



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

## Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Diseño de un sistema de recuperación de membranas de  
Osmosis Inversa para su reutilización como membranas de  
nanofiltración y/o ultrafiltración

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Peña Guillem, Francisco Javier

Tutor/a: López Pérez, Maria Fernanda

Cotutor/a externo: López Borrell, Alexis

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## Resumen

La creciente demanda de agua limpia y potable en el sector industrial ha impulsado la investigación en tecnologías de tratamiento de agua, en las que, las membranas desempeñan un papel fundamental. Dichas membranas cuentan como residuo una vez terminada su función y su procesado y eliminación implica más tiempo, dinero y espacio del que se les puede ofrecer.

Con este proyecto se busca darle una segunda oportunidad mediante la reutilización de las membranas, explorando su degradación y transformación en membranas de ultrafiltración y nanofiltración. El proceso implica la modificación química y estructural de estos materiales a partir de un oxidante.

Se investigan métodos para optimizar la eficiencia del proceso de reciclaje y transformación, considerando factores como la selectividad de poro, la permeabilidad y la estabilidad de las membranas resultantes. Este enfoque no solo aborda la problemática ambiental asociada con el desecho de membranas desgastadas, sino que también ofrece una solución sostenible.

Se va a realizar un estudio económico con el objetivo de demostrar otros destinos viables para las membranas. Con el objetivo de crear un sector más verde y circular. Este va a consistir en realizar un estudio de mercado para obtener información del precio al que se venden los elementos de membranas de nanofiltración y ultrafiltración y a través de la estimación de costes de producción y de inversión se comprobará él porque es conveniente comprar una membrana rehabilitada.

**Palabras claves:** Reciclado, Membranas osmosis inversa, Oxidación capa activa

---

## Abstract

The growing demand for clean and potable water in the industrial sector has driven research into water treatment technologies, in which membranes play a key role. These membranes count as waste once their function is finished and their processing and disposal involves more time, money and space than they can be offered.

This project seeks to give them a second chance by reusing the membranes, exploring their degradation and transformation into ultrafiltration and nanofiltration membranes. The process involves the chemical and structural modification of these materials using an oxidant.

Methods are investigated to optimize the efficiency of the recycling and transformation process, considering factors such as pore selectivity, permeability and stability of the resulting membranes. This approach not only addresses the

environmental problem associated with the disposal of worn membranes, but also offers a sustainable solution.

An economic study will be conducted with the aim of demonstrating other viable destinations for the membranes. Aiming to create a greener and more circular sector. This will consist of carrying out a market study to obtain information on the price at which nanofiltration and ultrafiltration membrane elements are sold and through the estimation of production and investment costs it will be proven why it is convenient to buy a rehabilitated membrane.

**Keywords:** Recycling, Reverse osmosis membranes, Activadeeply oxidised layer, Reverse osmosis membranes

---

## Resum

La creixent demanda d'aigua neta i potable en el sector industrial ha impulsat la investigació en tecnologies de tractament d'aigua, en les quals, les membranes exercixen un paper fonamental. Estes membranes compten com a residu una vegada acabada la seua funció i el seu processament i eliminació implica més temps, diners i espai del qual se'ls pot oferir.

Amb este projecte es busca donar-li una segona oportunitat mitjançant la reutilització de les membranes, explorant la seua degradació i transformació en membranes d'ultrafiltració i nanofiltració. El procés implica la modificació química i estructural d'estos materials a partir d'un oxidant.

S'investiguen mètodes per a optimitzar l'eficiència del procés de reciclatge i transformació, considerant factors com la selectivitat de porus, la permeabilitat i l'estabilitat de les membranes resultants. Este enfocament no sols aborda la problemàtica ambiental associada amb la deixalla de membranes desgastades, sinó que també oferix una solució sostenible.

Es realitzarà un estudi econòmic amb l'objectiu de demostrar altres destins viables per a les membranes. Amb l'objectiu de crear un sector més verd i circular. Este consistirà a realitzar un estudi de mercat per a obtindre informació del preu al qual es venen els elements de membranes de nanofiltració i ultrafiltració i a través de l'estimació de costos de producció i d'inversió es comprovarà ell perquè és convenient comprar una membrana rehabilitada.

**Paraules claus:** Reciclatge, Membranes osmosis inversa, Oxidació capa activa

---

# ÍNDICE GENERAL

Motivación .....	1
1. Objetivos.....	3
1.1 Objetivos del trabajo .....	3
1.2 Objetivos de desarrollo sostenible.....	3
2. Introducción.....	8
2.1 Origen de la ósmosis.....	8
2.2 Tipos de membrana .....	9
2.3 Procesos de separación por membranas .....	11
2.4 Funcionamiento de una membrana de ósmosis inversa .....	13
2.5 Membrana de ósmosis inversa y sus partes .....	14
2.6 Factores que afectan al permeado .....	16
2.7 Importancia y aplicaciones de las membranas .....	20
2.8 Desventajas del uso de membranas de Ósmosis inversa.....	22
2.9 Impacto ambiental y sostenibilidad.....	22
2.10 Perspectivas futuras .....	24
3. Modelado matemático.....	26
3.1 Balance de materia .....	26
3.2 Parámetros operativos .....	27
4. Procedimiento experimental y metodología .....	29
4.1 Planta piloto .....	29
4.2 Preparación de las membranas .....	35
4.3 Preparación del software .....	35
4.4 Preparación del ensayo .....	37
4.5 Protocolo de limpieza de membranas de nanofiltración y ultrafiltración .....	38
4.6 Preparación recta patrón.....	39
4.6.a Recta patrón en Nanofiltración .....	39
4.6.b Recta patrón en Ultrafiltración .....	40
5. Resultados de los ensayos .....	44
5.1 Resultados en nanofiltración.....	44
5.2 Resultados en ultrafiltración .....	46
6. Diseño y escalado industrial .....	50
6.1 Tuberías .....	50
6.2 Pérdidas de carga en tuberías.....	52

