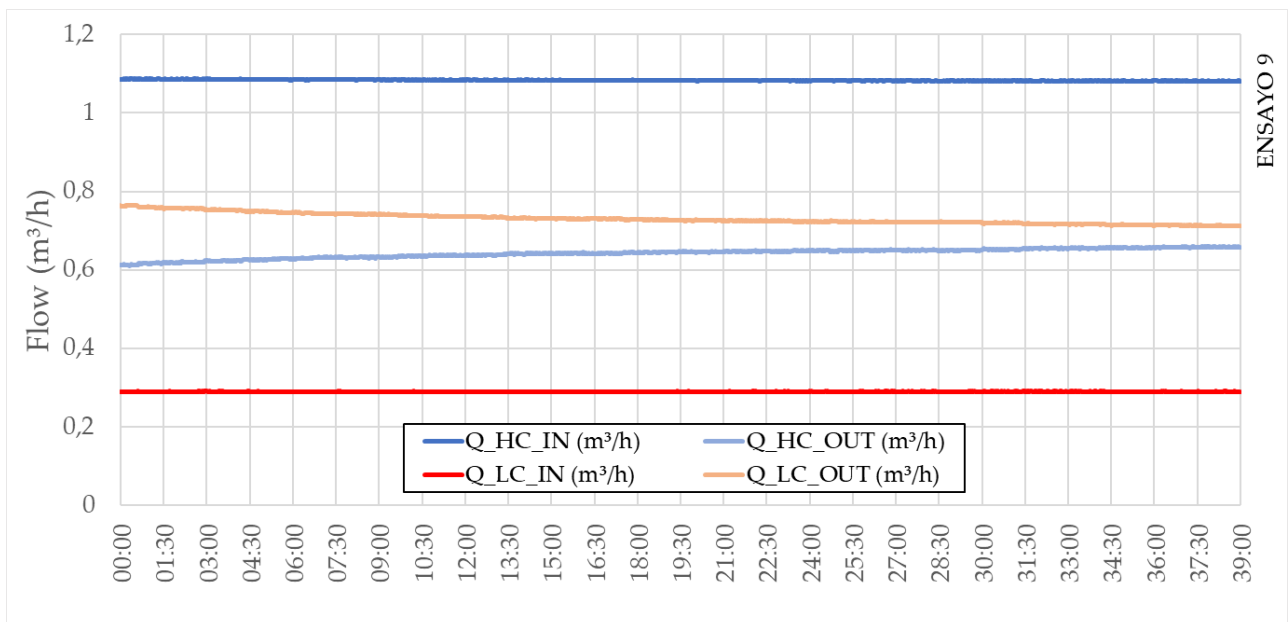


Figura 71. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 9. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

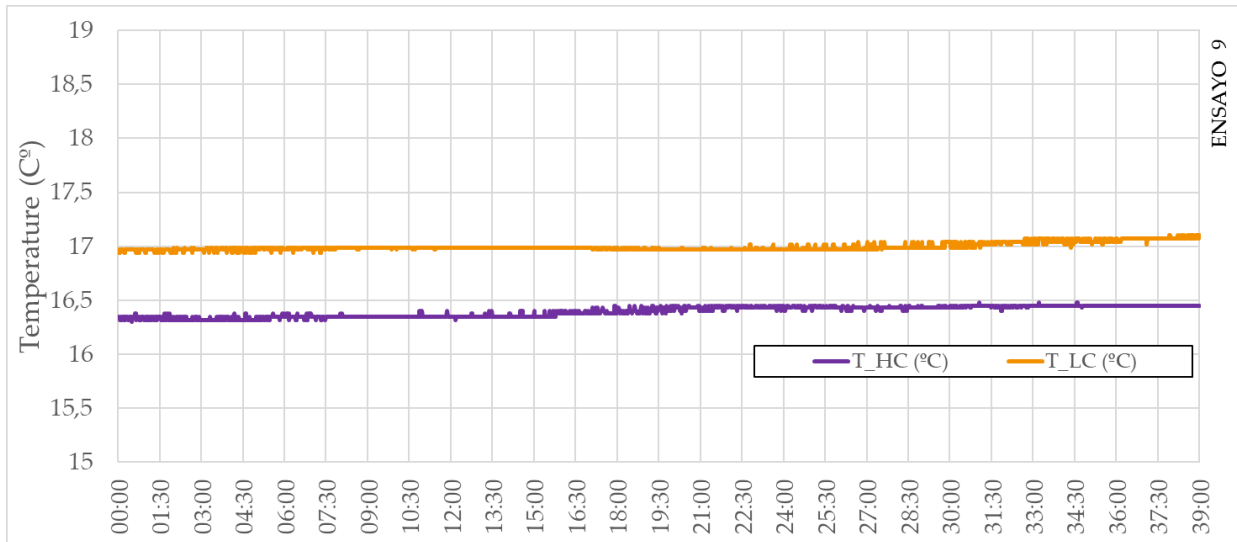


Figura 72. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 9 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

