



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química



**INCORPORACIÓN DE REDES POLIMÉRICAS INTERPENETRADAS SOBRE MEMBRANAS DE OSMOSIS INVERSA
RECICLADAS PARA INCREMENTAR SELECTIVIDAD IÓNICA**

POR

Eduardo Andrés González Rivas

Memoria de Título presentada a la facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Químico

Profesor Guía

Luis Pino Soto

Marzo, 2024

Concepción, (Chile)

Resumen

En respuesta a la crisis hídrica se han creados diversos métodos para obtener agua apta para el consumo humano. La osmosis inversa (OI) es uno de estos métodos más empleados, sin embargo, el ensuciamiento de las membranas de OI es un hecho inevitable que provoca su periódica sustitución. Actualmente, la OI genera más de 14.000 toneladas al año de desecho en membranas, y su continuo crecimiento ha generado una preocupación ambiental y económica. Ante este escenario, la gestión de membranas que han cumplido su ciclo de vida útil surge como necesidad para mejorar la sostenibilidad de procesos industriales. El objetivo de este trabajo es investigar una alternativa para generar una membrana de valor agregado a partir de membranas recicladas de osmosis inversa, como alternativa para elaborar membranas con mayor desempeño y; reducir la demanda de nuevas membranas.

En este estudio se desarrolló y evaluó modificaciones de membranas de osmosis inversa oxidadas con diferentes polímeros funcionales (catiónico, aniónico y quelante) mediante la técnica de interpenetración de polímeros para mejorar su permeabilidad y selectividad a especies iónicas. Las membranas de OI saturadas de poliamida aromática utilizada para el tratamiento de agua salobre fueron oxidadas mediante un tratamiento aplicando soluciones de etanol al 35% v/v, EDTA al 5% y NaClO al 5% y posteriormente modificadas con un diseño de experimento establecido.

Se realizaron pruebas de permeabilidad para conocer el efecto de la oxidación y de las modificaciones al agregar las redes poliméricas, evaluando permeabilidad del agua, rechazo de iones mono y divalentes y, además se realizó una caracterización química de las membranas para determinar la efectividad de las modificaciones realizadas mediante técnicas de FTIR-ATR y potencial zeta de transmisión.

Las membranas saturadas aumentaron su permeabilidad en un $1830 \pm 532\%$ en comparación a las membranas recicladas y en un $274 \pm 87,4\%$ de las membranas modificadas, alcanzando permeabilidades de membranas de UF y RO respectivamente. A través de la caracterización química se demostró cambios químicos en su composición causados por la modificación

Este estudio demuestra que es posible realizar modificaciones de las membranas recicladas para generar un producto con valor agregado que sea una alternativa viable de gestión de residuos y una futura investigación deberá orientarse a evaluar los aspectos económicos y medio ambientales para la nueva generación de membranas a partir de desechos de plantas de OI.

Summary

In response to the water crisis, various methods have been developed to obtain water suitable for human consumption. Reverse osmosis (RO) is one of the most used methods; however, membrane fouling in RO is an inevitable problem that leads to periodic replacement. Currently, RO generates over 14,000 tons of membrane waste per year, and its continuous growth has raised environmental and economic concerns. In this scenario, managing membranes that have reached the end of their life cycle emerges as a necessity to improve the sustainability of industrial processes. The objective of this work is to investigate an alternative for generating value-added membranes from recycled reverse osmosis membranes, to produce membranes with enhanced performance and reduce the demand for new membranes.

In this study, modifications of oxidized reverse osmosis membranes with different functional polymers (cationic, anionic, and chelating) were developed and evaluated using the polymer interpenetration technique to improve their permeability and selectivity to ionic species. The reverse osmosis membranes saturated with aromatic polyamide used for brackish water treatment were oxidized through a treatment involving solutions of 35% v/v ethanol, 5% EDTA, and 5% NaClO, followed by modification based on a predetermined experimental design.

Permeability tests were conducted to assess the effect of oxidation and modifications by adding polymer networks, evaluating water permeability, rejection of monovalent and divalent ions, and conducting a chemical characterization of the modified membranes to determine the effectiveness of the modifications using FTIR-ATR and zeta potential techniques.

The saturated membranes increased their permeability by $1830 \pm 532\%$ compared to recycled membranes and by $274 \pm 87.4\%$ compared to modified membranes, reaching UF and RO membrane permeabilities, respectively. Chemical characterization demonstrated chemical changes in their composition caused by the modification.

This study demonstrates that it is possible to make modifications to recycled membranes to generate a value-added product that serves as a viable waste management alternative. Future research should focus on evaluating the economic and environmental aspects for the new generation of membranes made from OI plant waste.

Índice temático

Resumen	II
Summary	III
1. Introducción	6
2. Objetivos	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3. Marco teórico	8
3.1 Técnicas de filtración de membrana	8
3.2 Modificación de membranas mediante polímeros	10
4. Materiales y métodos	12
4.1 Materiales del experimento	12
4.2 Preparación de las soluciones	13
4.3 Limpieza y oxidación de membranas de osmosis inversa saturadas	14
4.4 Modificación de membranas	14
4.5 Pruebas de permeabilidad	16
4.6 Potencial electrocinético del potencial zeta	18
4.7 Composición química de las membranas	18
5. Resultados y discusión	18
5.1 Pruebas de permeabilidad de las membranas saturadas	18
5.2 Pruebas de permeabilidad de membranas oxidadas	19
5.3 Pruebas de permeabilidad de membranas modificadas	20
5.2 Carga superficial de la membrana	24
5.3 Caracterización química mediante FTIR	26
6. Conclusiones	28
Anexos	31
Anexo 1: Tablas de permeabilidad de membranas saturadas	31
Anexo 2: Tablas de permeabilidad de membranas recicladas	33
Anexo 3: Tablas de permeabilidad de las membranas modificadas	45
Anexo 4: Tablas de constante de permeabilidad hidráulica	57
Anexo 5: Tablas de conductividad de permealdo	57
Anexo 5: Comparaciones FTIR entre membranas	58

Listado de figuras y tablas

Figura 1 Tipos de filtración según el flujo..	8
Figura 2 Espectro de filtración.	9
Figura 3 Esquema del proceso de modificación de las membranas oxidadas	15
Figura 4 Módulo de filtración utilizado en la prueba de permeabilidad.	16
Figura 5 Permeabilidad en función de presión en las membranas saturadas	19
Figura 6 Permeabilidad en función de la presión en las membranas oxidadas	19
Figura 7 Permeabilidad en función de la presión en las membranas modificadas	21
Figura 8 Cambio en la constante de permeabilidad al realizar las modificaciones	21
Figura 9 Rechazo de la disolución de sulfato de magnesio en las membranas modificadas	22
Figura 10 Rechazo de la disolución de cloruro de sodio en las membranas modificadas	23
Figura 11 Prueba del potencial zeta en membranas con disolución NaCl 1 mM	24
Figura 12 Prueba del potencial zeta en membrana NF10-B con disolución NaCl a distintas concentraciones	25
Figura 13 Prueba del potencial zeta en membrana NF10-B con disolución MgSO ₄ a distintas concentraciones	25
Figura 14 Espectros FTIR-ATR de las membranas de ultrafiltración (UF), membrana de ósmosis inversa saturada oxidada con NaClO (RO ox), membrana de ósmosis inversa saturada (RO sat) y membrana de ósmosis inversa modificada (NF10-B).	27
Tabla 1: Caracterización de polímeros del estudio	11
Tabla 2 Características de operación de la membrana saturada de ósmosis inversa.	12
Tabla 3 Productos químicos utilizados.	12
Tabla 4 Disoluciones utilizadas en la modificación.	13
Tabla 5 Modificaciones experimentales.	14
Tabla 6 Composición volumétrica de las modificaciones experimentales.	15
Tabla 7 Características de las disoluciones iónicas	17

1. Introducción

El agua ha empezado a considerarse como un recurso escaso para la humanidad debido al crecimiento demográfico, la urbanización y el cambio climático. En este contexto, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha creado la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible que plantea en su sexto objetivo que es necesario garantizar un acceso universal y equitativo de agua potable. En este sentido, la ingeniería química desempeña un papel crucial en la búsqueda de soluciones para este desafío, mediante la optimización de los procesos involucrados en el tratamiento de aguas. La cloración, la ozonización, la filtración, la adsorción por carbón activado y los procesos de membrana son algunas de las tecnologías que la ingeniería química emplea para este fin.

La ósmosis inversa es uno de los procesos de membrana que posibilita la obtención de agua de calidad alta a partir de fuentes contaminadas o salinas. Sin embargo, el uso de esta técnica también tiene desafíos asociados al rendimiento y durabilidad de las membranas utilizadas en el proceso. Se estima que el ciclo de vida de las membranas utilizadas en osmosis inversa es de 5 a 7 años de vida útil, luego son enviadas a vertederos (Ziolkowska, 2015). Anualmente, se estima que se desechan más de 840.000 membranas que han terminado su ciclo de vida a nivel mundial, lo que equivale a más de 14.000 toneladas de desecho por año (Landaburu-Aguirre et al., 2016).

Ante este escenario, la modificación de membranas de osmosis inversa que ha alcanzado el fin de su vida útil mediante la aplicación de redes poliméricas emerge como una estrategia innovadora y ecológica. Esta propuesta no solo busca mejorar la sostenibilidad de los procesos de purificación de agua, sino que también ofrece una solución práctica que permite reducir la demanda de nuevas membranas. Así, esta alternativa se presenta como un enfoque prometedor para enfrentar los retos ambientales y operativos del tratamiento de agua, alineándose con los principios de economía circular y sostenibilidad.

En esta investigación evalúan combinaciones de redes poliméricas funcionales de (Poli((cloruro de [3-(acrilamido propil)]trimetil amonio) (CIAPTA), Ácido 2-acrilamido-2-metilpropano sulfónico (APSA), Glicidil metacrilato-N-metil-D-glucamina (GMA-NMG)) aplicadas a membranas recicladas, con el objetivo de identificar la modificación que permita maximizar la permeabilidad y eficiencia de separación de iones.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar y evaluar modificaciones de membranas de osmosis inversa oxidadas con la incorporación de redes poliméricas interpenetradas para mejorar su permeabilidad y selectividad a especies iónicas.

2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la incorporación de redes poliméricas interpenetradas sobre una membrana de osmosis inversa oxidada, evaluando el efecto de la incorporación de polímeros funcionales de carácter catiónico, aniónico y quelante.
- Analizar el comportamiento de los perfiles de flujo de permeado y rechazo de iones monovalentes y divalentes de las membranas modificadas usando soluciones modelo.
- Caracterizar las propiedades morfológicas y químicas de las membranas modificadas, con el fin de cuantificar el grado de modificación y asegurar su reproducibilidad.

3. Marco teórico

3.1 Técnicas de filtración de membrana

La tecnología de membranas es un método de filtración de solutos disueltos en un fluido, cuyo fundamento es la separación por la diferencia de los pesos moleculares y el tamaño de partícula (Solís et al., 2017). Al emplear esta técnica se forman dos fases: el permeado, referido al fluido que atraviesa la membrana y el rechazo, que es el fluido incapaz de pasar a través de ella.

Aplicar esta técnica reduce el consumo energético del proceso comparado a métodos tradicionales, por ejemplo, en procesos de desalinización los procesos de filtración por membrana requieren menos energía que tratamientos térmicos (Osman et al., 2024). Además, es fácilmente acoplable con otras técnicas y sus los módulos de operación son compactos y con alta relación superficie/volumen. Aunque la técnica es altamente prometedora, el ensuciamiento sigue siendo un problema en este tipo de procesos. Las membranas reducen su productividad, incrementan los costos energéticos para mantener la productividad y pueden comprometer la calidad del producto (Osman et al., 2024).

Las técnicas de filtración se pueden clasificar dependiendo de la interacción entre el flujo y la membrana. La Figura 1 muestra los principales tipos de filtración.

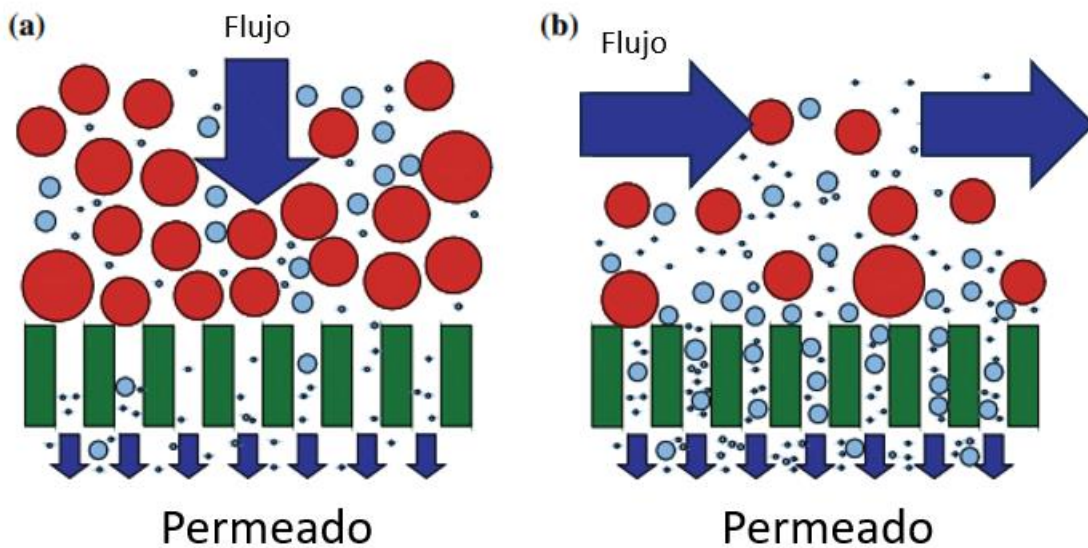


Figura 1 Tipos de filtración según el flujo. Adaptado de (Herterich et al., 2017).

El flujo tangencial permite disminuir la concentración de sólidos en la superficie de la membrana prolongando la vida útil de las membranas, por el contrario, usar flujo directo provoca una acumulación de sólidos en la superficie de la membrana así que este método es empleado en procesos en los que la concentración de sólidos es baja y es factible hacer limpiezas frecuentes a las membranas.

Los procesos que utilizan filtración de membrana mediante presión incluyen la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y la ósmosis inversa. La clasificación de las membranas se fundamenta en el tamaño de poros y el tamaño de partículas que puede retener. La Figura 2 muestra las tecnologías de separación de membrana y el rango del tamaño de separación de compuestos.