6.3 Soporte para el elemento de membranas .....	54
6.4 Válvulas y Manómetros .....	55
6.5 Bomba hidráulica .....	55
6.6 Filtro de cartucho .....	57
6.7 Diagrama de flujo.....	57
7 Estudio de viabilidad económica.....	61
7.1 Costes de inversión .....	61
7.2 Costes de operación .....	63
7.2.a Costes de operación directos .....	63
7.2.b Costes de operación fijos .....	64
7.3 Costes variables .....	65
7.4 Costes totales .....	65
7.5 Comparación de precios.....	66
7.6 Cálculo de VAN, TIR y Payback .....	67
8 Conclusión.....	70
9 Bibliografía .....	73
Anexo I. Características de instrumentos.....	76
Manómetro .....	76
Bomba.....	76
Refractómetro.....	77
Medidor de pH y conductividad.....	78
Anexo II. Gráficas pertenecientes a los ensayos .....	80
Ensayos de nanofiltración.....	80
Ensayos de ultrafiltración .....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Objetivo 6	5
Figura 2 Objetivo 9	5
Figura 3 Objetivo 12	6
Figura 4 Objetivo 13	6
Figura 5 Osmómetro de Dutrochet (Adaptado de (colaboradores de Wikipedia, 2024))	9
Figura 6 Conjunto de membrana polimérica. (Redirect Notice, s. f.-c)	10
Figura 7 Proceso de ósmosis inversa. (Elaboración propia)	11
Figura 8 Diferencia de regiones de separación. (Elaboración propia)	13
Figura 9 Proceso membrana de ósmosis inversa. (Elaboración propia)	14
Figura 10 PA 6 en forma granular	15
Figura 11 Elemento de membranas (Ibáñez Mengual et al., 1997)	15
Figura 12 Permeabilidad dependiente del pH (Kontturi et al., 1996)	17
Figura 13 Concentración de sales dependiente del pH (Wang et al., 2008)	17
Figura 14 Filtrado de los módulos arrollados (Adaptación de Figura 15)	18
Figura 15 Filtración tangencial (Elaboración propia)	19
Figura 16 Mecanismo de Donnan (Ibáñez Mengual et al., 1997)	19
Figura 17 Filtración por membranas en industria láctea (Membranas y Sistemas de Filtración Para la Industria Láctea - Industria Alimentaria - s. f.)	20
Figura 18 Proyecto Remark. (Proyecto Remark: reutilización de membranas de ósmosis inversa - IndustriAmbiente.)	23
Figura 19 Proyecto Regenera'M. (Proyecto Regenera'M   Pascual y Bernabeu, s. f.)	24
Figura 20 Diagrama de bloques (Elaboración propia)	26
Figura 21 Planta piloto	29
Figura 22 Bomba planta piloto	30
Figura 23 Filtro de Cartucho (Catálogo DirectIndustry)	30
Figura 24 Módulo planta piloto	31
Figura 25 Funcionamiento módulo de membranas poliméricas. (Elaboración propia)	31
Figura 26 Manómetro (Catálogo DirectIndustry)	32
Figura 27 Termopar (Catálogo DirectIndustry)	32
Figura 28 Válvula reguladora de presión (Redirect Notice, s. f.-d)	33
Figura 29 Caudalímetro de la planta piloto (Elaboración propia)	34
Figura 30 Diagrama de flujo planta piloto (Elaboración propia)	34
Figura 31 Recta patrón $MgSO_4$	40
Figura 32 Recta patrón PEG 35 kDa	41
Figura 33 Recta Patrón PEG 20 kDa	42
Figura 34 Flux frente a tiempo de exposición en nanofiltración	46
Figura 35 Flux frente a tiempo de exposición	48
Figura 36 PVC (Gd-Admin, s. f.)	51
Figura 37 Carcasa para membranas	54
Figura 38 Manómetro (Catálogo DirectIndustry)	55
Figura 39 Bomba centrífuga (Vladimir Nishnik, Technology Consultant Software&Control en Rockwell Automation et al., 2023)	56
Figura 40 Bomba centrífuga (Catálogo DirectIndustry)	56
Figura 41 Características bomba centrífuga	57
Figura 42 Diagrama de flujo para 3 elementos de membrana (Elaboración propia)	58
Figura 43 Plano manómetro	76
Figura 44 Medidas manómetros	76
Figura 45 Modelo y características de las bombas	77
Figura 46 Refractómetro utilizado durante los ensayos de ultrafiltración	78

<i>Figura 47 Medidor de pH y conductividad utilizado durante nanofiltración</i>	79
<i>Figura 48 Ensayo de la membrana M2 en nanofiltración</i>	80
<i>Figura 49 Ensayo de la membrana M3B en nanofiltración</i>	81
<i>Figura 50 Ensayo de la membrana M3D en nanofiltración</i>	81
<i>Figura 51 Ensayo de la membrana M3G en nanofiltración</i>	81
<i>Figura 52 Ensayo de la membrana M6 en nanofiltración</i>	82
<i>Figura 53 Ensayo de la membrana M9 en nanofiltración</i>	82
<i>Figura 54 Ensayo de la membrana M10 en nanofiltración</i>	83
<i>Figura 55 Ensayo de la membrana M11 en nanofiltración</i>	83
<i>Figura 56 Ensayo de la membrana M13 en nanofiltración</i>	84
<i>Figura 57 Ensayo de la membrana M6 en ultrafiltración</i>	84
<i>Figura 58 Ensayo de la membrana M7 en ultrafiltración</i>	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Aplicaciones nanofiltración</i>	21
<i>Tabla 2 Aplicaciones de membranas</i>	21
<i>Tabla 3 Membranas, tiempo de exposición y flux</i>	38
<i>Tabla 4 Membranas, tiempo de exposición y flux</i>	39
<i>Tabla 5 Recta patrón Nanofiltración</i>	40
<i>Tabla 6 Recta patrón PEG 35 kDa</i>	41
<i>Tabla 7 Recta patrón PEG 20 kDa</i>	41
<i>Tabla 8 Membranas en planta de nanofiltración</i>	44
<i>Tabla 9 Concentración de sal en el permeado en nanofiltración</i>	45
<i>Tabla 10 Membranas en ultrafiltración</i>	47
<i>Tabla 11 Valores de rechazo en ultrafiltración (PEG 35 kDa)</i>	47
<i>Tabla 12 Valores de rechazo en ultrafiltración (PEG 20 kDa)</i>	47
<i>Tabla 13 Datos del sistema</i>	53
<i>Tabla 14 Pérdidas de carga</i>	54
<i>Tabla 15 Presupuesto de inversión</i>	61
<i>Tabla 16 Porcentaje de cada componente respecto al total</i>	62
<i>Tabla 17 Costes de operación directo</i>	63
<i>Tabla 18 Costes de operación fijos</i>	64
<i>Tabla 19 Costes variables</i>	65
<i>Tabla 20 Costes totales</i>	65
<i>Tabla 21 Precios de venta de membranas</i>	66
<i>Tabla 22 VAN, TIR y Payback</i>	68