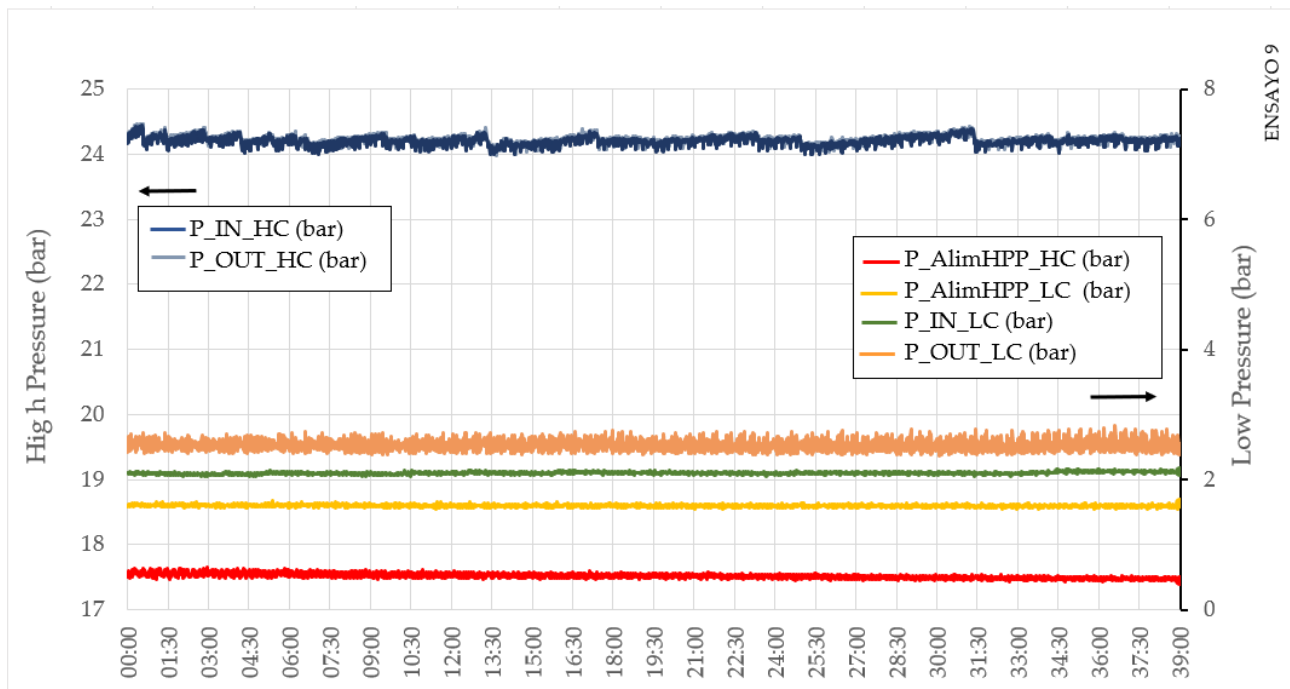


Figura 73. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 9. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