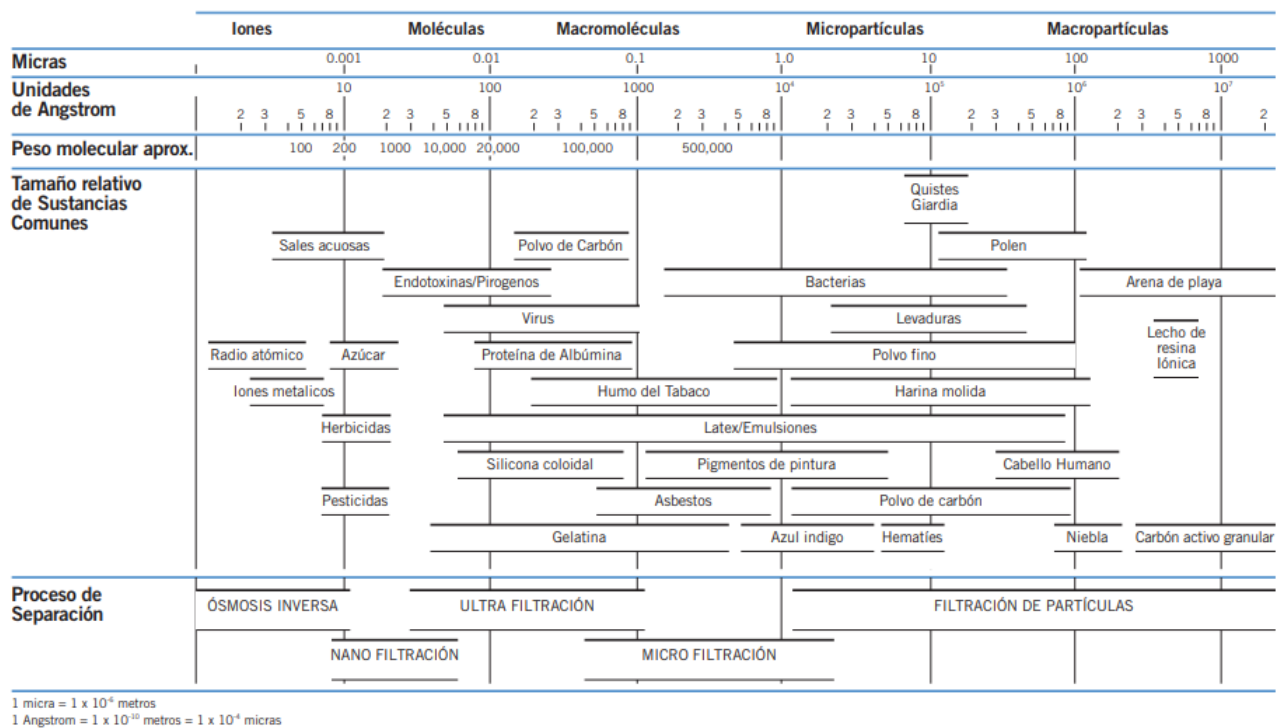


Figura 2 Espectro de filtración.

En la aplicación de procesos de separación como la ósmosis inversa y la nanofiltración, el diseño del módulo de la membrana juega un papel crucial en su desempeño, ya que el flujo obtenido está directamente influenciado por el área total disponible y las características de su disposición. Por lo tanto, la relación entre el área total disponible y el volumen del módulo (densidad de empaquetamiento) se vuelve un factor fundamental para considerar efectos de ensuciamiento. Entre los distintos tipos de módulos comerciales disponibles, tales como los de geometría espiral, fibra hueca, tubulares y placas y marcos. Destacan con mayor frecuencia los de fibra hueca y los enrollados en espiral, gracias a su alta eficiencia en términos de área/volumen. Pese a que los módulos de fibra

hueca exhiben una densidad de empaquetamiento superior a los enrollados en espiral, estos últimos son preferidos debido a ventajas operativas como una menor susceptibilidad a obstrucción por suciedad y una tasa de permeación superior en relación con su densidad de empaquetamiento (Schwinge et al., 2004).

3.2 Modificación de membranas mediante polímeros

Para mejorar la eficiencia de las membranas, es importante considerar las propiedades del material incluyendo sus características químicas y físicas, ya que estas definen sus interacciones con el largo número de iones y moléculas que se desean eliminar de la corriente tratada. Para mejorar dichas interacciones, se conocen distintas técnicas aplicadas en la fabricación de membranas como el estiramiento, la sinterización, la inversión de fase y la polimerización interfacial (Lalia et al., 2013). Esta última técnica, también es utilizada cuando las membranas poseen deficiencias en su rendimiento de separación.

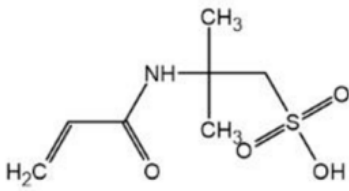
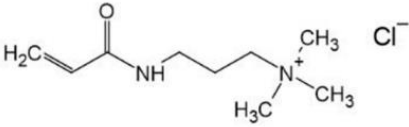
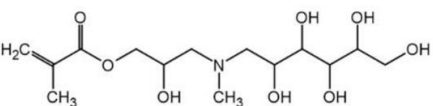
La polimerización interfacial utiliza monómeros que tengan grupos funcionales o polares para generar membranas con una superficie más suave o que aumenten su hidrofiliidad, reduciendo el ensuciamiento de estas. Por ejemplo, se ha reportado que añadir nano partículas de cobre a membranas de poliamidas mediante el método de recubrimiento superficial produce un efecto antibacteriano con una eficiencia superior al 99% que puede mantenerse por 90 días sumergido en agua y en comparación a membranas nuevas sin modificar, tuvo un mejor desempeño evitando el ensuciamiento con proteínas (Zhang et al., 2017).

Las membranas pueden mejorar su permeabilidad del agua, pero disminuir su selectividad o viceversa, por esta razón es necesario experimentar con distintos tipos de redes poliméricas que aseguren rendimientos altos de separación sin comprometer la permeabilidad del agua. Se pueden generar sistemas multicomponentes que tengan un perfil específico de propiedades dependiendo de los grupos funcionales que conformen la red polimérica. Los polímeros considerados en este estudio se presentan a continuación:

- Poli((cloruro de [3-(acrilamido propil)]trimetil amonio) (CIAPTA).
- Ácido 2-acrilamido-2-metilpropano sulfónico (APSA).
- Glicidil metacrilato-N-metil-D-glucamina (GMA-NMG)

Los cuales están caracterizados en la Tabla 1:

Tabla 1: Caracterización de polímeros del estudio

Polímero	Estructura molecular	Tipo de polímero	Aplicación
APSA		Aniónico.	Se utiliza para capturar proteínas y eliminar iones metálicos,
CIAPTA		Catiónico.	Permite la eliminación de iones y metales pesados.
GMA-NMG		Iónico quelante.	Utilizado para cambiar la carga eléctrica de la membrana.

Sin embargo, la modificación de membranas con polímeros también presenta desventajas que deben considerarse:

- Añadir estos polímeros puede causar bloqueo en los poros de la membrana por lo que se reduce la eficiencia de las membranas frente a su condición original.
- Realizar estas modificaciones implica costos adicionales en el proceso productivo.
- La modificación de polímeros es una técnica con dificultades de escalabilidad para industrias a gran escala.
- Es necesario realizar mantenimientos y limpiezas de membrana específico para mantener el rendimiento de las membranas.

Estas desventajas pueden mitigarse a través de un buen diseño de redes poliméricas y la optimización de costo-eficiencia del proceso.

4. Materiales y métodos

4.1 Materiales del experimento

Para el desarrollo de los experimentos se usaron muestras de una membrana saturada de poliamida aromática de módulos enrollados en espiral de 8040 (8" diámetro y 40" de largo) marca Toray TMG20D-400 utilizada para tratar agua salobre. Las especificaciones técnicas de esta membrana se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2 Características de operación de la membrana saturada de ósmosis inversa.

Característica	Valor
Tipo de membrana	Película delgada de poliamida
Temperatura máxima de operación [°C]	45
Presión máxima de operación [MPa]	4,1
Tolerancia al cloro libre	< 0,1 ppm
Dimensiones (largo y diámetro) [mm]	1016 y 201
Área activa [m ²]	37
Rechazo nominal de NaCl [%]	99,7
Rango de pH, en operación continua	2 – 11
Rango de pH, en periodo corto de limpieza (30 min)	1 – 13
Flujo de permeado [m ³ /día]	45,8

Se utilizaron productos químicos en la fase de limpieza y modificación de las membranas, mencionados en la Tabla 3:

Tabla 3 Productos químicos utilizados.

Compuesto	Origen	Composición
APSA	Sigma-Aldrich	99%
CIAPTA	Sigma-Aldrich	75%
N-metil-D-glucamina (NMG)	Sigma-Aldrich	99%
Metacrilato de glicidilo (GMA)	Sigma-Aldrich	97%
N,N-Metileno bis(acrilamida) (MBA)	Sigma-Aldrich	99%
Persulfato de amonio (APS)	Sigma-Aldrich	99%
N,N,N',N'-tetrametiletildiamina (Temed)	Sigma-Aldrich	99%
Hidróxido de sodio	Sigma-Aldrich	99%
Cloruro de sodio	Sigma-Aldrich	99%
Sulfato de magnesio	Merck	99%

4.2 Preparación de las soluciones

Para realizar las modificaciones, se utilizaron disoluciones de concentración conocida. A través de la Tabla 4 se resume esta información:

Tabla 4 Soluciones utilizadas en la modificación.

Solución	Unidad
CIAPTA	0,5 mol/L
APSA	0,5 mol/L
GMA-NMG	0,3 mol/L
NaCl	5% p/p

Las concentraciones propuestas en la Tabla 4 se basaron en estudios previos realizados por nuestro grupo de investigación (Vargas-Figueroa et al., 2023) y las concentraciones utilizadas fueron bajas para evitar la formación de un gel que impide la penetración total de la membrana. De acuerdo con la Tabla 3 no se cuenta con el compuesto GMA-NMG. Mediante la metodología señalada en (Vargas-Figueroa et al., 2023) se ha sintetizado dicho compuesto. En un matraz de tres cuellos se depositaron 9,76 gramos de NMG en 60 ml de agua destilada y fue dejado en agitación por 5 minutos. Después, se añadieron 6,82 gramos de GMA y para regular el pH se agregaron 10 ml de NaOH. Luego, se mantuvo la solución en agitación continua a 70 °C mediante un baño María. Después de la reacción, se enfrió el producto y fue lavado en dietiléter para eliminar las trazas de GMA que no reaccionaron. Finalmente, el producto fue llevado a un roto evaporador para eliminar el exceso de dietiléter utilizado en el lavado.

Para conocer la concentración de la disolución se tomó una alícuota de volumen conocido que fue depositada en un matraz y se registró su peso en una balanza digital. Después, se llevó a un liofilizador para formar cristales del compuesto y eliminar el agua de la disolución. Finalmente, se volvió a pesar la alícuota y con ese dato se calculó la concentración de la disolución mediante la expresión:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso post liofilizado}}{\text{PM del compuesto}} \cdot \frac{1}{\text{Volumen de la alícuota liofilizada}} \quad (1)$$

4.3 Limpieza y oxidación de membranas de osmosis inversa saturadas

Se cortaron membranas circulares (20,26 cm²) que provienen de la membrana descritas en la sección Materiales del experimento. Las membranas fueron lavadas con agua destilada y posteriormente fueron dejadas en una solución de etanol al 35% v/v por un periodo de 18 horas para disolver suciedad presente en la membrana. Después, se lavaron con agua destilada y se sometieron al proceso de lavado en un recipiente de PVC asegurando el contacto de la capa activa de la membrana con una solución de 100 ml EDTA al 5% para solubilizar la suciedad.

Luego se debe dejar el recipiente en un agitador por 45 minutos. Nuevamente, se lavó la membrana con agua destilada y finalmente fue oxidada con una solución de 50 ml de NaOCl al 5% y para asegurar que se removió todo el agente oxidante, se lavó de nuevo con abundante agua destilada.

4.4 Modificación de membranas

Con las disoluciones presentadas en la Tabla 4, se realizaron 6 modificaciones basadas en el estudio realizado por Vargas-Figueroa, como se señala en la Tabla 5.

Tabla 5 Modificaciones experimentales.

Modificación	CIAPTA (M)	GMA-NMG (M)	APSA (M)
NF-1	0,200	-	-
NF-2	0,130	0,070	-
NF-5	0,067	0,067	0,067
NF-7	-	0,200	-
NF-9	-	0,070	0,130
NF-10	-	-	0,200

Además, se agregaron 10 mL de la disolución de cloruro de sodio para activar las membranas y eliminar agua de sus poros. Luego, se agregó agua destilada hasta completar 50 mL de disolución, como se indica en la Tabla 6 y finalmente se agregaron 0,124 gramos de MBA, que es un reactivo reticulante. A través de estas combinaciones se busca estudiar el efecto individual de los monómeros y estudiar si al combinarlos se obtienen mejores resultados.

Tabla 6 Composición volumétrica de las modificaciones experimentales.

Disolución	CIAPTA (ml)	GMA-NMG (ml)	APSA (ml)	NaCl (ml)
Modificación				
NF-1	20,00	-	-	10,00
NF-2	13,00	11,67	-	10,00
NF-5	6,670	11,12	6,670	10,00
NF-7	-	33,33	-	10,00
NF-9	-	11,67	13,00	10,00
NF-10	-	-	20,00	10,00

Luego de generar las disoluciones, se realizó el procedimiento ilustrado en la Figura 3 con membranas previamente oxidadas:

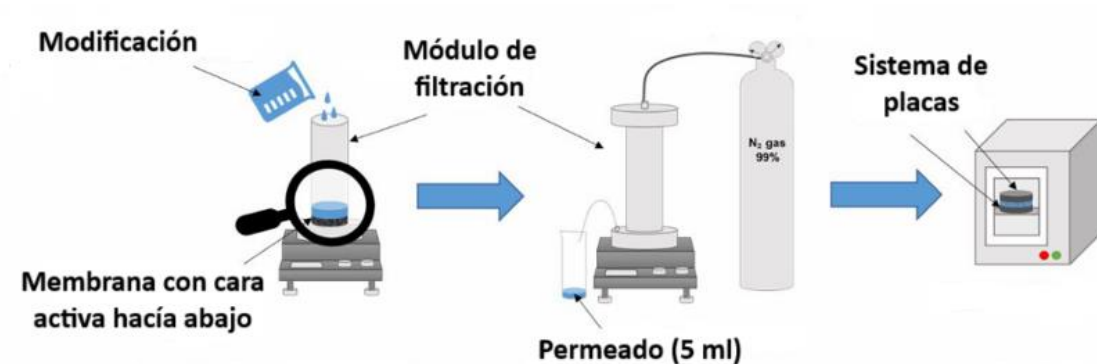


Figura 3 Esquema del proceso de modificación de las membranas oxidadas

La primera fase de modificación se realizó en el módulo de filtración, donde se colocó la membrana con su cara activa en la dirección opuesta al flujo. Después se introdujo la disolución que tiene la modificación, y se utilizó nitrógeno para filtrar aproximadamente 5 mL de la disolución. Luego se agregaron al módulo de filtración los 5 mL permeados con 6 mg de APS y 376 microlitros de TEMED que son los iniciadores radicalarios. Nuevamente se realizó una filtración de 5 mL de esta mezcla. Luego, colocó la membrana modificada en un sistema de placas de aluminio correctamente forradas con papel mantequilla que además deben estar hidratadas con parte de la modificación. Finalmente, se dejaron reposar en una estufa a 40°C por un periodo de 24 horas.