# CAPÍTULO 1

---

## MOTIVACIÓN

## Motivación

En un mundo donde la sostenibilidad y la conservación de los recursos se han convertido en imperativos, abordar la eficiencia y durabilidad de las tecnologías de tratamiento de agua es crucial. El proyecto de limpieza de membranas no solo se alinea con estos objetivos globales, sino que también representa un paso significativo hacia la realización de un mundo más limpio y saludable para todos.

Este proyecto presenta un valor científico ya que permitirá profundizar en la reutilización de las membranas de ósmosis inversa. Es más, también implica un valor social, ya que se tiene como finalidad informar tanto al sector científico como a gente sin conocimiento sobre este tema, de la situación actual en la que se encuentran las membranas.

Por último, el proyecto está orientado a reducir los costes de un proceso productivo, mejorar el empleo de recursos y optimizar los tiempos de trabajo.

Al limpiar las membranas de manera efectiva se contribuye significativamente a la preservación de este recurso. Esto no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también nos permite maximizar el uso de cada recurso disponible, asegurando que el agua se gestione de la manera más eficiente posible. Además, la limpieza y el mantenimiento adecuados de las membranas de ósmosis prolongan su vida útil, transformándose en membranas de nanofiltración o ultrafiltración. Este enfoque no solo reduce los residuos industriales derivados de la producción y eliminación de membranas usadas, sino que también disminuye los costes operativos de las plantas de tratamiento de agua como se ha nombrado previamente. Al conseguir un proceso más económico, el agua limpia se vuelve más accesible y asequible para las comunidades, promoviendo así la equidad en el acceso a este recurso esencial.

A lo largo de este proyecto, se mostrará cuál ha sido el procedimiento para alcanzar estas metas y cuáles han sido los resultados para comprobar si de verdad vale la pena realizar este proceso.

# CAPÍTULO 2

---

## OBJETIVOS DEL PROYECTO

# 1. Objetivos

## 1.1 Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este estudio es diseñar un protocolo meticuloso y efectivo para la limpieza y revitalización de membranas de ósmosis inversa que han alcanzado el final de su vida útil. Este estudio se centrará específicamente en la recuperación de membranas que han sido utilizadas en la desalinización de agua salobre, con el propósito de restaurar su capacidad de filtración y prolongar su vida útil.

El protocolo incluirá una serie de pasos detallados sobre el análisis de los ensayos y resultados de la investigación. Este proceso se apoyará en el uso de una planta piloto y productos químicos específicos para asegurar la máxima eficacia en el reciclaje de las membranas.

Una vez limpias, estas membranas serán reutilizadas en aplicaciones de ultrafiltración y nanofiltración, lo que permitirá su aprovechamiento en diferentes contextos industriales y de tratamiento de agua. Este enfoque no solo busca maximizar el uso de las membranas, sino también reducir los costes operativos y el impacto ambiental asociado con la fabricación y desecho de nuevas membranas.

Este estudio está alineado con los principios de la economía circular, al evitar la acumulación de desechos y fomentar la reintegración de materiales restaurados, este protocolo contribuirá significativamente a la sostenibilidad ambiental y económica, ofreciendo una solución viable y ecológica para la gestión de membranas de ósmosis inversa en la industria.

## 1.2 Objetivos de desarrollo sostenible

Los objetivos de desarrollo sostenible, conocidos como (ODS), forman parte de un proyecto de carácter global que parten con una finalidad común. Con la finalidad de mejorar la calidad de vida del planeta y mejorar la situación medioambiental actual.

Es por eso, que aquí se recalcan los objetivos de este proyecto:

### 1. **Objetivo 6. Agua limpia y saneamiento.**

El primero, el más importante, agua limpia y saneamiento. Ya que el propósito es mejorar las instalaciones que garantizan la disponibilidad de agua a partir de una gestión sostenible.

El acceso al agua potable, el saneamiento y la higiene son fundamentales para la salud y el bienestar humano. Actualmente, miles de millones de personas carecen de estos servicios básicos, y se proyecta que esta situación podría empeorar para 2030 debido a diversos factores como el rápido crecimiento de la población, la urbanización y el aumento de las demandas de agua en sectores como el agrícola, industrial y energético. En diversas partes del mundo, la disponibilidad de agua se ha vuelto cada vez más incierta. En algunas áreas, las sequías intensifican la escasez de agua, afectando la salud y la productividad de las personas, lo que pone en peligro el desarrollo sostenible y la biodiversidad a nivel global. Así, es esencial garantizar el acceso universal a servicios sostenibles de agua potable y saneamiento para enfrentar el cambio climático en el futuro próximo y por ello, este proyecto está relacionado con este objetivo ya que permitirá la reutilización del agua del tratamiento terciario de las industrias. Permitiendo así un ahorro de agua significativo. Figura 1 Objetivo 6.

## **2. Objetivo 9. Industria, innovación e infraestructura**

En segundo lugar, este proyecto se centra en promover la industria, la innovación y las infraestructuras. El objetivo es introducir innovaciones significativas en el sector industrial, facilitando tecnologías y métodos accesibles para una mayor cantidad de empresas, especialmente aquellas con limitaciones de capital, que buscan soluciones eficientes para la purificación de sus suministros de agua. A través de la investigación y el desarrollo, se buscarán métodos más económicos y sostenibles, que puedan ser implementados por pequeñas y medianas empresas sin la necesidad de grandes inversiones iniciales.

La industrialización inclusiva y sostenible, junto con la innovación y el desarrollo de infraestructuras, puede liberar fuerzas económicas dinámicas y competitivas que generan empleo e ingresos. Estos elementos son fundamentales para la introducción y promoción de nuevas tecnologías, la facilitación del comercio internacional y el uso eficiente de los recursos.