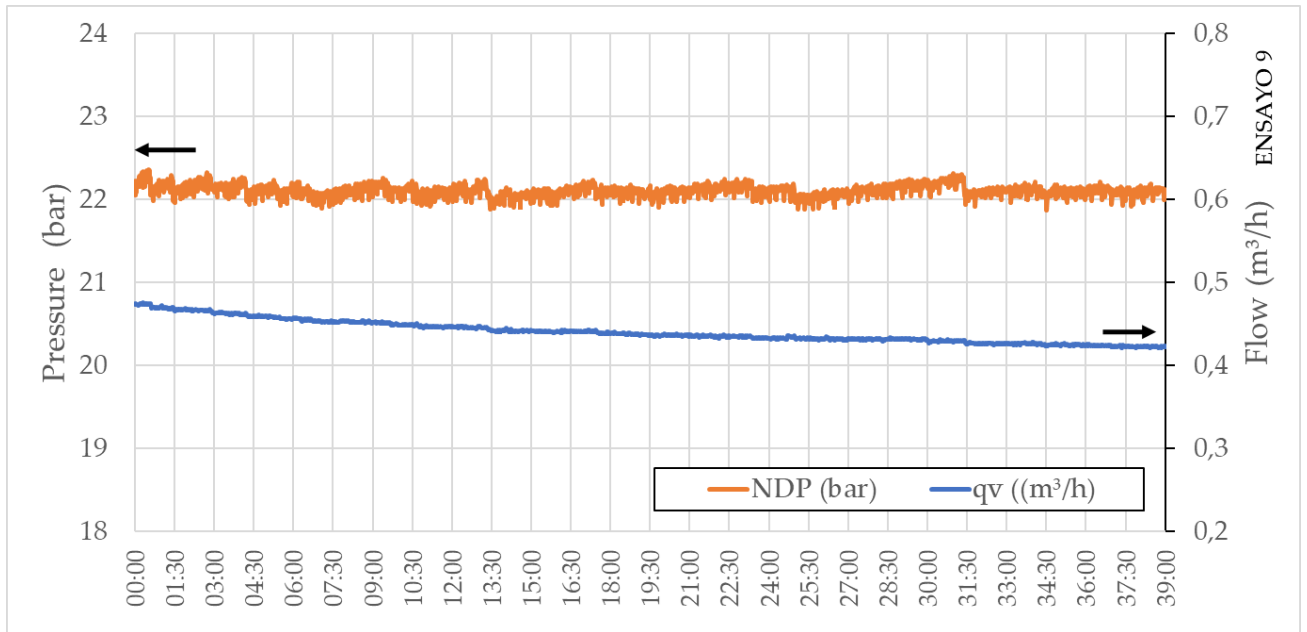


Figura 74. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 9. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, q_v .

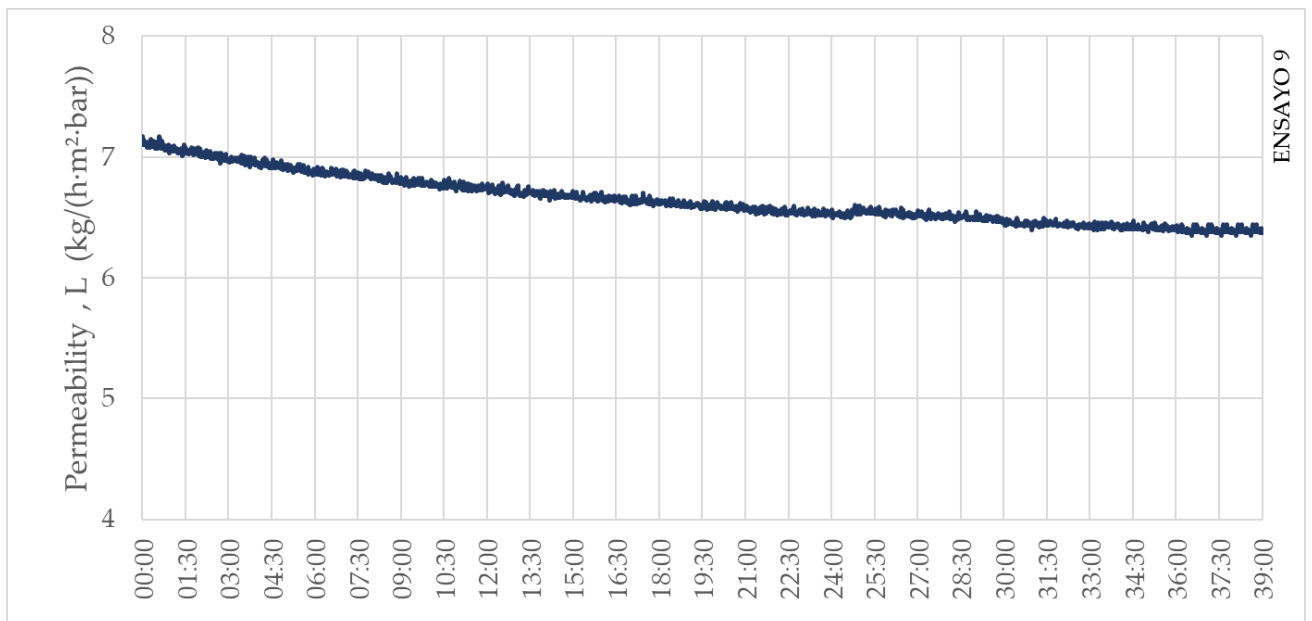


Figura 75. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 9. El valor promedio de la permeabilidad es 6,4.