4.5 Pruebas de permeabilidad

Las pruebas de filtración fueron realizadas en un equipo de filtración de celda agitada de tipo dead-end (Sterlitech HP4750), que permite ocupar membranas pequeñas con un área activa de 14,6 cm². Para montar el experimento fue importante asegurar que la cara activa sea la que tiene el contacto con los 200 mililitros de agua destilada que se añadieron al equipo. También, se depositó un agitador al interior de este equipo para simular disminuir la acumulación de residuos en la membrana provocados por el flujo directo. A través de la Figura 4, se representa el equipo de filtración utilizado en esta sección:

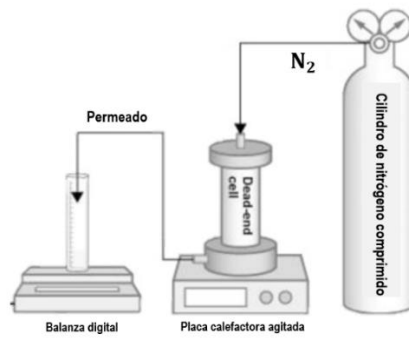


Figura 4 Módulo de filtración utilizado en la prueba de permeabilidad.

Tras un montaje correcto, se pasó agua destilada a una presión de 8 bar por un periodo de 30 minutos para garantizar un flujo estable. Una vez alcanzada esta condición, se verificó el nivel de agua del equipo. En el caso de ser insuficiente, se debe agregar la cantidad suficiente de agua destilada para iniciar las mediciones.

Después, se hicieron las mediciones en la balanza digital a partir del tiempo cero, registrando datos cada minuto durante un periodo total de seis minutos. La toma de datos se realizó a distintas presiones en el rango de 2 a 8 bar, considerando las condiciones de la membrana antes y después de ser modificadas.

El flujo del permeado se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$J_P = \frac{\Delta V}{A_m \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Donde $\Delta V/\Delta t$ es el volumen permeado en el tiempo y A_m es el área efectiva de filtración.

La constante de permeabilidad hidráulica es determinada mediante mediciones de permeación al agua en función de la presión transmembrana. Por lo tanto, la ecuación que permite determinar el flujo de agua a través de la membrana es:

$$J_w = k_p \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (3)$$

Donde k_p es la constante de permeabilidad, ΔP es la diferencia de presión hidrostática y $\Delta \pi$ es la diferencia de presión osmótica a través de la membrana. Para determinar la constante de permeabilidad del agua de la membrana se utiliza agua destilada y a partir de la ecuación 3 k_p fue determinada con la siguiente expresión:

$$k_p = \frac{J_P}{\Delta P} \quad (4)$$

Donde ΔP es la diferencia de presión operativa transmembrana.

Además de la prueba de permeabilidad con agua destilada, también se realizó con soluciones iónicas caracterizadas en la Tabla 7:

Tabla 7 Características de las disoluciones iónicas

Disolución	Concentración (ppm)	pH (-)	Conductividad (μS)
Sulfato de magnesio	1000	7,39	1064
Cloruro de sodio	1000	8,18	1068

A través de estas pruebas se estudia el rechazo de soluto de las membranas modificadas, mediante la siguiente expresión:

$$R_{ob}(\%) = \left(1 - \frac{C_{ps}}{C_{fs}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Donde C_{fs} es la conductividad del soluto en la alimentación, y C_{ps} es la conductividad del soluto en el permeado en base a la conductividad de la solución. Como muestra la expresión, es necesario recolectar muestra suficiente de permeado para utilizar un conductímetro y medir a distintas presiones la conductividad del permeado.

4.6 Potencial electrocinético del potencial zeta

Esta técnica permite caracterizar el potencial zeta de las membranas modificadas mediante un potencial de flujo electrocinético (SurPASS, Anton Paar) con una celda de separación ajustable. El objetivo es determinar la carga superficial que se produce al modificar las membranas y evaluar las posibles interacciones electrostáticas que se generan con los iones contenidos en la solución a tratar. Las mediciones se realizaron mediante una solución electrolítica débil de NaCl (1 mM) y MgSO₄ (1, 10, 50 mM) ajustando a un amplio rango de pH de las soluciones con HCl y NaOH. Esta técnica permite medir el punto isoeléctrico y la carga de la membrana.

4.7 Composición química de las membranas

A través de la reflectancia total atenuada por espectroscopia infrarroja transformada de Fourier, (FTIR-ATR) por sus siglas en inglés, se caracterizaron las membranas para identificar los grupos funcionales en las muestras, utilizando un espectrómetro infrarrojo Perkin-Elmer Spectrum Two (1720X). Cada imagen fue obtenida mediante escaneos consecutivos (30) con una resolución de 4 cm⁻¹ en el rango de 3000 a 500 cm⁻¹.

5. Resultados y discusión

5.1 Pruebas de permeabilidad de las membranas saturadas

El objetivo de las pruebas de permeabilidad del agua destilada es obtener las características hidráulicas de las membranas originales. Con los datos experimentales del Anexo 1: Tablas de permeabilidad de membranas se construye la Figura 5 Permeabilidad en función de presión en las membranas, que representa las constantes de permeabilidad de las membranas a través de sus pendientes.

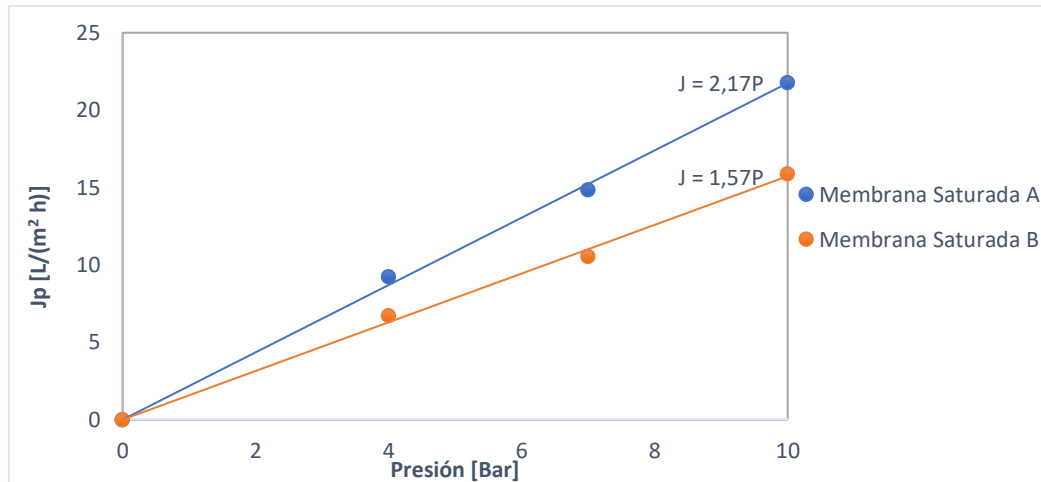


Figura 5 Permeabilidad en función de presión en las membranas saturadas

Los resultados de permeabilidad son similares a los obtenidos en (Ochando-Pulido et al., 2019) para membranas de osmosis inversa de presión baja. Se destaca que la permeabilidad de las membranas evaluadas es similar, y que al tener un intercepto igual a cero se tiene un ajuste representativo de la experimentación con agua destilada debido a que coincide con la ecuación de permeabilidad (Ec. 4).

5.2 Pruebas de permeabilidad de membranas oxidadas

Los resultados de las pruebas de permeabilidad de las membranas recicladas mediante la limpieza y oxidación se encuentran en las tablas del Anexo 2: Tablas de permeabilidad . De estas tablas se extraen los promedios de la permeabilidad entre presiones de 2 a 8 bar. La Figura 6 muestra la permeabilidad promedio de dos replicas realizadas a cada modificación, de esta forma los soportes de membrana se identifican de acuerdo con su modificación y su característica reciclada.

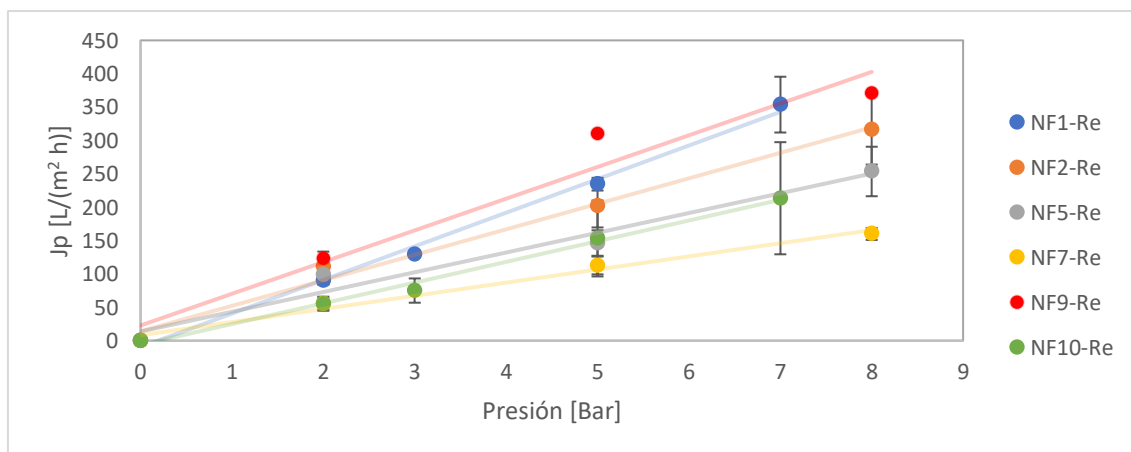


Figura 6 Permeabilidad en función de la presión en las membranas oxidadas

El grado de ensuciamiento es selectivo y se pueden encontrar zonas de la membrana más sucias que otras, que pueden producirse en zonas con donde se reduce el flujo, como es el caso de la salida de los módulos y cerca de los espaciadores (Goh et al., 2018). Explicando la diferencia en los valores de las constantes de permeabilidad representadas por las pendientes de las rectas de la Figura 6. En la Tabla A 27 se encuentran los valores de las constantes y los coeficientes de determinación de cada una de las rectas. En este caso el promedio de las constantes de permeabilidad es de 36,1 L / (m² h bar) alcanzando permeabilidades esperadas de membranas de ultrafiltración (García-Pacheco et al., 2015). Comparando el resultado de las membranas saturadas se ha incrementado aproximadamente 19,3 veces la constante de permeabilidad.

García-Pacheco et al., demostró también una baja reproducibilidad de los datos de membranas oxidadas obtenidas, debido a las diferencias en las zonas de ensuciamiento y que la concentración de NaOCl disminuye a través del tiempo afectando el tiempo de contacto que tiene con la membrana (Causserand et al., 2015).

5.3 Pruebas de permeabilidad de membranas modificadas

Las pruebas de permeabilidad de las membranas modificadas se muestran en la Figura 7. Al realizar las modificaciones no se ha alterado el comportamiento lineal de las curvas, pero si ha disminuido el valor de las constantes de permeabilidad, lo que puede ser un primer indicio de la formación de cadenas poliméricas en la membrana. La reducción de la permeabilidad del agua en membranas modificadas puede explicarse al considerar la disminución del tamaño de los poros de las membranas, que produce resistencia al agua al incrementarse las redes poliméricas interpenetradas (Tapiero et al., 2017).

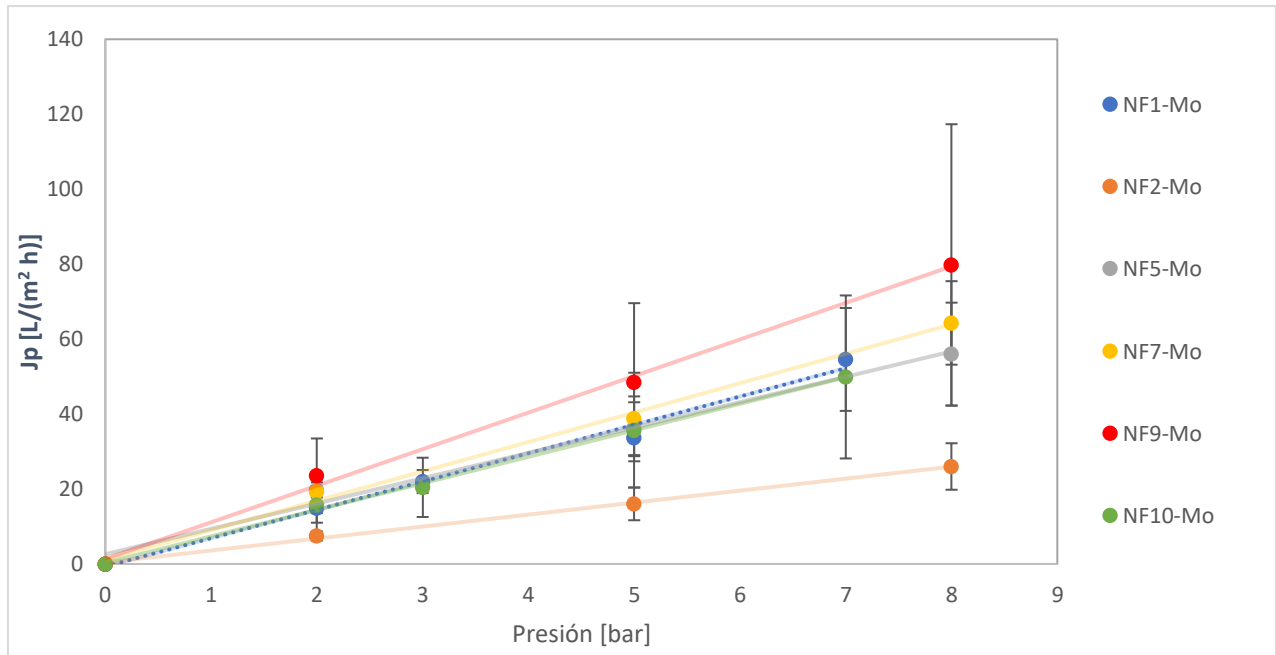


Figura 7 Permeabilidad en función de la presión en las membranas modificadas

La Figura 8 muestra el efecto de las modificaciones de cada combinación de polímeros:

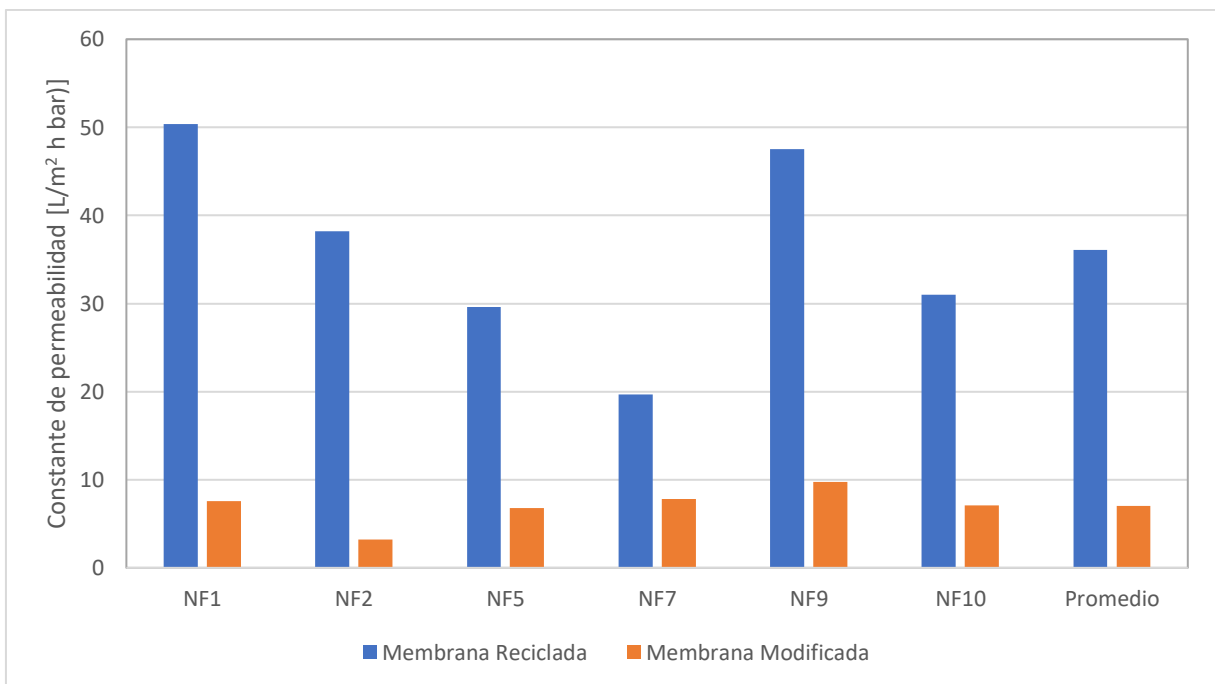


Figura 8 Cambio en la constante de permeabilidad al realizar las modificaciones

En general, las membranas modificadas presentan una reducción superior al $60 \pm 7\%$ de su constante de permeabilidad después de su transformación, en promedio alcanzaron un constante de

permeabilidad de $7 \text{ L} / (\text{m}^2 \text{ h bar})$. Comparando con (Ochando-Pulido et al., 2019) el comportamiento de las muestras estudiadas esta entre el rango de membranas comerciales de capa fina aplicadas en procesos de osmosis inversa y nanofiltración. Se espera que al modificar las membranas y reducir su permeabilidad, sean capaces de rechazar iones.