La expansión de nuevas industrias conduce a una mejora en el nivel de vida de una gran parte de la población. Además, si las industrias adoptan prácticas sostenibles, se logrará un beneficio significativo para el medioambiente. Figura 2 Objetivo 9.

## **3. Objetivo 12. Producción y consumo responsables**

Por otro lado, el objetivo 12. Este consiste en producción y consumo responsables. Debido a que este proyecto tiene la intención de reducir el uso de combustible fósil en la creación de las membranas de nano/ultrafiltración y, por

ende, también reduce la contaminación producida por los residuos de las membranas de ósmosis inversa.

Con el crecimiento continuo de la población mundial, proyectado en alcanzar los 9,800 millones para 2050, la demanda de recursos naturales podría superar la capacidad de nuestro planeta, necesitando casi tres planetas para mantener los estilos de vida actuales.

Para reducir nuestro consumo excesivo, es crucial cambiar nuestros hábitos y adoptar sistemas energéticos más sostenibles. Sin embargo, las crisis globales han visto un aumento en las subvenciones a los combustibles fósiles, casi duplicándose de 2020 a 2021. Figura 3 Objetivo 12.

#### **4. Objetivo 13. Acción por el clima**

Por último, el objetivo 13. Muy importante en este proceso, la acción por el clima. Muy ligado con el caso anterior. Con este trabajo se impulsa la disminución de producción contaminante y la producción de residuo contaminante. Debido a la situación actual del medio ambiente es crucial tomar medidas sobre el asunto y desarrollar planes a favor del planeta. Figura 4 Objetivo 13.



Figura 1 Objetivo 6



Figura 2 Objetivo 9



*Figura 3 Objetivo 12*



*Figura 4 Objetivo 13*

# CAPÍTULO 3

---

## INTRODUCCIÓN TEÓRICA



## 2. Introducción

### 2.1 Origen de la ósmosis

El mecanismo de ósmosis, aunque aparenta innovador, lleva en el planeta mucho más tiempo del que se piensa y es la naturaleza quien hace uso de este mecanismo. Las vejigas de algunos animales son capaces de separar el agua y el alcohol. Así, el científico francés Jean-Antoine Nollet descubrió la ósmosis. El físico galo anotó que el alcohol no era capaz de atravesar el agua, pero sí de manera inversa. (*Historia de la ósmosis inversa. (Aquapro)*)

Entre 1827 y 1832 otro científico del país franco, Henri Dutrochet, dió nombre a este fenómeno por primera vez. En sus estudios e investigaciones acerca de las disoluciones acuosas se citaron los nombres endósmosis y exósmosis. Dutrochet fue el primer científico en desarrollar un instrumento para cuantificar la presión osmótica. (*Osmosis and life according to Dutrochet. (2012)*)

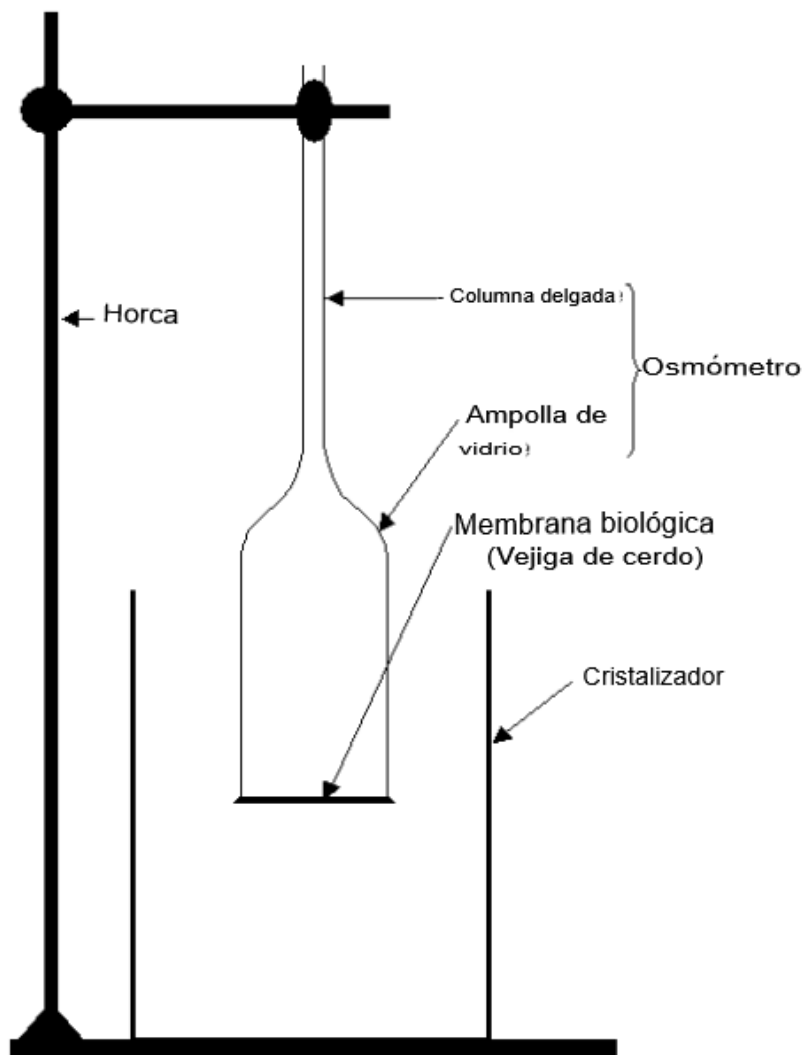


Figura 5 Osmómetro de Dutrochet (Adaptado de (colaboradores de Wikipedia, 2024))

El osmómetro de Dutrochet consiste en un tubo de vidrio con una membrana semipermeable en un extremo. Al sumergirlo en una solución de referencia, el agua fluye a través de la membrana hacia la solución, ejerciendo presión sobre una columna de líquido en el tubo. La altura de esta columna se relaciona con la presión osmótica de la solución. Este método permite medir la presión osmótica de diferentes soluciones de manera cuantitativa.