4.1.10 Ensayo 10

Fecha	Duración
14-02-2023	39 minutos

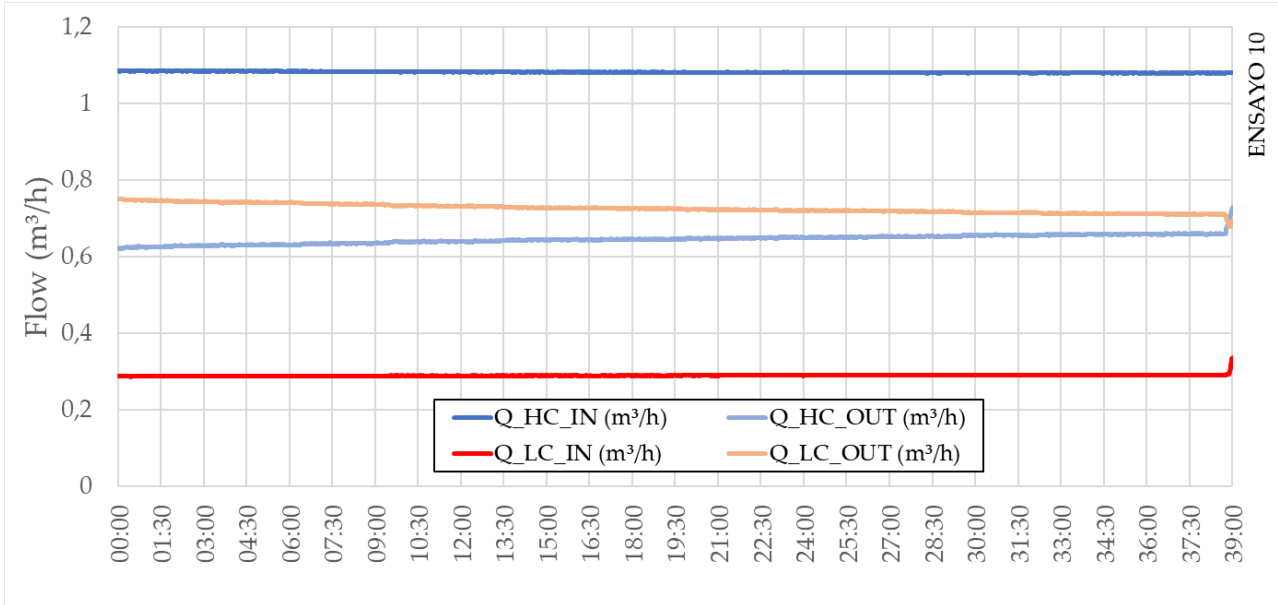


Figura 76. Evolución del caudal a lo largo del ensayo 10. La corriente de alta presión a la entrada y salida medida como Q_{HC_IN} y Q_{HC_OUT} (Calculada). La corriente de baja presión a la entrada y salida medida como Q_{LC_IN} y Q_{LC_OUT} .

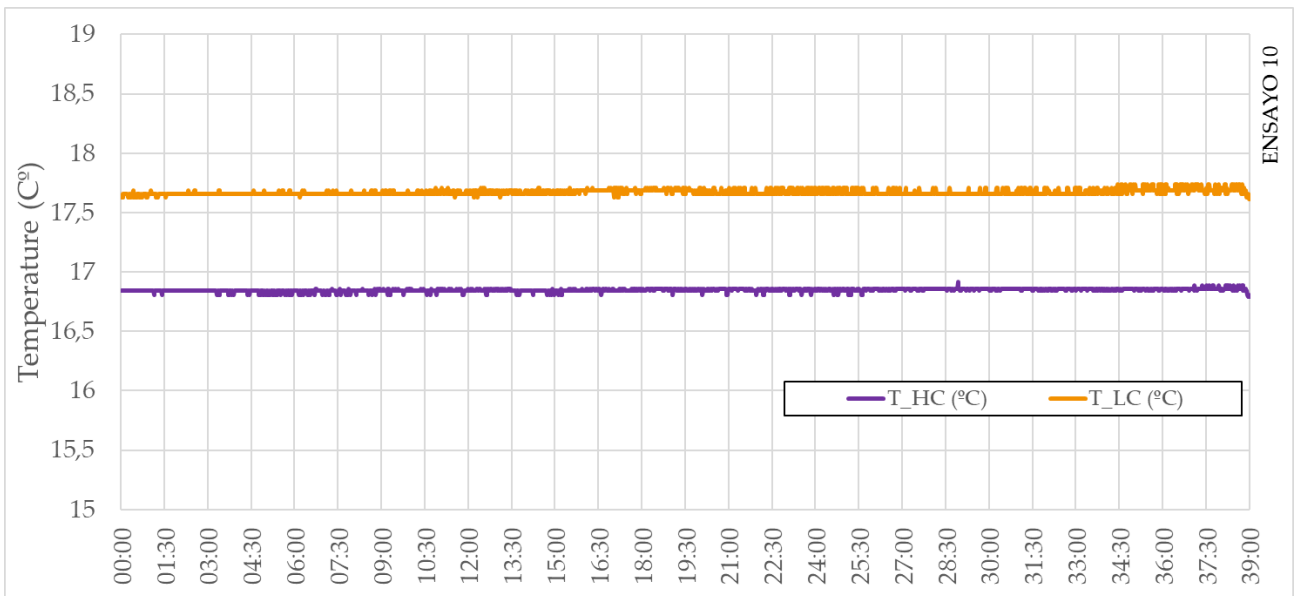


Figura 77. Evolución de la temperatura a lo largo del ensayo 10 en los siguientes puntos. Para la corriente de alta presión; T_{HC} , temperatura de salida de dicha corriente. Para la corriente de baja presión; T_{LC} , temperatura de salida de dicha corriente.