Para estudiar la separación de iones divalentes, se realizaron ensayos con sulfato de magnesio, los resultados de estas pruebas se encuentran en la *Figura 9*:

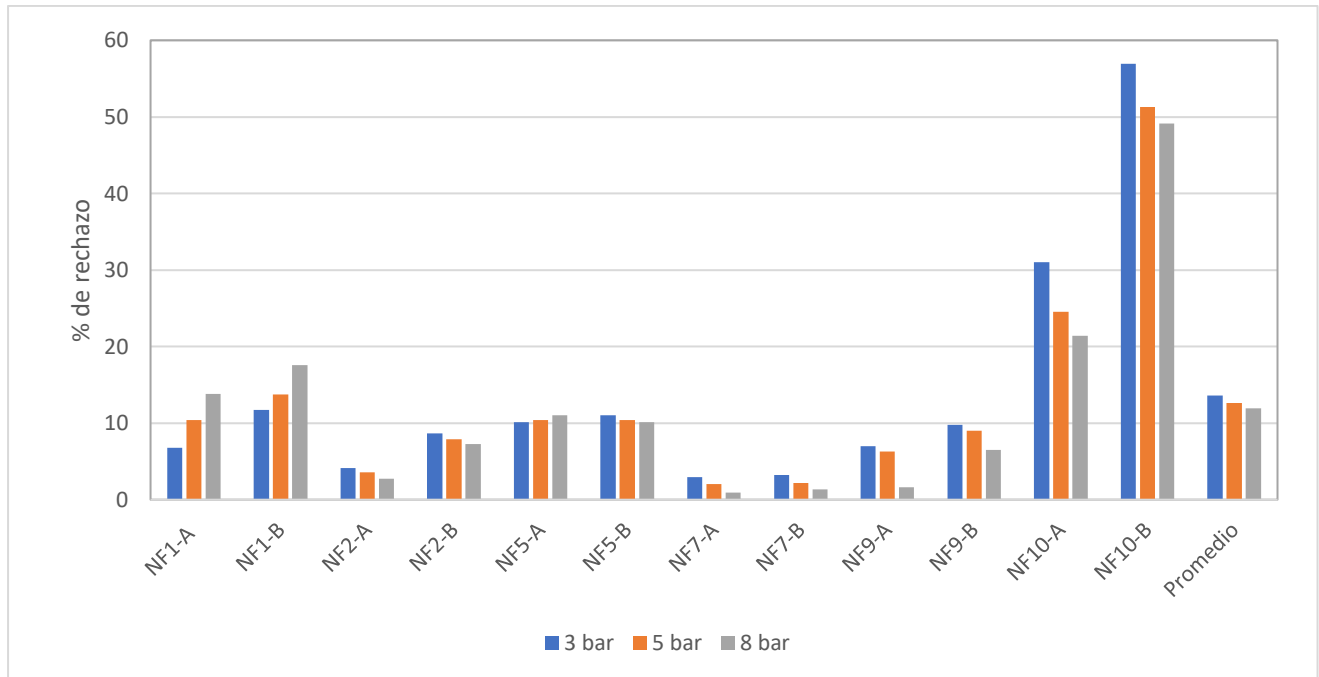


Figura 9 Rechazo de la disolución de sulfato de magnesio en las membranas modificadas

Los resultados del rechazo de MgSO_4 demostraron la capacidad de las membranas modificadas en separar especies divalentes. Las membranas NF10 mostraron incrementar el rechazo un $23 \pm 3\%$ comparado al promedio. Estas membranas contienen APSA, un polímero negativo que tiende a incrementar la carga negativa de la membrana, aumentando la repulsión electrostática y disminuyendo la permeabilidad de iones (Vargas-Figueroa et al., 2023). Debido a la carga más negativa de la membrana el rechazo de iones debería orientarse al ion negativo SO_4^{2-} .

Por otro lado, ambos lados de la membrana deben mantener la electroneutralidad en base al Equilibrio de Donnan, que describe la distribución de iones a través de una membrana cuando hay diferencia en la concentración de iones a ambos lados de la membrana (Boda & Gillespie, 2023). Por lo tanto, si se incrementa el rechazo de iones negativos por electro repulsión de iones, probablemente iones cargados

positivos como el Mg^{+2} también serán rechazados, dada la condición termodinámica de equilibrio que necesita la membrana.

Todas las membranas son capaces de retener estos iones, pero las membranas NF-10 son las que más han destacado en este aspecto. Por lo que se decidió realizar las pruebas con la disolución de cloruro de sodio para estas membranas, considerando que la conductividad inicial de la disolución era de 1068 $\mu S/cm$ y los resultados de la conductividad del permeado de la Tabla A 30 se obtienen los rechazos:

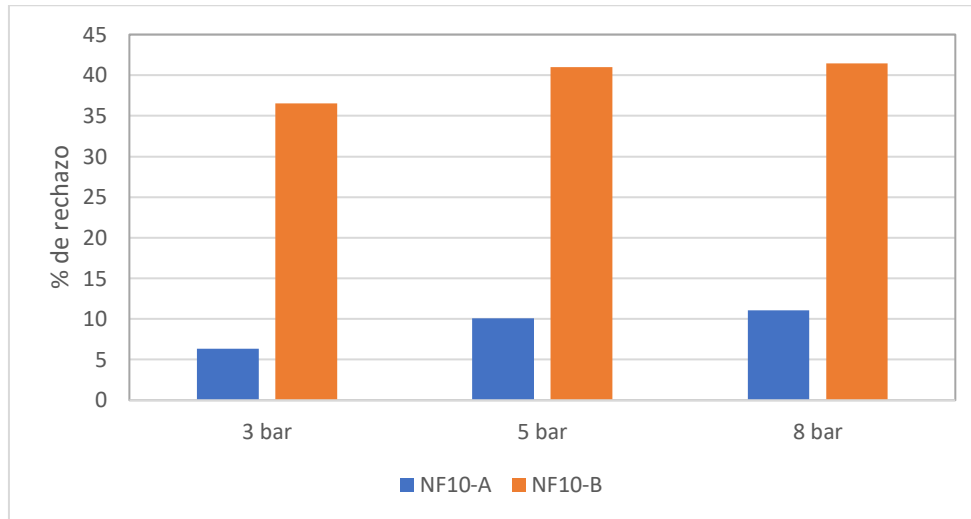


Figura 10 Rechazo de la disolución de cloruro de sodio en las membranas modificadas

Los rechazos de Mg^{+2} y SO_4^{-2} fueron mayores que los de Na^+ y Cl^- lo que puede ser explicado porque estas moléculas tienen radios iónicos hidratados más grandes, facilitando el rechazo (Tansel et al., 2006). De acuerdo con las conductividades del permeado en ambas pruebas, la membrana NF10-B presentó un rechazo mayor de iones, superando el 40% de rechazo en esta última prueba. Al revisar las permeabilidades de las membranas NF-10 después de las modificaciones, la que tiene mayor permeabilidad es la membrana NF10-B, por lo que se requiere seguir estudiando estas membranas para dar explicación a estos resultados.

5.2 Carga superficial de la membrana

El objetivo de este análisis es determinar la carga superficial de las membranas, ya que a través de esta puede predecirse la carga superficial y asociar a eso la exclusión eléctrica de la membrana, lo que puede afectar al rendimiento de separación de esta. A través de la Figura 11 se muestran 4 curvas que representan el comportamiento del potencial zeta al variar el pH de la disolución de cloruro de sodio.

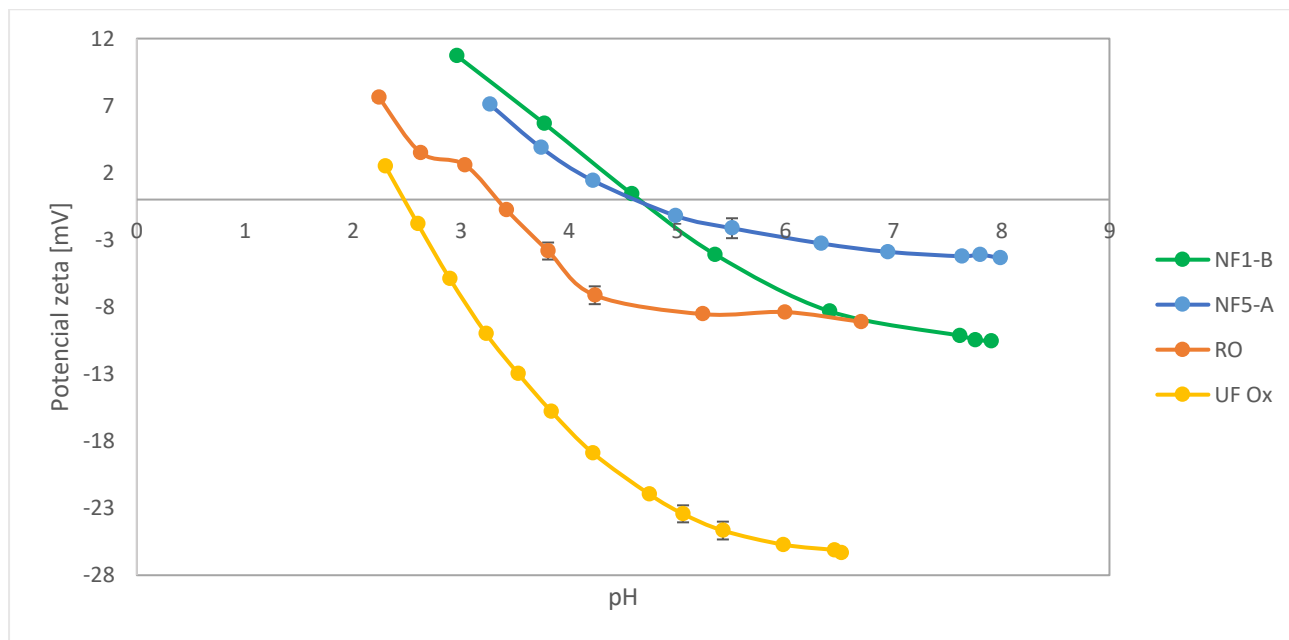


Figura 11 Prueba del potencial zeta en membranas con disolución NaCl 1 mM

El punto isoeléctrico es el punto donde el potencial zeta es cero e indica el pH en el cual la carga neta de la membrana es neutra, a pH superior al punto isoeléctrico la membrana tiene carga negativa, mientras que a pH más bajo del punto isoeléctrico la membrana tiene una carga positiva.

Para el caso de estas curvas, el punto isoeléctrico de las membranas modificadas se encuentra aproximadamente a un pH de $4,64 \pm 0,03$ en comparación con el de la membrana saturada que se encuentra en pH 3,3 indicando que las modificaciones alteraron la carga de la membrana. Considerando que las disoluciones utilizadas en la prueba de rechazo iónico tienen un pH superior ambas membranas tenían carga en negativa y como la NF1-B es más negativa en ese pH, se explica que tenga un rechazo iónico superior al de membrana NF5-A.

También se analizaron los cambios del potencial zeta en la membrana NF10-B, a través de la Figura 12 que utiliza disoluciones de cloruro de sodio.

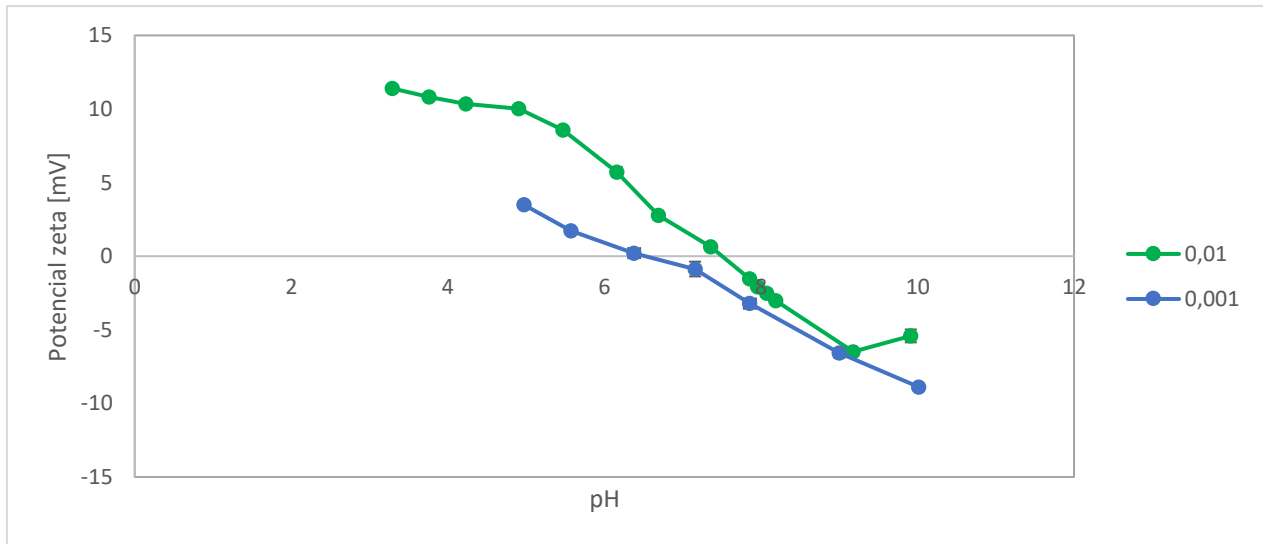


Figura 12 Prueba del potencial zeta en membrana NF10-B con disolución NaCl a distintas concentraciones M. Se ha reportado en (Ortiz-Albo et al., 2019) al aumentar la concentración de NaCl el potencial zeta es menos negativo, tal como se muestra en la Figura 12. Al aumentar la concentración de cloruro de sodio la curva aumenta su pendiente, siendo más inestable frente al cambio de pH. El punto isoeléctrico tiene un valor promedio de $7,0 \pm 0,5$. Como las membranas NF10 contienen la red polimérica negativa formada por APSA, se potencia la carga negativa de la membrana.