Pero, no sería hasta 1854 cuando se selló el nombre de ósmosis para referirse a este proceso. Fue el químico escocés Thomas Graham quien lo acuñó durante su estudio con tejidos animales. Ósmosis que viene del griego, “Empuje o acción de empujar”.

El proceso de ósmosis inversa no aparecería hasta 1953 diseñado por Charles E. Reid con la finalidad de la obtención de agua potable proveniente del agua salada del mar. Aunque este mecanismo no cumplió con las expectativas debido a la carencia de una membrana adecuada. Tras 6 años de investigación, el mismo profesional con ayuda de E.J. Breton, descubren que con la membrana de acetato de celulosa se obtenían mejores resultados. (*Historia de la ósmosis inversa. (Aquapro)*)

La producción de las membranas solo acaba de comenzar, los años setenta fueron fundamentales en el entendimiento del proceso y mejora de la instrumentación. Hoy en día sigue siendo un tema en pleno desarrollo.

## 2.2 Tipos de membrana

Una vez explicado su origen y desarrollo, ahora es necesario conocer todos los tipos de membranas. Las membranas se pueden clasificar según su naturaleza o según su estructura.

Según su naturaleza, las membranas pueden ser biológicas o sintéticas:

Las membranas **biológicas** son estructuras fundamentales en organismos vivos, ya que delimitan las células y sus orgánulos, permitiendo la segregación de diferentes compartimentos celulares y regulando el intercambio de sustancias entre ellos y su entorno.

La membrana **plasmática** es el tipo más común de membrana biológica y rodea a todas las células, proporcionando una barrera selectiva entre el citoplasma y el medio extracelular. Está compuesta principalmente por una bicapa lipídica, donde los fosfolípidos constituyen la parte fundamental, con proteínas incrustadas en ella. La bicapa lipídica es permeable a moléculas pequeñas no polares, como gases (oxígeno, dióxido de carbono) y algunas moléculas liposolubles (como las

vitaminas liposolubles), pero impermeable a moléculas grandes o polares, como iones y aminoácidos.

Por otro lado, las membranas **sintéticas** son estructuras creadas artificialmente mediante procesos industriales con el propósito de replicar algunas de las funciones de las membranas biológicas o para cumplir con requisitos específicos en diversas aplicaciones industriales. A continuación, se desarrollan las membranas poliméricas y las membranas cerámicas.

Las membranas **poliméricas** están compuestas por polímeros sintéticos, como la poliamida o la polisulfona (Pinnau & Freeman, 1999). Son ampliamente utilizadas en aplicaciones de filtración, separación y purificación en la industria química, alimentaria, farmacéutica y medioambiental. Las membranas de polímeros pueden tener poros de diferentes tamaños para permitir el paso selectivo de moléculas o partículas.



Figura 6 Conjunto de membrana polimérica. (Redirect Notice, s. f.-c)

Por último, las membranas **cerámicas**, son fabricadas con materiales cerámicos, como óxidos metálicos o elementos inorgánicos. Son resistentes a altas temperaturas y presiones, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en las que se requiere filtración a condiciones extremas, como la industria química, petroquímica y de procesamiento de alimentos. Las membranas de cerámica tienen una estructura porosa que permite la separación de moléculas según su tamaño.

Los diferentes tipos de membranas, tanto naturales como sintéticas, juegan un papel fundamental en una variedad de procesos industriales y biológicos.

Estas membranas se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la purificación de agua y la separación de componentes químicos hasta la regeneración de tejidos biológicos.

Dependiendo de sus propiedades físicas y químicas, las membranas pueden ser empleadas en diversos procesos de separación, como la microfiltración, la ultrafiltración y la nanofiltración, entre otros.

## 2.3 Procesos de separación por membranas

El proceso de separación por membranas se trata de la transferencia de materia generada al aplicar presión sobre el lado con mayor concentración de solutos. Provocando así el desplazamiento del agua por diferencia de concentraciones o por el uso de presión como se observa en Figura 7.

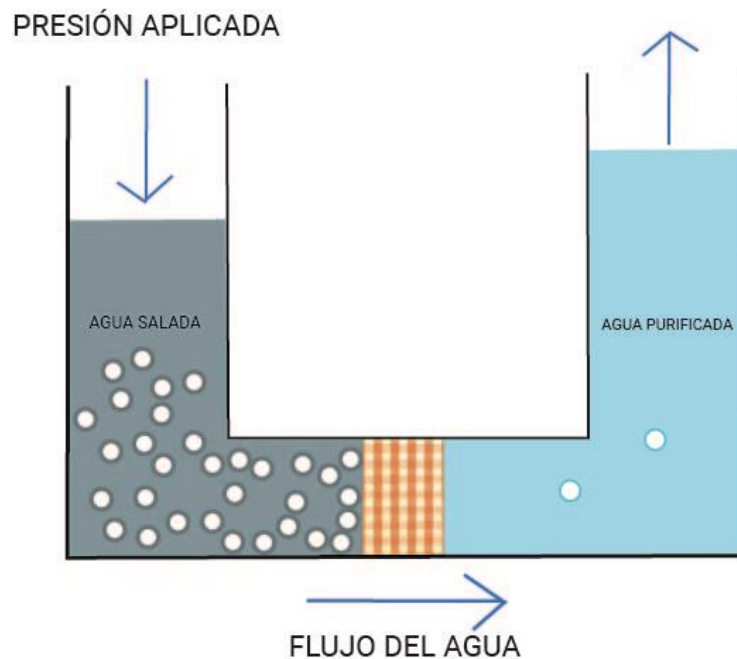


Figura 7 Proceso de ósmosis inversa. (Elaboración propia)

A continuación, se definen las más importantes:

La **microfiltración (MF)** es un proceso de separación física con membranas utilizado para eliminar partículas sólidas y microorganismos de un fluido. Estas membranas tienen poros de tamaño relativamente grande, típicamente en el rango de 0.1 a 10 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Las partículas sólidas, bacterias, levaduras y otros microorganismos de tamaño superior al tamaño de los poros de la membrana son retenidos y quedan atrapados en la superficie o dentro de los poros de la membrana, mientras que el líquido limpio y los componentes solubles más

pequeños pasan a través de la membrana. Es el tipo de filtración con el poro más grande de las que están aquí detalladas.