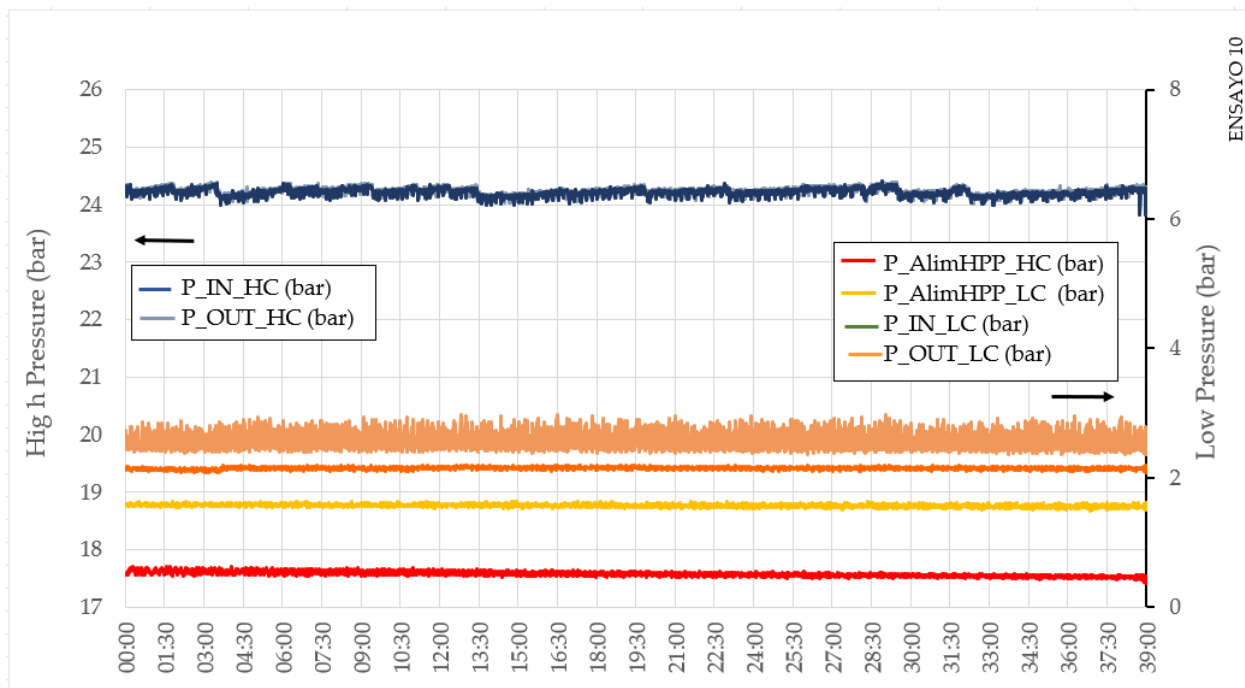


Figura 78. Evolución de la presión a lo largo del ensayo 10. Para la corriente de alta presión; $P_{AlímHPP_HC}$, alimentación de la bomba HPP. P_{IN_HC} y P_{OUT_HC} , entrada y salida de la membrana respectivamente. Para la corriente de baja presión; $P_{AlímHPP_LC}$, alimentación de la bomba LPP. P_{IN_LC} y P_{OUT_LC} , entrada y salida de la membrana respectivamente.

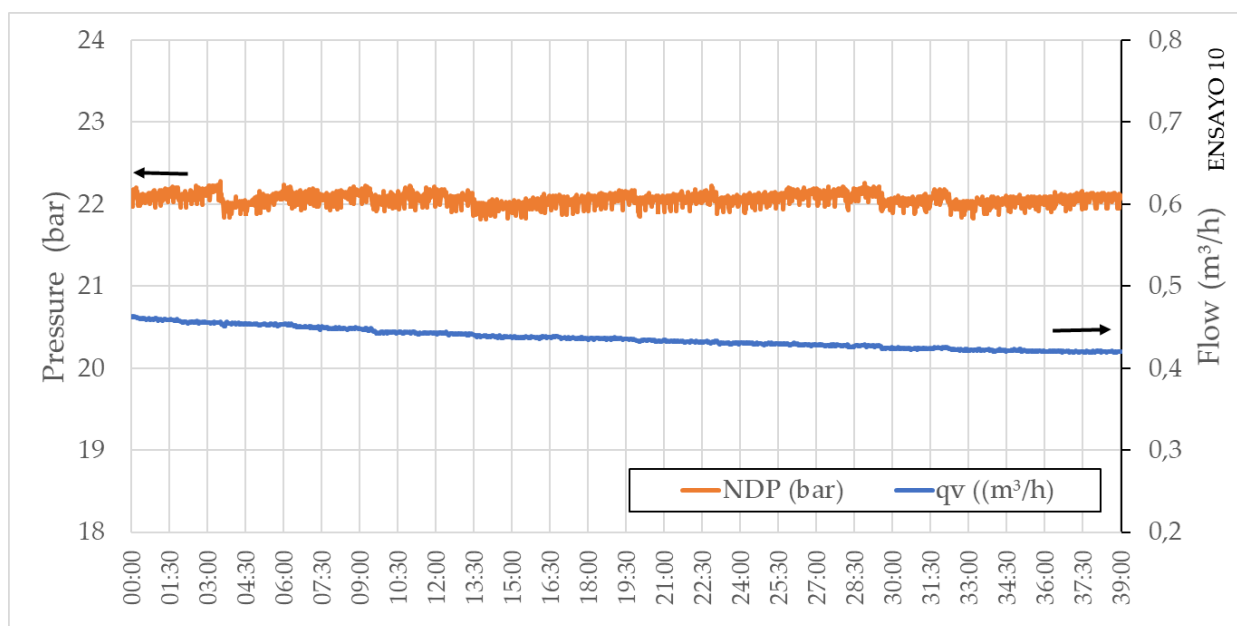


Figura 79. Evolución de la diferencia de presiones frente al caudal transferido a lo largo del ensayo 10. Para la fuerza motriz del proceso, NDP y para el caudal transferido, qv .