De igual forma se analiza de la respuesta del potencial zeta al variar el pH con una disolución de cloruro de sodio a distintas concentraciones, representado por Figura 13:

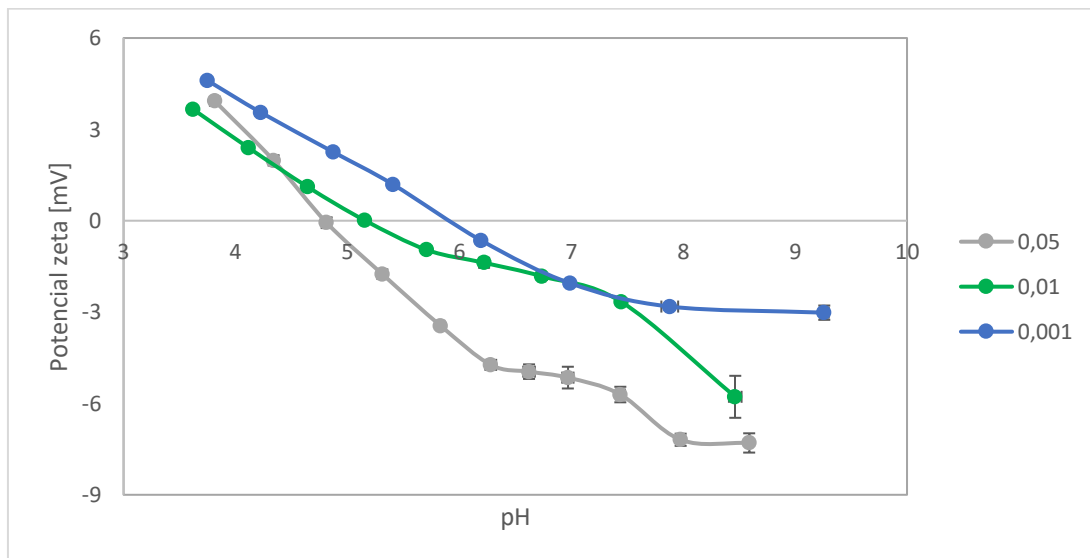


Figura 13 Prueba del potencial zeta en membrana NF10-B con disolución MgSO₄ a distintas concentraciones [M]

El efecto de la concentración en el potencial zeta reportado en (Pino-Soto et al., 2021) muestra que a mayor concentración en la solución el potencial zeta es menos negativo para iones divalentes. En el caso de esta prueba ocurre lo contrario, de acuerdo con (Su et al., 2012) este fenómeno puede ocurrir en iones divalentes pues su carga es capaz de hacer que la capa eléctrica se contraiga hacia adentro afectando directamente la caída del potencial zeta lo que eventualmente disminuye la carga de la superficie de membrana.

La concentración del sulfato de magnesio influye de manera significativa en el punto isoelectrico, a mayor concentración de disolución el punto isoelectrico tiende a un pH ácido. Y también, la concentración influye en la estabilidad de la membrana, ya que al aumentar la concentración las curvas pierden suavidad, implicando mayores cambios en la carga de la superficie de la membrana al variar el pH.

5.3 Caracterización química mediante FTIR

El objetivo del análisis es identificar los cambios químicos que se producen en la superficie de la membrana de osmosis inversa saturada, oxidada, modificada y una referencia de ultrafiltración (Figura 14). Los resultados de interés se encuentran entre las longitudes de onda de 500 a 2000 cm^{-1} donde se puede apreciar los grupos asociados a la capa activa de la membrana. Los resultados de la espectroscopia permiten diferenciar los grupos asociados a la capa activa de la membrana en las longitudes de onda de 1664, 1542 y 1610 cm^{-1} que corresponden principalmente a la amida I, amida II y enlaces de amida a los grupos aromáticos. A través de la *Figura A 1* se representa el efecto del agente oxidante en la membrana disminuyendo las señales de amida, desaparece la señal 1542 cm^{-1} atribuido principalmente por la sustitución del hidrógeno por cloro en la poliamida (Kwon & Leckie, 2006), mientras que la señal 1610 cm^{-1} asignada como la vibración del estiramiento del anillo C=C, desaparece por la cloración de los anillos aromáticos (Lawler et al., 2013).

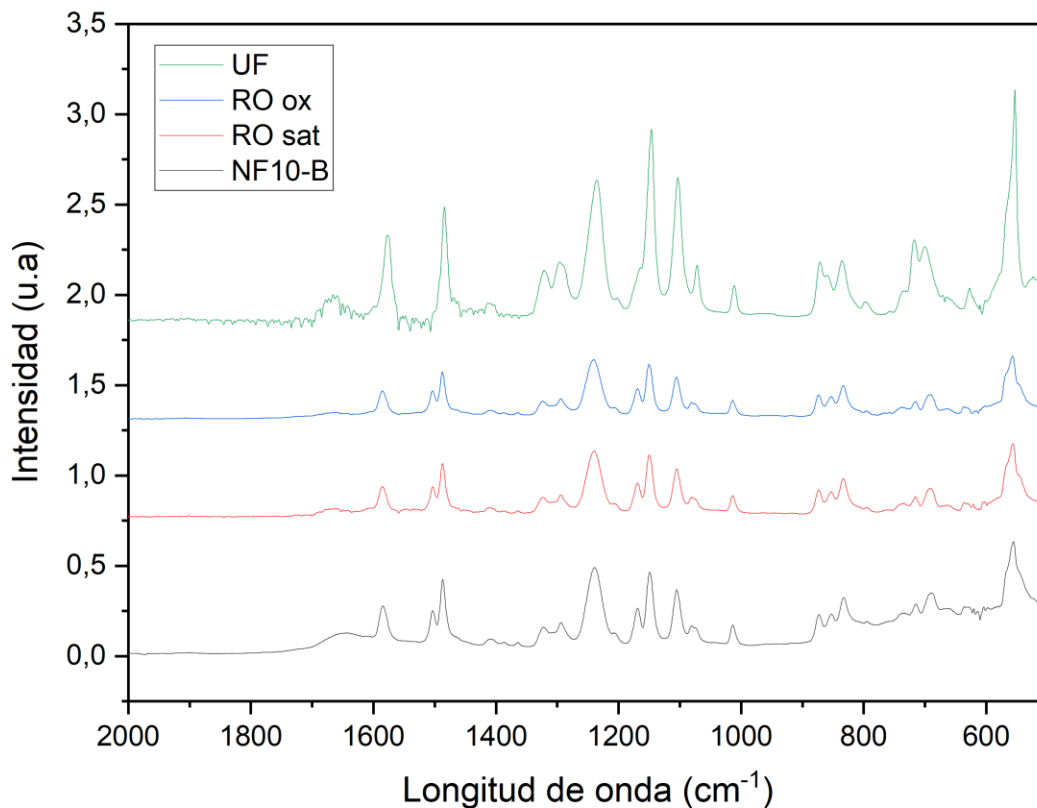


Figura 14 Espectros FTIR-ATR de las membranas de ultrafiltración (UF), membrana de osmosis inversa saturada oxidada con NaClO (RO ox), membrana de osmosis inversa saturada (RO sat) y membrana de osmosis inversa modificada (NF10-B).

Comparando las membranas NF1 se observan diferencias ligeras en la intensidad de las bandas (Figura A 2) y se presenta la señal característica del CIAPTA asignada al enlace $-N(CH_3)^+$ a 1482 cm^{-1} (Tapiero et al., 2016). Mientras que las membranas NF10 muestran diferencias en la intensidad de las bandas (Figura A 3), las bandas característica del APSA asociadas al estiramiento asimétrico y simétrico del enlace $S=O$ se deberían encontrar en las longitudes de onda 1115 cm^{-1} y 1040 cm^{-1} respectivamente (Tapiero et al., 2016), se determina que la membrana NF10-A tiene más APSA ya que tiene una intensidad más alta en el enlace asimétrico y que además, la NF10-B no presenta la señal característica del estiramiento simétrico del enlace.

6. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos de las caracterizaciones químicas y operacionales demostraron que es posible incorporar polímeros funcionales a una membrana oxidada para obtener una nueva membrana a partir de un desecho industrial de las plantas de osmosis inversa.

Se evidencia que no existe un comportamiento homogéneo al aplicar el tratamiento de limpieza y oxidación ya que la suciedad de la membrana no es homogénea y el efecto del agente oxidante tiende a reducirse de manera no uniforme. A través del análisis de permeabilidad se muestra que las membranas saturadas han sufrido un aumento en la permeabilidad en un $1830 \pm 532\%$ en comparación a las membranas recicladas y en un $274 \pm 87,4\%$ de las membranas modificadas, alcanzando permeabilidades de membranas de UF y RO respectivamente.

Al someter a las modificaciones a las pruebas de rechazo iónico se determinó que introducir un polímero catiónico en la membrana se potencia la carga negativa de esta, aumentando el rechazo iónico de la membrana, mientras que al agregar el polímero aniónico se pierde carga negativa, disminuyendo el rechazo de iones. Por esta razón las membranas sometidas a la modificación NF10 (0,2 M APSA) fueron las que obtuvieron una mayor retención de iones divalentes de la disolución de sulfato de magnesio, y también son capaces de retener iones monovalentes incluidos en la disolución de cloruro de sodio.

A través de la prueba del potencial zeta se demuestran cambios en la carga de las membranas, dando indicios de la modificación realizada. Además, a través de los análisis de espectrografía FTIR-ATR se confirma la modificación superficial por cambios en la intensidad y aparición de nuevos picos que representan enlaces característicos de las modificaciones.

Queda demostrado que es posible realizar modificaciones de las membranas recicladas para generar un producto con valor agregado que sea una alternativa viable de gestión de residuos y futuras investigaciones deben orientarse a evaluar los aspectos económicos y medio ambientales para la nueva generación de membranas a partir de desechos de plantas de OI.

7. Bibliografía

- Boda, D., & Gillespie, D. (2023). Distribution of ions between different dielectric media: Direct simulation of the Donnan equilibrium in the grand canonical ensemble. *Journal of Molecular Liquids*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123372>
- Causserand, C., Pellegrin, B., & Rouch, J. C. (2015). Effects of sodium hypochlorite exposure mode on PES/PVP ultrafiltration membrane degradation. *Water Research*, 85, 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.028>
- García-Pacheco, R., Landaburu-Aguirre, J., Molina, S., Rodríguez-Sáez, L., Teli, S. B., & García-Calvo, E. (2015). Transformation of end-of-life RO membranes into NF and UF membranes: Evaluation of membrane performance. *Journal of Membrane Science*, 495, 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.08.025>
- Goh, P. S., Lau, W. J., Othman, M. H. D., & Ismail, A. F. (2018). Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. En *Desalination* (Vol. 425, pp. 130–155). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.018>
- Herterich, J. G., Xu, Q., Field, R. W., Vella, D., & Griffiths, I. M. (2017). Optimizing the operation of a direct-flow filtration device. *Journal of Engineering Mathematics*, 104(1), 195–211. <https://doi.org/10.1007/s10665-016-9879-1>
- Kwon, Y. N., & Leckie, J. O. (2006). Hypochlorite degradation of crosslinked polyamide membranes. I. Changes in chemical/morphological properties. *Journal of Membrane Science*, 283(1–2), 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.06.008>
- Lalia, B. S., Kochkodan, V., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2013). A review on membrane fabrication: Structure, properties and performance relationship. En *Desalination* (Vol. 326, pp. 77–95). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.06.016>
- Landaburu-Aguirre, J., García-Pacheco, R., Molina, S., Rodríguez-Sáez, L., Rabadán, J., & García-Calvo, E. (2016). Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination. *Desalination*, 393, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.04.002>
- Lawler, G., Le-Clech, & Pierre. (2013). Production and characterisation of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes) Production and characterisation of UF membranes by chemical conversion of used RO membranes. *Journal of Membrane Science*, 447, 203–211. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738813005814>
- Ochando-Pulido, J. M., Martínez-Férez, A., & Stoller, M. (2019). Analysis of the flux performance of different RO/NF membranes in the treatment of agroindustrial wastewater by means of the boundary flux theory. *Membranes*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/membranes9010002>
- Ortiz-Albo, P., Ibañez, R., Urtiaga, A., & Ortiz, I. (2019). Phenomenological prediction of desalination brines nanofiltration through the indirect determination of zeta potential. *Separation and Purification Technology*, 210, 746–753. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.066>

- Osman, A. I., Chen, Z., Elgarahy, A. M., Farghali, M., Mohamed, I. M. A., Priya, A. K., Hawash, H. B., & Yap, P. (2024). Membrane Technology for Energy Saving: Principles, Techniques, Applications, Challenges, and Prospects. *Advanced Energy and Sustainability Research*. <https://doi.org/10.1002/aesr.202400011>
- Pino-Soto, L., Schwarz, A., Vargas, C., Saravia, F., Horn, H., & Bórquez, R. (2021). Influence of multivalent-electrolyte metal solutions on the superficial properties and performance of a polyamide nanofiltration membrane. *Separation and Purification Technology*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118846>
- Schwinge, J., Neal, P. R., Wiley, D. E., Fletcher, D. F., & Fane, A. G. (2004). Spiral wound modules and spacers: Review and analysis. *Journal of Membrane Science*, 242(1–2), 129–153. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.09.031>
- Solís, C. A., Vélez, C. A., & Ramírez-Navas, J. S. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre ciencia e Ingeniería*, 22, 27–36.
- Su, B., Duan, X., Dou, M., Gao, X., & Gao, C. (2012). Charge characteristics of nanofiltration membrane by streaming potential method. *Advanced Materials Research*, 396–398, 547–551. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.396-398.547>
- Tansel, B., Sager, J., Rector, T., Garland, J., Strayer, R. F., Levine, L., Roberts, M., Hummerick, M., & Bauer, J. (2006). Significance of hydrated radius and hydration shells on ionic permeability during nanofiltration in dead end and cross flow modes. *Separation and Purification Technology*, 51(1), 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.12.020>
- Tapiero, Y., Sánchez, J., & Rivas, B. L. (2016). Ion-selective interpenetrating polymer networks supported inside polypropylene microporous membranes for the removal of chromium ions from aqueous media. *Polymer Bulletin*, 73(4), 989–1013. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1531-0>
- Tapiero, Y., Sánchez, J., & Rivas, B. L. (2017). Interpenetrating polymers supported on microporous polypropylene membranes for the transport of chromium ions. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 25(7), 938–946. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2016.12.011>
- Vargas-Figueroa, C., Pino-Soto, L., Beratto-Ramos, A., Rivas, B. L., Tapiero, Y., Palacio, D. A., Melendrez, M. F., & Borquez, R. (2023). Surface Modification of Nanofiltration Membranes by Interpenetrating Polymer Networks and Their Evaluation in Water Desalination. *ACS Applied Polymer Materials*, 5(7), 4910–4920. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c00501>
- Zhang, A., Zhang, Y., Pan, G., Xu, J., Yan, H., & Liu, Y. (2017). In situ formation of copper nanoparticles in carboxylated chitosan layer: Preparation and characterization of surface modified TFC membrane with protein fouling resistance and long-lasting antibacterial properties. *Separation and Purification Technology*, 176, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.006>
- Ziolkowska, J. R. (2015). Is Desalination Affordable?—Regional Cost and Price Analysis. En *Water Resources Management* (Vol. 29, Número 5, pp. 1385–1397). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0901-y>