La **ultrafiltración (UF)** se trata de un proceso dirigido por presión, se emplea el tamaño del soluto para separar partículas por efecto tamiz. Las membranas utilizadas en este proceso suelen poseer un tamaño de poro comprendido entre 0,04 y 0,1  $\mu\text{m}$ , y en la mayoría de los casos, la disposición de los poros es asimétrica. Es necesario entre 1 y 10 atm.

Esta técnica es comúnmente empleada en el tratamiento de agua potable y aguas residuales, así como en la industria alimentaria y farmacéutica para la purificación y concentración de proteínas y otros compuestos biológicos.

La **nanofiltración (NF)** es un proceso de separación que utiliza una membrana con poros de tamaño nanométrico para retener solutos de mayor tamaño, incluidos iones y moléculas orgánicas de tamaño medio, mientras permite el paso de solventes y solutos más pequeños.

La nanofiltración se utiliza principalmente para la eliminación de iones específicos, como sales, metales pesados y contaminantes orgánicos en el tratamiento de agua potable.

La **ósmosis inversa (OI)** es un proceso dirigido al uso de separación de moléculas pequeñas. La presión osmótica es importante y no puede despreciarse frente a la diferencia de presión aplicada.

La ósmosis inversa, es el último peldaño en la escalera de la filtración. Su uso se destaca por la eliminación de iones disueltos en el agua. Esto incluye tanto cationes (iones con carga positiva) como aniones (iones con carga negativa). Algunos ejemplos son el sodio (catión) o el cloruro (anión).

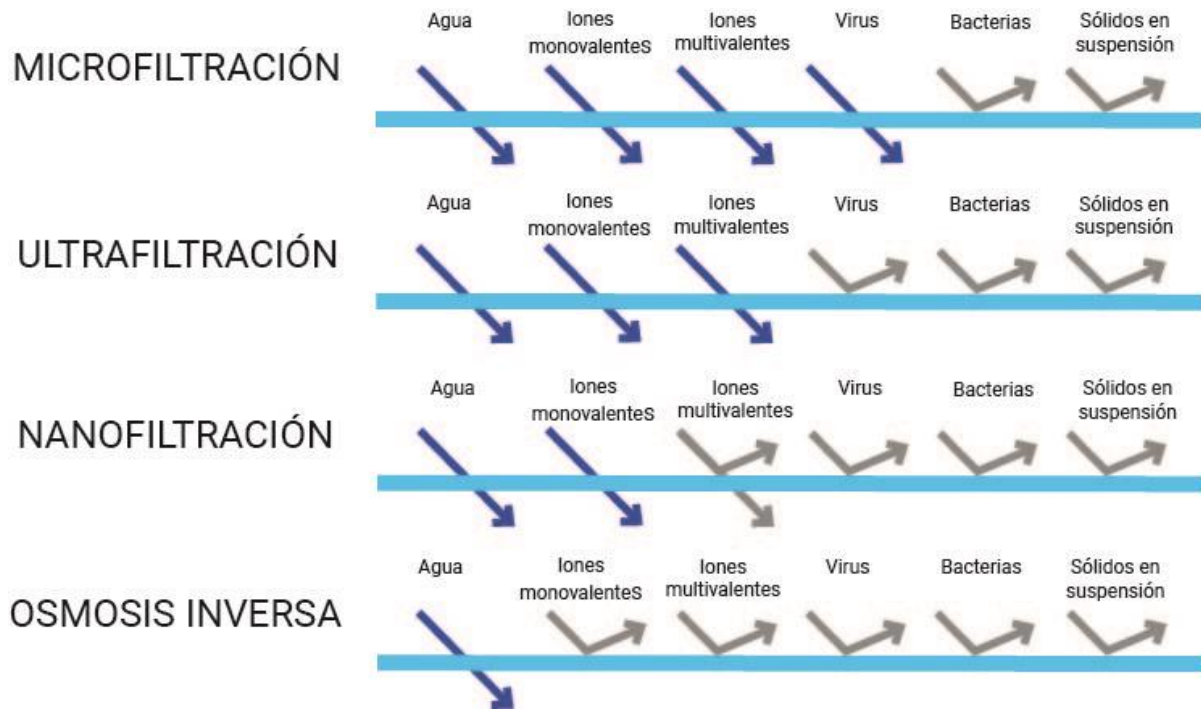


Figura 8 Diferencia de regiones de separación. (Elaboración propia)

## 2.4 Funcionamiento de una membrana de ósmosis inversa

En esencia, la membrana de ósmosis inversa es una barrera semipermeable que permite el paso de moléculas de agua ( $H_2O$ ) mientras rechaza la mayoría de los contaminantes disueltos, como sales, minerales, metales pesados y compuestos orgánicos. El proceso implica aplicar presión al lado de alta concentración de soluto (agua de alimentación), lo que fuerza el paso del agua a través de la membrana (permeado).

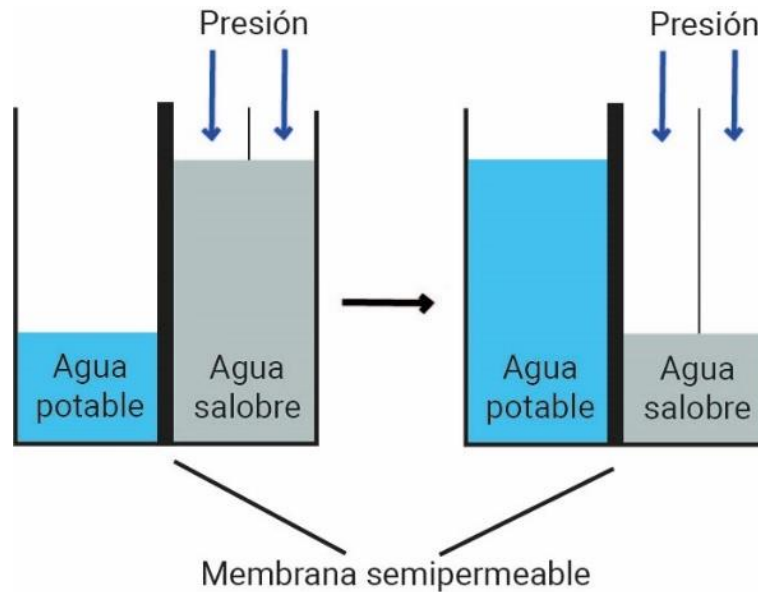


Figura 9 Proceso membrana de ósmosis inversa. (Elaboración propia)

Como resultado, el agua purificada, conocida como permeado, una vez atraviesa la membrana se recoge para su uso, mientras que los contaminantes rechazados, denominados concentrado o rechazo, que si bien, pueden ser vueltos a exponer en las membranas, se pueden derivar a otros sistemas de limpieza.