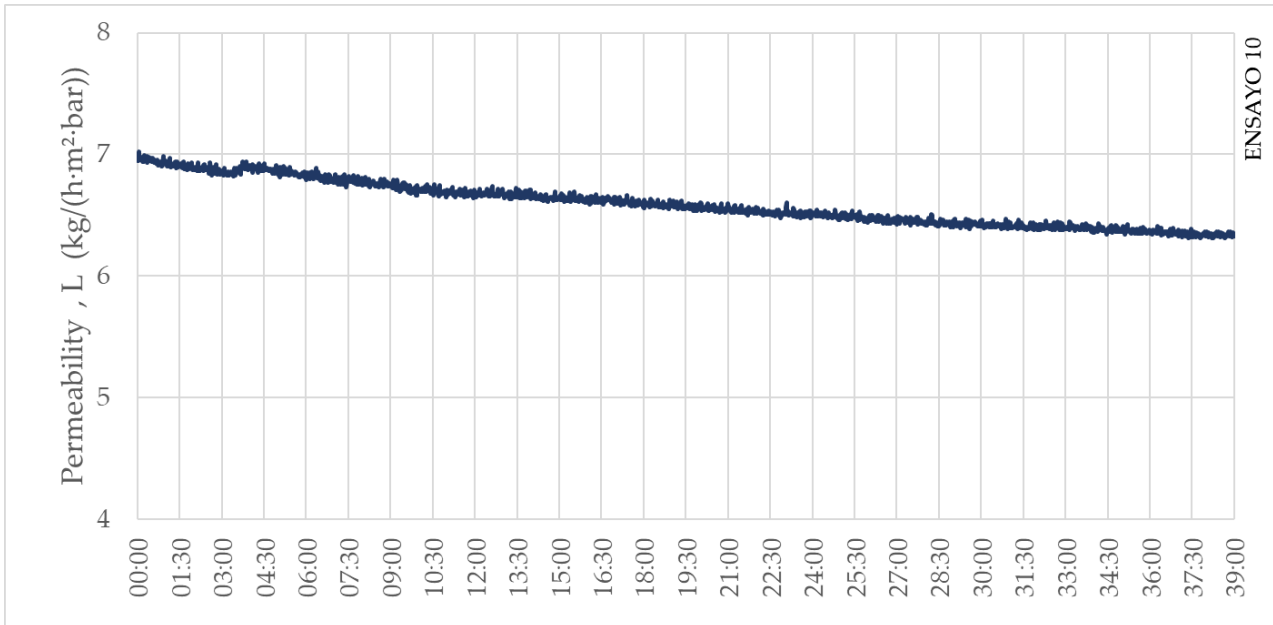


Figura 80. Evolución de la permeabilidad a lo largo del ensayo 10. El valor promedio de la permeabilidad es 6,4.

4.2 Análisis de resultados

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos en los diferentes ensayos mediante una tabla en la que se recoge la media de los diferentes valores de temperatura, diferencia de presiones, caudal transferido y permeabilidad en los últimos 10 minutos de cada ensayo, en los cuales estos se comienzan a estabilizar.

Como se muestra en el apartado de campaña experimental el valor de L_w se podía obtener a través de la ecuación del caudal transferido utilizando los datos de los sensores de la instalación para determinar la fuerza motriz del proceso y conocer el caudal transferido, quedando de la siguiente forma:

$$L_w = \frac{q_v}{f \cdot (P_{HC} - P_{LC})} \quad (5)$$

Además, como ya se dijo anteriormente se supone que el ensuciamiento es prácticamente nulo, $f=1$.

Para calcular el error se usará la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta L_w}{L_w} = \frac{\Delta q_v}{q_v} + \frac{\Delta(P_{HC} - P_{LC})}{(P_{HC} - P_{LC})} \quad (6)$$

A continuación, en la *Tabla 10* se puede ver un resumen de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.