Anexos

Anexo 1: Tablas de permeabilidad de membranas saturadas

Tabla A 1. Permeabilidad de membrana saturada A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
4	0	0,000	15,51	0	0	-
4	1	0,017	15,73	0,22	0,00022	9,04
4	2	0,033	15,96	0,45	0,00045	9,45
4	3	0,050	16,19	0,68	0,00068	9,45
4	4	0,067	16,41	0,9	0,0009	9,04
4	5	0,083	16,63	1,12	0,00112	9,04
4	6	0,100	16,86	1,35	0,00135	9,45
7	0	0,000	6,05	0	0	-
7	1	0,017	6,4	0,35	0,00035	14,4
7	2	0,033	6,77	0,72	0,00072	15,2
7	3	0,050	7,14	1,09	0,00109	15,2
7	4	0,067	7,5	1,45	0,00145	14,8
7	5	0,083	7,86	1,81	0,00181	14,8
7	6	0,100	8,22	2,17	0,00217	14,8
10	0	0,000	10,7	0	0	-
10	1	0,017	11,21	0,51	0,00051	21,0
10	2	0,033	11,78	1,08	0,00108	23,4
10	3	0,050	12,3	1,6	0,0016	21,4
10	4	0,067	12,83	2,13	0,00213	21,8
10	5	0,083	13,36	2,66	0,00266	21,8
10	6	0,100	13,88	3,18	0,00318	21,4

Tabla A 2. Permeabilidad de membrana saturada B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
4	0	0,000	22,06	0	0	-
4	1	0,017	22,23	0,17	0,00017	6,99
4	2	0,033	22,39	0,33	0,00033	6,58
4	3	0,050	22,55	0,49	0,00049	6,58
4	4	0,067	22,71	0,65	0,00065	6,58
4	5	0,083	22,88	0,82	0,00082	6,99
4	6	0,100	23,04	0,98	0,00098	6,58
7	0	0,000	15,21	0	0	-
7	1	0,017	15,46	0,25	0,00025	10,3
7	2	0,033	15,71	0,5	0,0005	10,3
7	3	0,050	15,97	0,76	0,00076	10,7
7	4	0,067	16,23	1,02	0,00102	10,7
7	5	0,083	16,49	1,28	0,00128	10,7
7	6	0,100	16,75	1,54	0,00154	10,7
10	0	0,000	18,87	0	0	-
10	1	0,017	19,26	0,39	0,00039	16,0
10	2	0,033	19,65	0,78	0,00078	16,0
10	3	0,050	20,03	1,16	0,00116	15,6
10	4	0,067	20,41	1,54	0,00154	15,6
10	5	0,083	20,8	1,93	0,00193	16,0
10	6	0,100	21,19	2,32	0,00232	16,0

Anexo 2: Tablas de permeabilidad de membranas recicladas

Tabla A 3. Permeabilidad en Membrana NF1-Re-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	72,02	0	0	-
2	1	0,017	74,5	2,48	0,00248	102
2	2	0,033	76,87	4,85	0,00485	97,4
2	3	0,050	79,23	7,21	0,00721	97,0
2	4	0,067	81,55	9,53	0,00953	95,3
2	5	0,083	83,83	11,81	0,01181	93,7
2	6	0,100	86,02	14	0,014	90,0
3	0	0,000	46,5	0	0	-
3	1	0,017	49,99	3,49	0,00349	143
3	2	0,033	53,35	6,85	0,00685	138
3	3	0,050	56,54	10,04	0,01004	131
3	4	0,067	59,87	13,37	0,01337	137
3	5	0,083	62,93	16,43	0,01643	126
3	6	0,100	66,04	19,54	0,01954	128
5	0	0,000	7	0	0	-
5	1	0,017	12,88	5,88	0,00588	242
5	2	0,033	18,56	11,56	0,01156	233
5	3	0,050	24	17	0,017	224
5	4	0,067	29,46	22,46	0,02246	224
5	5	0,083	34,76	27,76	0,02776	218
5	6	0,100	40,25	33,25	0,03325	226
7	0	0,000	64,67	0	0	-
7	1	0,017	72,86	8,19	0,00819	337
7	2	0,033	80,82	16,15	0,01615	327
7	3	0,050	88,53	23,86	0,02386	317
7	4	0,067	96,13	31,46	0,03146	312
7	5	0,083	103,51	38,84	0,03884	303
7	6	0,100	110,81	46,14	0,04614	300

Tabla A 4. Permeabilidad en Membrana NF1-Re-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	43,25	0	0	-
2	1	0,017	45,5	2,25	0,00225	92,5
2	2	0,033	47,7	4,45	0,00445	90,4
2	3	0,050	49,88	6,63	0,00663	89,6
2	4	0,067	51,96	8,71	0,00871	85,5
2	5	0,083	54,03	10,78	0,01078	85,1
2	6	0,100	55,91	12,66	0,01266	77,3
3	0	0,000	16	0	0	-
3	1	0,017	19,39	3,39	0,00339	139
3	2	0,033	22,63	6,63	0,00663	133
3	3	0,050	25,75	9,75	0,00975	128
3	4	0,067	28,81	12,81	0,01281	126
3	5	0,083	31,74	15,74	0,01574	120
3	6	0,100	34,74	18,74	0,01874	123
5	0	0,000	102,96	0	0	-
5	1	0,017	109,28	6,32	0,00632	260
5	2	0,033	115,51	12,55	0,01255	256
5	3	0,050	121,43	18,47	0,01847	243
5	4	0,067	127,47	24,51	0,02451	248
5	5	0,083	133,38	30,42	0,03042	243
5	6	0,100	138,97	36,01	0,03601	230
7	0	0,000	20,4	0	0	-
7	1	0,017	30,88	10,48	0,01048	431
7	2	0,033	40,99	20,59	0,02059	415
7	3	0,050	50,92	30,52	0,03052	408
7	4	0,067	60,58	40,18	0,04018	397
7	5	0,083	69,92	49,52	0,04952	384
7	6	0,100	79	58,6	0,0586	373

Tabla A 5. Permeabilidad en Membrana NF2-Re-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	58,63	0	0	-
2	1	0,017	61,27	2,64	0,00264	108
2	2	0,033	63,99	5,36	0,00536	112
2	3	0,050	66,71	8,08	0,00808	112
2	4	0,067	69,43	10,8	0,0108	112
2	5	0,083	72,12	13,49	0,01349	111
2	6	0,100	74,83	16,2	0,0162	111
5	0	0,000	53,03	0	0	-
5	1	0,017	57,25	4,22	0,00422	173
5	2	0,033	61,41	8,38	0,00838	171
5	3	0,050	65,51	12,48	0,01248	168
5	4	0,067	69,64	16,61	0,01661	170
5	5	0,083	73,75	20,72	0,02072	169
5	6	0,100	77,89	24,86	0,02486	170
8	0	0,000	45,57	0	0	-
8	1	0,017	52,54	6,97	0,00697	286
8	2	0,033	59,62	14,05	0,01405	291
8	3	0,050	66,83	21,26	0,02126	296
8	4	0,067	73,43	27,86	0,02786	271
8	5	0,083	79,89	34,32	0,03432	265
8	6	0,100	84,64	39,07	0,03907	195

Tabla A 6. Permeabilidad en Membrana NF2-Re-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	17,5	0	0	-
2	1	0,017	20,27	2,77	0,00277	114
2	2	0,033	22,99	5,49	0,00549	112
2	3	0,050	25,63	8,13	0,00813	108
2	4	0,067	28,31	10,81	0,01081	110
2	5	0,083	30,96	13,46	0,01346	109
2	6	0,100	33,57	16,07	0,01607	107
5	0	0,000	51	0	0	-
5	1	0,017	57,04	6,04	0,00604	248
5	2	0,033	62,93	11,93	0,01193	242
5	3	0,050	68,67	17,67	0,01767	236
5	4	0,067	74,49	23,49	0,02349	239
5	5	0,083	80,03	29,03	0,02903	228
5	6	0,100	85,57	34,57	0,03457	228
8	0	0,000	100,43	0	0	-
8	1	0,017	110,27	9,84	0,00984	404
8	2	0,033	119,85	19,42	0,01942	394
8	3	0,050	129,06	28,63	0,02863	378
8	4	0,067	138,12	37,69	0,03769	372
8	5	0,083	146,79	46,36	0,04636	356
8	6	0,100	155,19	54,76	0,05476	345

Tabla A 7. Permeabilidad en Membrana NF5-Re-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	47	0	0	-
2	1	0,017	49,17	2,17	0,00217	89,2
2	2	0,033	51,28	4,28	0,00428	86,7
2	3	0,050	53,17	6,17	0,00617	77,7
2	4	0,067	55,21	8,21	0,00821	83,8
2	5	0,083	57,24	10,24	0,01024	83,4
2	6	0,100	59,23	12,23	0,01223	81,8
4	0	0,000	54,04	0	0	-
4	1	0,017	57,67	3,63	0,00363	149
4	2	0,033	61,24	7,2	0,0072	147
4	3	0,050	64,78	10,74	0,01074	145
4	4	0,067	68,29	14,25	0,01425	144
4	5	0,083	70,53	16,49	0,01649	92,1
4	6	0,100	72,61	18,57	0,01857	85,6
8	0	0,000	98,45	0	0	-
8	1	0,017	104,04	5,59	0,00559	230
8	2	0,033	109,47	11,02	0,01102	223
8	3	0,050	114,76	16,31	0,01631	217
8	4	0,067	120,04	21,59	0,02159	217
8	5	0,083	125,21	26,76	0,02676	212
8	6	0,100	130,05	31,6	0,0316	199

Tabla A 8. Permeabilidad en Membrana NF5-Re-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	125	0	0	-
2	1	0,017	127,96	2,96	0,00296	122
2	2	0,033	130,76	5,76	0,00576	115
2	3	0,050	133,56	8,56	0,00856	115
2	4	0,067	136,26	11,26	0,01126	111
2	5	0,083	138,97	13,97	0,01397	111
2	6	0,100	141,63	16,63	0,01663	109
4	0	0,000	89,01	0	0	-
4	1	0,017	92,9	3,89	0,00389	160
4	2	0,033	97,53	8,52	0,00852	190
4	3	0,050	101,54	12,53	0,01253	165
4	4	0,067	105,47	16,46	0,01646	162
4	5	0,083	109,43	20,42	0,02042	163
4	6	0,100	113,15	24,14	0,02414	153
8	0	0,000	36	0	0	-
8	1	0,017	43,29	7,29	0,00729	300
8	2	0,033	50,52	14,52	0,01452	297
8	3	0,050	58,27	22,27	0,02227	318
8	4	0,067	64,57	28,57	0,02857	259
8	5	0,083	71,83	35,83	0,03583	298
8	6	0,100	78,43	42,43	0,04243	271

Tabla A 9. Permeabilidad en Membrana NF7-Re-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	76,51	0	0,0000	-
2	1	0,017	78,18	1,67	0,0017	68,6
2	2	0,033	79,82	3,31	0,0033	67,4
2	3	0,050	81,42	4,91	0,0049	65,8
2	4	0,067	83,06	6,55	0,0066	67,4
2	5	0,083	84,64	8,13	0,0081	64,9
2	6	0,100	86,19	9,68	0,0097	63,7
5	0	0,000	54,3	0	0,0000	-
5	1	0,017	57,49	3,19	0,0032	131
5	2	0,033	60,62	6,32	0,0063	129
5	3	0,050	63,79	9,49	0,0095	130
5	4	0,067	66,84	12,54	0,0125	125
5	5	0,083	69,84	15,54	0,0155	123
5	6	0,100	72,82	18,52	0,0185	122
8	0	0,000	19,25	0	0,0000	-
8	1	0,017	23,63	4,38	0,0044	180
8	2	0,033	27,85	8,6	0,0086	173
8	3	0,050	32	12,75	0,0128	171
8	4	0,067	36,13	16,88	0,0169	170
8	5	0,083	40,16	20,91	0,0209	166
8	6	0,100	44,18	24,93	0,0249	165

Tabla A 10. Permeabilidad en Membrana NF7-Re-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	131,5	0	0,0000	-
2	1	0,017	132,62	1,12	0,0011	46,0
2	2	0,033	133,76	2,26	0,0023	46,8
2	3	0,050	134,85	3,35	0,0033	44,8
2	4	0,067	135,98	4,48	0,0045	46,4
2	5	0,083	136,98	5,48	0,0055	41,1
2	6	0,100	138,07	6,57	0,0066	44,8
5	0	0,000	56,6	0	0,0000	-
5	1	0,017	58,9	2,3	0,0023	94,5
5	2	0,033	61,53	4,93	0,0049	108
5	3	0,050	63,72	7,12	0,0071	90,0
5	4	0,067	66,11	9,51	0,0095	98,2
5	5	0,083	68,63	12,03	0,0120	104
5	6	0,100	70,98	14,38	0,0144	96,6
8	0	0,000	104	0	0,0000	-
8	1	0,017	107,41	3,41	0,0034	140
8	2	0,033	111,4	7,4	0,0074	164
8	3	0,050	115	11	0,0110	148
8	4	0,067	118,66	14,66	0,0147	150
8	5	0,083	122,27	18,27	0,0183	148
8	6	0,100	125,78	21,78	0,0218	144

Tabla A 11. Permeabilidad en Membrana NF9-Re-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	14,6	0	0	-
2	1	0,017	17,37	2,77	0,00277	114
2	2	0,033	20,14	5,54	0,00554	114
2	3	0,050	22,88	8,28	0,00828	113
2	4	0,067	25,63	11,03	0,01103	113
2	5	0,083	28,38	13,78	0,01378	113
2	6	0,100	31,06	16,46	0,01646	110
5	0	0,000	130,45	0	0	-
5	1	0,017	138,37	7,92	0,00792	325
5	2	0,033	146,21	15,76	0,01576	322
5	3	0,050	153,21	22,76	0,02276	288
5	4	0,067	160,67	30,22	0,03022	307
5	5	0,083	168,21	37,76	0,03776	310
5	6	0,100	175,76	45,31	0,04531	310
8	0	0,000	40,72	0	0	-
8	1	0,017	50,24	9,52	0,00952	391
8	2	0,033	59,49	18,77	0,01877	380
8	3	0,050	68,97	28,25	0,02825	390
8	4	0,067	77,75	37,03	0,03703	361
8	5	0,083	87,35	46,63	0,04663	395
8	6	0,100	94,76	54,04	0,05404	305