## 2.5 Membrana de ósmosis inversa y sus partes

Las que se utilizan en este sistema están formadas por poliamida. La poliamida, en el contexto de las membranas de ósmosis inversa y otros materiales industriales, se produce de manera sintética. En concreto, las membranas de nanofiltración suelen estar formadas por poliamida y/o poli (vinilo-alcohol) (PVA). (Jahanshahi et al., 2010)

Para ser exactos se utiliza la familia de poliamidas alifáticas (compuesto orgánico acíclico con estructura molecular en cadena abierta), o también conocidas como PA 6, PA 66, PA 46 o PA 12. Estas poliamidas fueron desarrolladas por DUPONT, marca comercial puntera en membranas de ósmosis. Cabe destacar que todas las membranas no tienen por qué estar formadas de estos polímeros exactamente.



Figura 10 PA 6 en forma granular

Las membranas se suelen disponer en configuración de enrollamiento en espiral. Es uno de los diseños más baratos y compactos. Así como se observa en la Figura 11 Elemento de membranas (Ibáñez Mengual et al., 1997) , se enrolla el material con una malla separadora dejando las capas activas de las membranas apuntando hacia el exterior del tubo. Toda la estructura de membranas envuelve el tubo colector colocandose el bloque completo dentro de otro tubo de presión.

El líquido de alimentación fluye longitudinalmente, atravesando las capas de fuera a dentro. Debido a la posición de la capa activa detallada anteriormente, en el tubo central del elemento se colecta el permeado, que se puede definir como el fluido de alimentación purificado. Este permeado se puede coleccionar para determinar sus propiedades o puede devolverse al alimento, depende del ensayo que se realice con estas membranas.

Actualmente estos elementos de membrana se disponen en serie y esto favorece a obtener un producto más puro. La longitud y el diámetro de estos tubos suelen estar limitados por la pérdida de carga que sufre la alimentación.

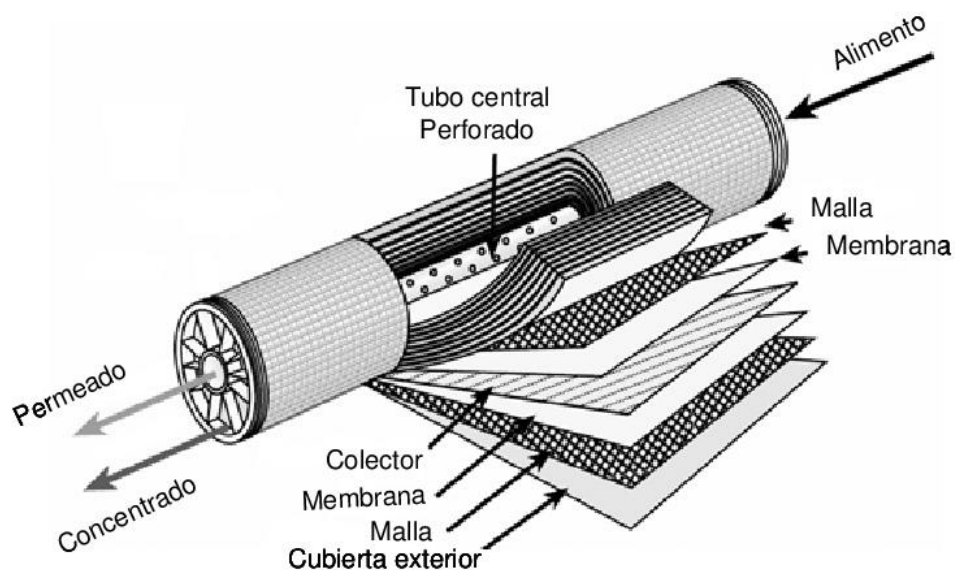


Figura 11 Elemento de membranas (Ibáñez Mengual et al., 1997)



El estudio de los fenómenos que ocurren en las membranas se fundamenta en el análisis de las ecuaciones fenomenológicas que describen el flujo de especies y las fuerzas termodinámicas asociadas, tales como el gradiente de presión, el potencial eléctrico, la concentración, entre otros aspectos relevantes para comprender y optimizar el rendimiento de las membranas en diversas aplicaciones tecnológicas e industriales.

## 2.6 Factores que afectan al permeado

Las membranas utilizadas en filtración pierden de manera progresiva la capacidad de permeado, lo que complica su uso. Es por ello por lo que es necesario conocer que factores interrumpen la efectividad del proceso para preparar el sistema.

El **pH** de la corriente de entrada incide en el aumento del coeficiente de ensuciamiento, responsable principalmente de la disminución del flujo de permeado. Así como se observa en la Figura 12 Permeabilidad dependiente del pH (Kontturi et al., 1996), la permeabilidad de la membrana depende del pH.