ENSAYOS	T (°C)	Duración total del ensayo (mins)	$\overline{(P_{HC} - P_{LC})}$ (bar)	$\overline{q_v}$ (m ³ /h)	$\overline{L_w} \pm \Delta L_w$ (kg/(h·m ² ·bar))
Ensayo 1	20	34:30	21,3	0,38	6,0 ± 0,5
Ensayo 2	16,6	24:00	22,1	0,39	6,0 ± 0,3
Ensayo 3	16,3	39:00	22,7	0,38	5,6 ± 0,6
Ensayo 4	20	30:00	21,7	0,38	5,9 ± 0,4
Ensayo 5	21,5	30:00	23,2	0,42	6,1 ± 0,2
Ensayo 6	20,5	28:30	23,1	0,50	7,2 ± 1,3
Ensayo 7	20	34:30	21,3	0,38	6,0 ± 0,5
Ensayo 8	17,2	39:00	22,0	0,43	6,4 ± 0,2
Ensayo 9	17	39:00	22,1	0,43	6,4 ± 0,2
Ensayo 10	17,2	39:00	22,0	0,42	6,4 ± 0,2

Tabla 10. Comparativa de los resultados obtenidos en los ensayos

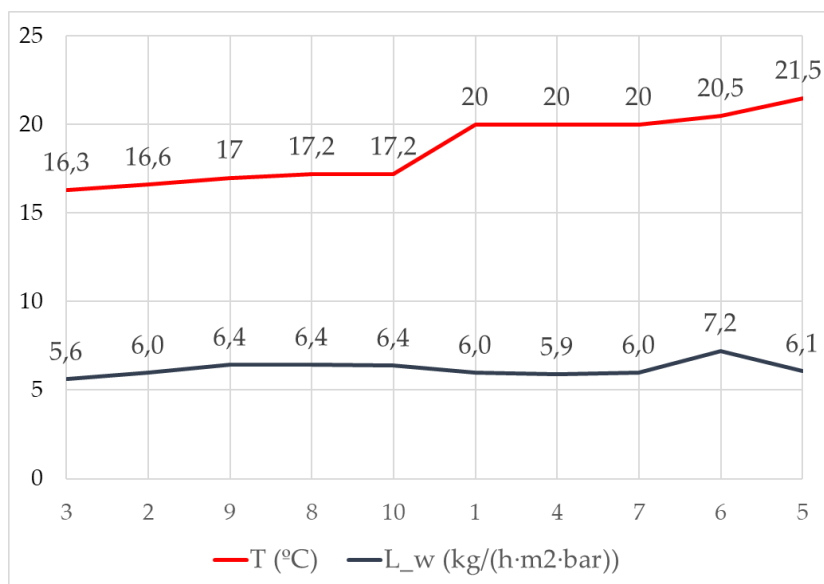


Figura 81. Evolución de la temperatura frente a la permeabilidad en los diferentes ensayos.

Por tanto, tras analizar los ensayos se ha hecho una estimación media de todos los valores menos el del ensayo 6 ya que es el que se salía un poco de rango. Se puede decir que el valor propuesto de permeabilidad al agua de la membrana FO4040 es 6,1.

Además, se puede observar como la suposición de $f=1$ es adecuada, ya que a lo largo de los ensayos no se ve afectado el caudal transferido por el ensuciamiento. En cuanto a la temperatura se puede decir que no es un factor para tener en cuenta, ya que no interfiere de forma significativa en los resultados de los ensayos.

5 CONCLUSIONES

EN este proyecto, se ha evaluado experimentalmente la membrana FO4040 del fabricante TORAY. Utilizando un banco de ensayos adquirido gracias al proyecto SOLMIDIFF. La relevancia del ensayo radica en permitir, dentro del grupo de investigación del proyecto SOLMIDIFF, avanzar en el diseño preliminar de un sistema de desalación de agua de mar de alta eficiencia gracias a la configuración expuesta en el apartado de configuraciones principales del capítulo 2.

Se han realizado 10 ensayos concluyentes para la determinación experimental de la permeabilidad al agua de la citada membrana, resultando un valor de 6,1 y un error de $\pm 0,4$.

Cabe destacar que los ensayos con la instalación existente no han presentado ningún problema de operación a lo largo de la campaña experimental realizada, sin embargo, se han identificado potenciales mejoras. En base a la experiencia adquirida con el banco de ensayos existentes, se propone para ensayos futuros con otras membranas las siguientes recomendaciones: Adquirir un transmisor de caudal para medir la presión de alta a la salida y cambiar los manómetros existentes por unos de mayor precisión.

Finalmente, respecto a trabajos futuros, observando los resultados obtenidos se aprecian una serie de limitaciones en el análisis realizado. Para ello se proponen diferentes recomendaciones de estudios futuros.

- Ensayos análogos con tiempo de operación superior, para ello sería necesario realizar una inversión en unos tanques de mayores dimensiones, ya que esto permitirá realizar ensayos con una duración superior a los 40 mins.
- Ensayos con diferencia de temperatura más extremas, para observar con mayor claridad la influencia de la temperatura. Quizás los meses de Julio (T_{max}) y Enero (T_{min}).
- Ensayos con diferentes condiciones de operación, para así mejorar la validez de los resultados obtenidos.
- Ensayos con diferentes membranas, para determinar cómo afectan al rendimiento general del sistema. Esto puede incluir estudios de comparación de selectividad, permeabilidad, resistencia a la fouling y durabilidad de las membranas.