Tabla A 12. Permeabilidad en Membrana NF9-Re-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	15,29	0	0	-
2	1	0,017	18,88	3,59	0,00359	148
2	2	0,033	22,27	6,98	0,00698	139
2	3	0,050	25,61	10,32	0,01032	137
2	4	0,067	28,73	13,44	0,01344	128
2	5	0,083	31,84	16,55	0,01655	128
2	6	0,100	34,77	19,48	0,01948	120
5	0	0,000	100,11	0	0	-
5	1	0,017	108,34	8,23	0,00823	338
5	2	0,033	116,18	16,07	0,01607	322
5	3	0,050	123,78	23,67	0,02367	312
5	4	0,067	131,11	31	0,031	301
5	5	0,083	138,31	38,2	0,0382	296
5	6	0,100	145,35	45,24	0,04524	289
8	0	0,000	59,1	0	0	-
8	1	0,017	68,68	9,58	0,00958	394
8	2	0,033	77,81	18,71	0,01871	375
8	3	0,050	86,82	27,72	0,02772	370
8	4	0,067	95,75	36,65	0,03665	367
8	5	0,083	104,56	45,46	0,04546	362
8	6	0,100	113,17	54,07	0,05407	354

Tabla A 13. Permeabilidad en Membrana NF10-Re-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	64,62	0	0	-
2	1	0,017	65,74	1,12	0,00112	46,0
2	2	0,033	66,88	2,26	0,00226	46,8
2	3	0,050	68	3,38	0,00338	46,0
2	4	0,067	69,11	4,49	0,00449	45,6
2	5	0,083	70,24	5,62	0,00562	46,4
2	6	0,100	71,38	6,76	0,00676	46,8
3	0	0,000	49,6	0	0	-
3	1	0,017	51,03	1,43	0,00143	58,8
3	2	0,033	52,43	2,83	0,00283	57,5
3	3	0,050	53,82	4,22	0,00422	57,1
3	4	0,067	55,18	5,58	0,00558	55,9
3	5	0,083	56,6	7	0,007	58,4
3	6	0,100	57,9	8,3	0,0083	53,4
5	0	0,000	25,5	0	0	-
5	1	0,017	27,92	2,42	0,00242	99,5
5	2	0,033	30,31	4,81	0,00481	98,2
5	3	0,050	32,63	7,13	0,00713	95,3
5	4	0,067	34,94	9,44	0,00944	94,9
5	5	0,083	37,21	11,71	0,01171	93,3
5	6	0,100	39,55	14,05	0,01405	96,2
7	0	0,000	145	0	0	-
7	1	0,017	148,23	3,23	0,00323	133
7	2	0,033	151,51	6,51	0,00651	135
7	3	0,050	154,7	9,7	0,0097	131
7	4	0,067	157,81	12,81	0,01281	128
7	5	0,083	160,74	15,74	0,01574	120
7	6	0,100	163,89	18,89	0,01889	129

Tabla A 14. Permeabilidad en Membrana NF10-Re-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	32,62	0	0	-
2	1	0,017	34,34	1,72	0,00172	70,7
2	2	0,033	35,89	3,27	0,00327	63,7
2	3	0,050	37,43	4,81	0,00481	63,3
2	4	0,067	38,96	6,34	0,00634	62,9
2	5	0,083	40,49	7,87	0,00787	62,9
2	6	0,100	41,98	9,36	0,00936	61,2
3	0	0,000	12	0	0	-
3	1	0,017	14,45	2,45	0,00245	101
3	2	0,033	16,79	4,79	0,00479	96,2
3	3	0,050	19,11	7,11	0,00711	95,3
3	4	0,067	21,16	9,16	0,00916	84,2
3	5	0,083	23,51	11,51	0,01151	96,6
3	6	0,100	25,61	13,61	0,01361	86,3
5	0	0,000	33	0	0	-
5	1	0,017	38,28	5,28	0,00528	217
5	2	0,033	43,53	10,53	0,01053	216
5	3	0,050	48,57	15,57	0,01557	207
5	4	0,067	53,63	20,63	0,02063	208
5	5	0,083	58,72	25,72	0,02572	209
5	6	0,100	63,67	30,67	0,03067	203
7	0	0,000	74,5	0	0	-
7	1	0,017	82,17	7,67	0,00767	315
7	2	0,033	89,17	14,67	0,01467	288
7	3	0,050	96,43	21,93	0,02193	298
7	4	0,067	103,97	29,47	0,02947	310
7	5	0,083	111,03	36,53	0,03653	290
7	6	0,100	117,93	43,43	0,04343	284

Anexo 3: Tablas de permeabilidad de las membranas modificadas

Tabla A 15. Permeabilidad en Membrana NF1-Mo-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	127,5	0	0	-
2	1	0,017	127,94	0,44	0,00044	18,1
2	2	0,033	128,4	0,9	0,0009	18,9
2	3	0,050	128,86	1,36	0,00136	18,9
2	4	0,067	129,33	1,83	0,00183	19,3
2	5	0,083	129,76	2,26	0,00226	17,7
2	6	0,100	130,22	2,72	0,00272	18,9
3	0	0,000	121,51	0	0	-
3	1	0,017	122,15	0,64	0,00064	26,3
3	2	0,033	122,77	1,26	0,00126	25,5
3	3	0,050	123,38	1,87	0,00187	25,1
3	4	0,067	123,98	2,47	0,00247	24,7
3	5	0,083	124,59	3,08	0,00308	25,1
3	6	0,100	125,2	3,69	0,00369	25,1
5	0	0,000	112,5	0	0	-
5	1	0,017	113,52	1,02	0,00102	41,9
5	2	0,033	114,51	2,01	0,00201	40,7
5	3	0,050	115,45	2,95	0,00295	38,6
5	4	0,067	116,41	3,91	0,00391	39,5
5	5	0,083	117,33	4,83	0,00483	37,8
5	6	0,100	118,22	5,72	0,00572	36,6
7	0	0,000	97	0	0	-
7	1	0,017	99,08	2,08	0,00208	85,5
7	2	0,033	100,99	3,99	0,00399	78,5
7	3	0,050	102,74	5,74	0,00574	71,9
7	4	0,067	104,36	7,36	0,00736	66,6
7	5	0,083	105,96	8,96	0,00896	65,8
7	6	0,100	107,39	10,39	0,01039	58,8

Tabla A 16. Permeabilidad en Membrana NF1-Mo-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	33,75	0	0	-
2	1	0,017	34,01	0,26	0,00026	10,7
2	2	0,033	34,29	0,54	0,00054	11,5
2	3	0,050	34,55	0,8	0,0008	10,7
2	4	0,067	34,81	1,06	0,00106	10,7
2	5	0,083	35,08	1,33	0,00133	11, 1
2	6	0,100	35,35	1,6	0,0016	11, 1
3	0	0,000	29,6	0	0	-
3	1	0,017	30,07	0,47	0,00047	19,3
3	2	0,033	30,54	0,94	0,00094	19,3
3	3	0,050	30,99	1,39	0,00139	18,5
3	4	0,067	31,44	1,84	0,00184	18,5
3	5	0,083	31,94	2,34	0,00234	20,5
3	6	0,100	32,37	2,77	0,00277	17,7
5	0	0,000	23,3	0	0	-
5	1	0,017	24,04	0,74	0,00074	30,4
5	2	0,033	24,74	1,44	0,00144	28,8
5	3	0,050	25,45	2,15	0,00215	29,2
5	4	0,067	26,16	2,86	0,00286	29,2
5	5	0,083	26,83	3,53	0,00353	27,5
5	6	0,100	27,54	4,24	0,00424	29,2
7	0	0,000	15,5	0	0	-
7	1	0,017	16,52	1,02	0,00102	41,9
7	2	0,033	17,53	2,03	0,00203	41,5
7	3	0,050	18,52	3,02	0,00302	40,7
7	4	0,067	19,49	3,99	0,00399	39,7
7	5	0,083	20,51	5,01	0,00501	41,9
7	6	0,100	21,49	5,99	0,00599	40,3

Tabla A 17. Permeabilidad en Membrana NF2-Mo-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	19,1	0	0	-
2	1	0,017	19,33	0,23	0,00023	9,45
2	2	0,033	19,55	0,45	0,00045	9,04
2	3	0,050	19,76	0,66	0,00066	8,63
2	4	0,067	19,96	0,86	0,00086	8,22
2	5	0,083	20,17	1,07	0,00107	8,63
2	6	0,100	20,39	1,29	0,00129	9,04
5	0	0,000	14,88	0	0	-
5	1	0,017	15,4	0,52	0,00052	21,4
5	2	0,033	15,9	1,02	0,00102	20,5
5	3	0,050	16,42	1,54	0,00154	21,4
5	4	0,067	16,9	2,02	0,00202	19,7
5	5	0,083	17,38	2,5	0,0025	19,7
5	6	0,100	17,88	3	0,003	20,5
8	0	0,000	8,13	0	0	-
8	1	0,017	8,91	0,78	0,00078	32,1
8	2	0,033	9,7	1,57	0,00157	32,5
8	3	0,050	10,49	2,36	0,00236	32,5
8	4	0,067	11,29	3,16	0,00316	32,9
8	5	0,083	12,06	3,93	0,00393	31,6
8	6	0,100	12,83	4,7	0,0047	31,6

Tabla A 18. Permeabilidad en Membrana NF2-Mo-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	9,28	0	0	-
2	1	0,017	9,4	0,12	0,00012	4,93
2	2	0,033	9,55	0,27	0,00027	6,16
2	3	0,050	9,71	0,43	0,00043	6,58
2	4	0,067	9,86	0,58	0,00058	6,16
2	5	0,083	10,01	0,73	0,00073	6,16
2	6	0,100	10,16	0,88	0,00088	6,16
5	0	0,000	6,7	0	0	-
5	1	0,017	6,93	0,23	0,00023	9,45
5	2	0,033	7,2	0,5	0,0005	11,1
5	3	0,050	7,49	0,79	0,00079	11,9
5	4	0,067	7,78	1,08	0,00108	11,9
5	5	0,083	8,06	1,36	0,00136	11,5
5	6	0,100	8,35	1,65	0,00165	11,9
8	0	0,000	1,84	0	0	-
8	1	0,017	2,36	0,52	0,00052	21,4
8	2	0,033	2,88	1,04	0,00104	21,4
8	3	0,050	3,37	1,53	0,00153	20,1
8	4	0,067	3,85	2,01	0,00201	19,7
8	5	0,083	4,31	2,47	0,00247	18,9
8	6	0,100	4,77	2,93	0,00293	18,9

Tabla A 19. Permeabilidad en Membrana NF5-Mo-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	29,6	0	0	-
2	1	0,017	30,02	0,42	0,00042	17,3
2	2	0,033	30,47	0,87	0,00087	18,5
2	3	0,050	30,89	1,29	0,00129	17,3
2	4	0,067	31,33	1,73	0,00173	18,1
2	5	0,083	31,77	2,17	0,00217	18,1
2	6	0,100	32,19	2,59	0,00259	17,3
5	0	0,000	23,3	0	0	-
5	1	0,017	24,04	0,74	0,00074	30,4
5	2	0,033	24,74	1,44	0,00144	28,8
5	3	0,050	25,45	2,15	0,00215	29,2
5	4	0,067	26,16	2,86	0,00286	29,2
5	5	0,083	26,86	3,56	0,00356	28,8
5	6	0,100	27,54	4,24	0,00424	27,9
8	0	0,000	15,5	0	0	-
8	1	0,017	16,52	1,02	0,00102	41,9
8	2	0,033	17,53	2,03	0,00203	41,5
8	3	0,050	18,52	3,02	0,00302	40,7
8	4	0,067	19,57	4,07	0,00407	43,2
8	5	0,083	20,61	5,11	0,00511	42,7
8	6	0,100	21,67	6,17	0,00617	43,6

Tabla A 20. Permeabilidad en Membrana NF5-Mo-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	76,55	0	0	-
2	1	0,017	77,08	0,53	0,00053	21,8
2	2	0,033	77,62	1,07	0,00107	22,2
2	3	0,050	78,15	1,6	0,0016	21,8
2	4	0,067	78,68	2,13	0,00213	21,8
2	5	0,083	79,2	2,65	0,00265	21,4
2	6	0,100	79,73	3,18	0,00318	21,8
4	0	0,000	67,01	0	0	-
4	1	0,017	68,1	1,09	0,00109	44,8
4	2	0,033	69,16	2,15	0,00215	43,6
4	3	0,050	70,2	3,19	0,00319	42,7
4	4	0,067	71,24	4,23	0,00423	42,7
4	5	0,083	72,28	5,27	0,00527	42,7
4	6	0,100	73,31	6,3	0,0063	42,3
6	0	0,000	51,28	0	0	-
6	1	0,017	53,03	1,75	0,00175	71,9
6	2	0,033	54,74	3,46	0,00346	70,3
6	3	0,050	56,45	5,17	0,00517	70,3
6	4	0,067	58,13	6,85	0,00685	69,0
6	5	0,083	59,8	8,52	0,00852	68,6
6	6	0,100	61,46	10,18	0,01018	68,2

Tabla A 21. Permeabilidad en Membrana NF7-Mo-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	Δ Peso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	69,9	0	0	-
2	1	0,017	70,49	0,59	0,00059	24,2
2	2	0,033	71,01	1,11	0,00111	21,4
2	3	0,050	71,57	1,67	0,00167	23,0
2	4	0,067	72,12	2,22	0,00222	22,6
2	5	0,083	72,67	2,77	0,00277	22,6
2	6	0,100	73,23	3,33	0,00333	23,0
5	0	0,000	60	0	0	-
5	1	0,017	61,1	1,1	0,0011	45,2
5	2	0,033	62,23	2,23	0,00223	46,4
5	3	0,050	63,32	3,32	0,00332	44,8
5	4	0,067	64,43	4,43	0,00443	45,6
5	5	0,083	65,52	5,52	0,00552	44,8
5	6	0,100	66,54	6,54	0,00654	41,9
8	0	0,000	43,06	0	0	-
8	1	0,017	44,99	1,93	0,00193	79,3
8	2	0,033	46,89	3,83	0,00383	78,1
8	3	0,050	48,73	5,67	0,00567	75,6
8	4	0,067	50,57	7,51	0,00751	75,6
8	5	0,083	52,34	9,28	0,00928	72,7
8	6	0,100	54,17	11,11	0,01111	75,2

Tabla A 22. Permeabilidad en Membrana NF7-Mo-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	30,53	0	0	-
2	1	0,017	30,88	0,35	0,00035	14,4
2	2	0,033	31,28	0,75	0,00075	16,4
2	3	0,050	31,67	1,14	0,00114	16,0
2	4	0,067	32,06	1,53	0,00153	16,0
2	5	0,083	32,46	1,93	0,00193	16,4
2	6	0,100	32,82	2,29	0,00229	14,8
5	0	0,000	22,7	0	0	-
5	1	0,017	23,55	0,85	0,00085	34,9
5	2	0,033	24,37	1,67	0,00167	33,7
5	3	0,050	25,19	2,49	0,00249	33,7
5	4	0,067	25,97	3,27	0,00327	32,1
5	5	0,083	26,78	4,08	0,00408	33,3
5	6	0,100	27,56	4,86	0,00486	32,1
8	0	0,000	9,76	0	0	-
8	1	0,017	11,08	1,32	0,00132	54,2
8	2	0,033	12,4	2,64	0,00264	54,2
8	3	0,050	13,68	3,92	0,00392	52,6
8	4	0,067	14,96	5,2	0,0052	52,6
8	5	0,083	16,22	6,46	0,00646	51,8
8	6	0,100	17,55	7,79	0,00779	54,7

Tabla A 23. Permeabilidad en Membrana NF9-Mo-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	82,7	0	0	-
2	1	0,017	83,44	0,74	0,00074	30,4
2	2	0,033	84,29	1,59	0,00159	34,9
2	3	0,050	85,18	2,48	0,00248	36,7
2	4	0,067	85,96	3,26	0,00326	32,1
2	5	0,083	86,8	4,1	0,0041	34,5
2	6	0,100	87,59	4,89	0,00489	32,5
5	0	0,000	68,2	0	0	-
5	1	0,017	69,88	1,68	0,00168	69,0
5	2	0,033	71,57	3,37	0,00337	69,5
5	3	0,050	73,27	5,07	0,00507	69,9
5	4	0,067	74,99	6,79	0,00679	70,7
5	5	0,083	76,72	8,52	0,00852	71,1
5	6	0,100	78,36	10,16	0,01016	67,4
8	0	0,000	42,04	0	0	-
8	1	0,017	44,98	2,94	0,00294	121
8	2	0,033	47,87	5,83	0,00583	119
8	3	0,050	50,7	8,66	0,00866	116
8	4	0,067	53,57	11,53	0,01153	118
8	5	0,083	56,33	14,29	0,01429	113
8	6	0,100	59,17	17,13	0,01713	117

Tabla A 24. Permeabilidad en Membrana NF9-Mo-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	16,28	0	0	-
2	1	0,017	16,62	0,34	0,00034	14,0
2	2	0,033	16,94	0,66	0,00066	13,2
2	3	0,050	17,28	1	0,001	14,0
2	4	0,067	17,6	1,32	0,00132	13,2
2	5	0,083	17,94	1,66	0,00166	14,0
2	6	0,100	18,26	1,98	0,00198	13,2
5	0	0,000	10,25	0	0	-
5	1	0,017	10,92	0,67	0,00067	27,5
5	2	0,033	11,58	1,33	0,00133	27,1
5	3	0,050	12,23	1,98	0,00198	26,7
5	4	0,067	12,9	2,65	0,00265	27,5
5	5	0,083	13,6	3,35	0,00335	28,8
5	6	0,100	14,25	4	0,004	26,7
8	0	0,000	0,4	0	0	-
8	1	0,017	1,48	1,08	0,00108	44,4
8	2	0,033	2,53	2,13	0,00213	43,2
8	3	0,050	3,57	3,17	0,00317	42,7
8	4	0,067	4,59	4,19	0,00419	41,9
8	5	0,083	5,62	5,22	0,00522	42,3
8	6	0,100	6,57	6,17	0,00617	39,0

Tabla A 25. Permeabilidad en Membrana NF10-Mo-A

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m2 h)
2	0	0,000	42,01	0	0	-
2	1	0,017	42,21	0,2	0,0002	8,22
2	2	0,033	42,42	0,41	0,00041	8,63
2	3	0,050	42,62	0,61	0,00061	8,22
2	4	0,067	42,84	0,83	0,00083	9,04
2	5	0,083	43,05	1,04	0,00104	8,63
2	6	0,100	43,25	1,24	0,00124	8,22
3	0	0,000	39,25	0	0	-
3	1	0,017	39,56	0,31	0,00031	12,7
3	2	0,033	39,86	0,61	0,00061	12,3
3	3	0,050	40,17	0,92	0,00092	12,7
3	4	0,067	40,47	1,22	0,00122	12,3
3	5	0,083	40,77	1,52	0,00152	12,3
3	6	0,100	41,08	1,83	0,00183	12,7
5	0	0,000	34,55	0	0	-
5	1	0,017	35,05	0,5	0,0005	20,5
5	2	0,033	35,55	1	0,001	20,5
5	3	0,050	36,05	1,5	0,0015	20,5
5	4	0,067	36,55	2	0,002	20,5
5	5	0,083	37,05	2,5	0,0025	20,5
5	6	0,100	37,53	2,98	0,00298	19,7
7	0	0,000	27,25	0	0	-
7	1	0,017	27,96	0,71	0,00071	29,2
7	2	0,033	28,64	1,39	0,00139	27,9
7	3	0,050	29,31	2,06	0,00206	27,5
7	4	0,067	30,01	2,76	0,00276	28,8
7	5	0,083	30,7	3,45	0,00345	28,4
7	6	0,100	31,36	4,11	0,00411	27,1

Tabla A 26. Permeabilidad en Membrana NF10-Mo-B

Presión (bar)	Tiempo (min)	Tiempo (h)	Peso (mg)	ΔPeso (mg)	Volumen (L)	Jp (L/ m ² h)
2	0	0,000	67,25	0	0	-
2	1	0,017	67,81	0,56	0,00056	23,0
2	2	0,033	68,38	1,13	0,00113	23,4
2	3	0,050	68,94	1,69	0,00169	23,0
2	4	0,067	69,49	2,24	0,00224	22,6
2	5	0,083	70,04	2,79	0,00279	22,6
2	6	0,100	70,6	3,35	0,00335	23,0
3	0	0,000	60,55	0	0	-
3	1	0,017	61,25	0,7	0,0007	28,8
3	2	0,033	61,95	1,4	0,0014	28,8
3	3	0,050	62,63	2,08	0,00208	27,9
3	4	0,067	63,31	2,76	0,00276	27,9
3	5	0,083	63,99	3,44	0,00344	27,9
3	6	0,100	64,69	4,14	0,00414	28,8
5	0	0,000	48,5	0	0	-
5	1	0,017	49,79	1,29	0,00129	53,0
5	2	0,033	51,04	2,54	0,00254	51,4
5	3	0,050	52,27	3,77	0,00377	50,5
5	4	0,067	53,51	5,01	0,00501	51,0
5	5	0,083	54,73	6,23	0,00623	50,1
5	6	0,100	55,95	7,45	0,00745	50,1
7	0	0,000	31,5	0	0	-
7	1	0,017	33,29	1,79	0,00179	73,6
7	2	0,033	35,05	3,55	0,00355	72,3
7	3	0,050	36,78	5,28	0,00528	71,1
7	4	0,067	38,5	7	0,007	70,7
7	5	0,083	40,23	8,73	0,00873	71,1
7	6	0,100	41,96	10,46	0,01046	71,1

Anexo 4: Tablas de constante de permeabilidad hidráulica

Tabla A 27. Constantes de permeabilidad de las membranas recicladas

Membrana oxidada	k_p	R^2
NF1	50,4	0,994
NF2	38,2	0,989
NF5	29,6	0,967
NF7	19,7	0,986
NF9	47,5	0,953
NF10	31,0	0,993

Tabla A 28. Constante de permeabilidad de las membranas modificadas

Membrana modificada	k_p	R^2
NF1	7,56	0,989
NF2	3,20	0,998
NF5	6,76	0,988
NF7	7,84	0,996
NF9	9,76	0,997
NF10	7,08	0,998

Anexo 5: Tablas de conductividad de permeado

Tabla A 29 Conductividad del permeado de disolución de sulfato de magnesio

Membrana	Conductividad $\mu\text{S/cm}$		
	3 bar	5 bar	8 bar
NF1-A	992	953	917
NF1-B	939	918	877
NF2-A	1020	1026	1035
NF2-B	972	980	987
NF5-A	956	953	947
NF5-B	947	953	956
NF7-A	1033	1042	1054
NF7-B	1030	1041	1050
NF9-A	990	997	1047
NF9-B	960	968	995
NF10-A	734	803	836
NF10-B	458	518	541

Tabla A 30 Conductividad del permeado de disolución de cloruro de sodio

Membrana	Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$		
	3 bar	5 bar	8 bar
NF10-A	1000	960	950
NF10-B	678	630	625

Anexo 5: Comparaciones FTIR entre membranas

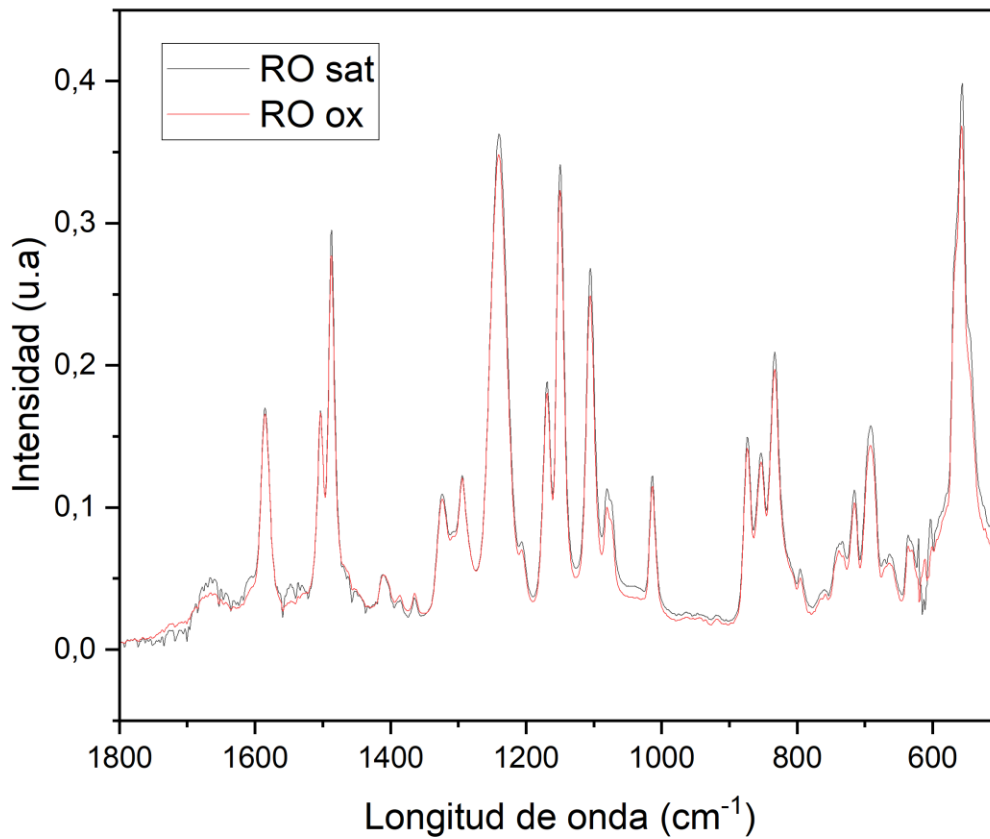


Figura A 1 Comparación FTIR entre membrana oxidada y saturada

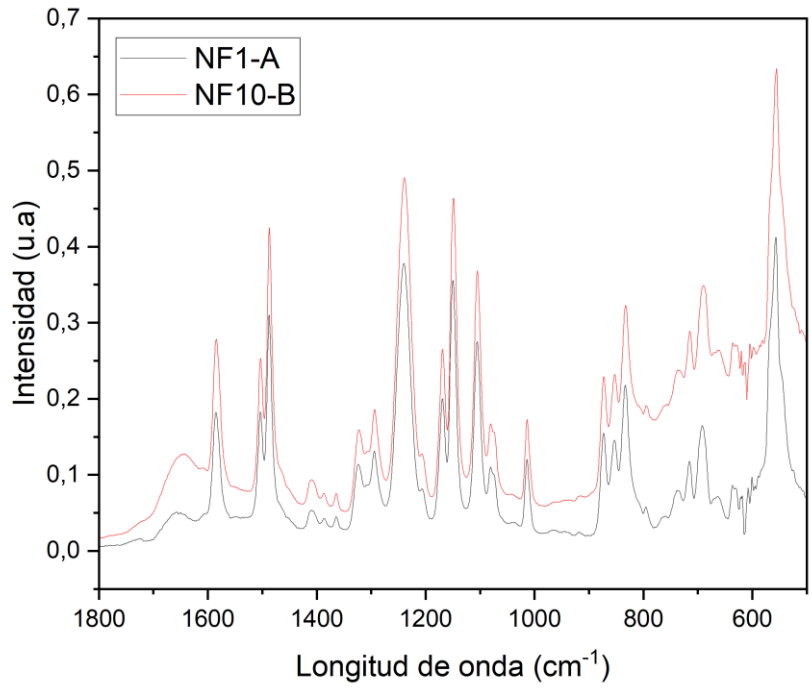


Figura A 2 Comparación espectro FTIR de Membranas NF1 y NF10

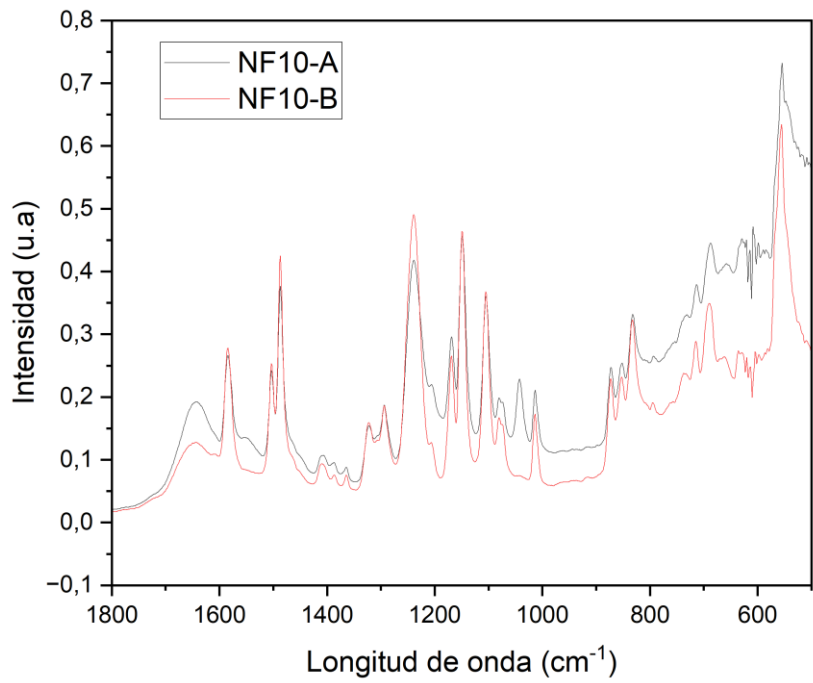


Figura A 3 Espectro FTIR de Membranas NF10