6 ANEXO

Este anexo está formado por un pequeño manual del correcto uso de la instalación que se ha utilizado para el desarrollo de este proyecto.

Por tanto, a la hora de poner en marcha la instalación hay que seguir los siguientes pasos:

1. Comprobar que todas las válvulas de la instalación están abiertas (BR-RO-01, BR-RO-02, BR-RO-03 y BR-RO-04).
2. Verificar que las válvulas reguladoras de presión (válvulas de aguja NE-RO-01 y NE-RO-02) están completamente abiertas.
3. Asegurarse de que las válvulas de descarga de los depósitos de alimentación (TA-RO-01 y TA-RO-02) están abiertas y que las válvulas de descarga de los depósitos de retorno están cerradas (TA-RO-03 y TA-RO-04).
4. Si Comprobar que la dirección de las válvulas de 3 vías es la deseada. Por defecto, se debe realizar un lavado del prototipo en cada arranque, por lo que las válvulas de 3 vías deben estar dirigidas al circuito de lavado. Una vez realizado el lavado, la alimentación debe realizarse desde los depósitos de alimentación (TA-RO-01 y TA-RO-02) y el retorno debe llevarse a los depósitos de retorno (TA-RO-03 y TA-RO-04).
5. Revisar el nivel de agua de los depósitos (TA-RO-01 y TA-RO-02).
6. Comprobar, en la medida de lo posible, que el circuito está purgado. La instalación incorpora dos tubos transparentes, donde se puede observar si hay burbujas de aire o no en el circuito.
7. Girar el interruptor principal en el panel de control de la instalación. El indicador de tensión se iluminará (blanco).
8. Pulsar el botón Reset para restablecer las alarmas. Las alarmas por alta presión deben desaparecer, mientras que las alarmas por baja presión deben persistir (rojo).
9. Presionar los interruptores de encendido de las bombas de circulación (PC-RO-01 y PC-RO-02).
10. Volver a presionar el botón Reset. Esta vez, deben desaparecer todas las alarmas.
11. Observar los tubos transparentes de alimentación de las bombas de alta presión (PP-RO-01 y PP-RO-02) para verificar que no hay burbujas de aire en el circuito.
12. Comprobar que el caudal de circulación en ambos lados es, al menos, 0.8m³/h (Fijarse FT-RO-01, FT-RO-02 y FT-RO-03). De no ser así, puede ocurrir que los filtros de discos estén obstruidos (FZ-RO-01 y FZ-RO-02) o que haya aire en el circuito.
13. Antes de arrancar las bombas de alta presión, revisar el nivel de aceite de estas.
14. Una vez se haya realizado (si procede) el lavado del prototipo, presionar los interruptores de encendido de las bombas de alta presión (PP-RO-01 y PP-RO-02). Ambos displays de las botoneras de los variadores de frecuencia deben encenderse.
15. Las bombas de alta presión se arrancar a través de los variadores de frecuencia. Primero se debe pulsar el botón ESC en cada una de las botoneras, apareciendo así la información general de los variadores de frecuencia. Para arrancar las bombas, pulsar el botón verde de la botonera, la frecuencia se irá subiendo poco a poco hasta estabilizarse en 30 Hz.
16. Aumentar poco a poco la frecuencia hasta alcanzar el valor deseado de caudal. No debe superarse los 40 Hz.
17. Cerrar gradualmente las válvulas reguladoras de presión simultáneamente (válvulas de aguja NE-RO-01 y NE-RO-02) para aumentar la presión del sistema hasta alcanzar el valor deseado. En ningún caso se superarán los 25 bar en el lado de alta presión o los 2.5 bar en el lado de baja presión (observar PG-RO-02 y PG-RO-05).
18. Una vez se haya procedido al arranque de la planta y las condiciones de trabajo sean estables, observar el funcionamiento de la instalación a través del sistema de adquisición de datos y prestar atención al nivel de agua de los depósitos.

REFERENCIAS

- [1] Jones, E., et al. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- [2] Medina, J. A. (1999). *Desalación de Aguas Salobres y de Mar: Osmosis Inversa*. Mundi Prensa Libros. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=63677>
- [3] *La desalinización en España*. (s.f). <https://hispagua.cedex.es/>.
- [4] Sánchez, D., et al. (s.f) SOLMIDEFF. <http://institucional.us.es/solmideff/>
- [5] Pure Aqua, Inc., (s.f). *Sistemas de Osmosis Inversa y Sistemas de Membranas*. Pure Aqua, Inc. <https://es.pureaqua.com/sistemas-de-osmosis-inversa-y-sistemas-de-membranas/>
- [6] World Resources Institute (2023). <https://www.wri.org>
- [7] Multicon. (s.f) MultiCon CMC-14. <https://www.multicon24.eu/en/catalog/multicon/multicon-cmc-141>