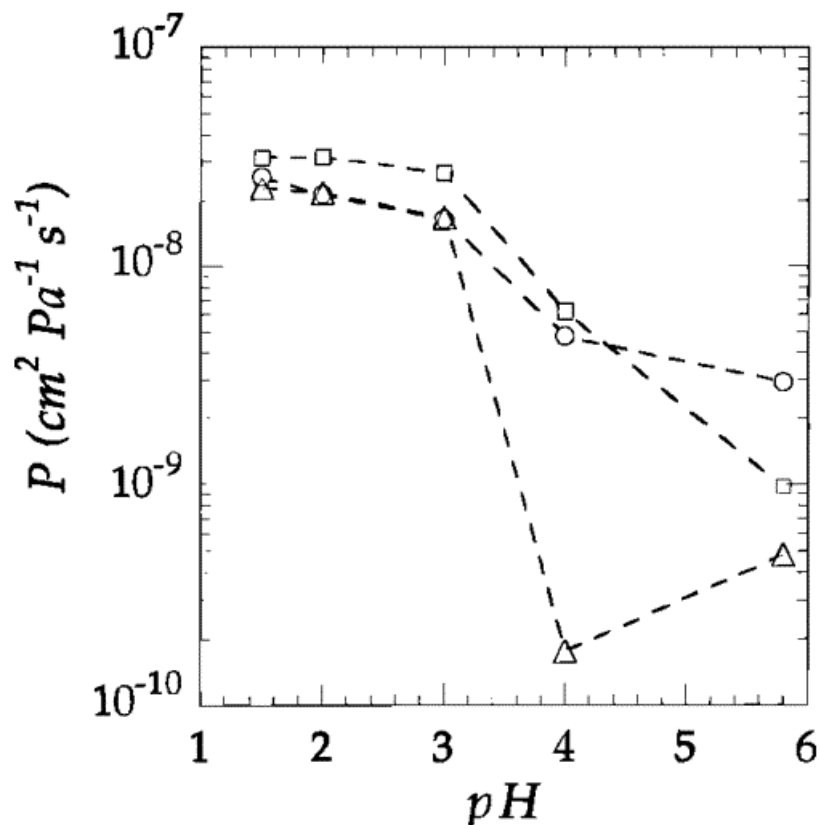


Figura 12 Permeabilidad dependiente del pH (Kontturi et al., 1996)

Como nos indica en la Figura 13 Concentración de sales dependiente del pH (Wang et al., 2008), se observa como en pH básicos la concentración de sales en el permeado disminuye.

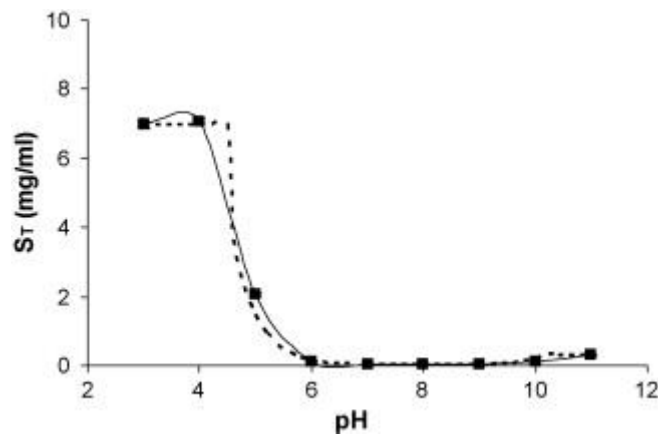


Figura 13 Concentración de sales dependiente del pH (Wang et al., 2008)

La **Presión Transmembranal (PTM)** es la fuerza motriz del fenómeno. Se considera presión transmembranal como la presión efectiva que actúa sobre la capa activa de la membrana. Se puede calcular como el promedio entre la presión del alimento y la del rechazo siempre y cuando el permeado se encuentre a presión atmosférica. Este término es un factor clave en la filtración ya que afecta en el flujo que atraviesa la membrana. (Ibáñez Mengual et al., 1997)

La **dirección del flujo** de alimentación es un aspecto técnico crucial para la estabilidad del equipo. En el proceso de separación por membranas se puede emplear 2 métodos de alimentación al módulo. En el primer método, el flujo de alimentación se dirige perpendicularmente hacia la superficie de la membrana. A medida que el líquido pasa a través de la membrana, las partículas y solutos mayores que el tamaño de poro de la membrana quedan retenidos en la superficie, formando una capa de torta de filtración, mientras que el permeado (el líquido que atraviesa la membrana) se recoge en el lado opuesto. Este método es conocido como filtrado de los módulos arrollados. (Ibáñez Mengual et al., 1997)

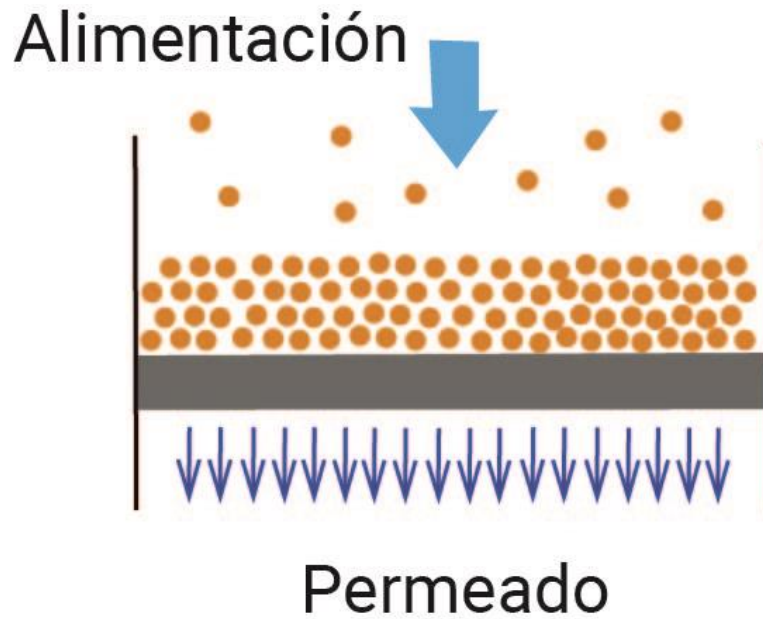


Figura 14 Filtrado de los módulos arrollados (Adaptación de Figura 15)

Como se observa en la Figura 14 Filtrado de los módulos arrollados (Adaptación de Figura 15). El problema que supone este método es la formación de torta o ensuciamiento. Al solo presentar una única salida, se produce una disminución de flux y un crecimiento del ensuciamiento producido por el soluto de la solución de alimentación.

Por otro lado, el segundo método consiste en una corriente de alimentación presurizada que fluye tangencialmente a la superficie de la membrana. Este se conoce como “*cross-flow membrane filtration*”.(Ibáñez Mengual et al., 1997). Consta de 2 salidas. Una de permeado o producto y otra de rechazo que se trata de una corriente de concentrado. La ventaja de este método es el menor volumen de torta que se genera en el proceso.

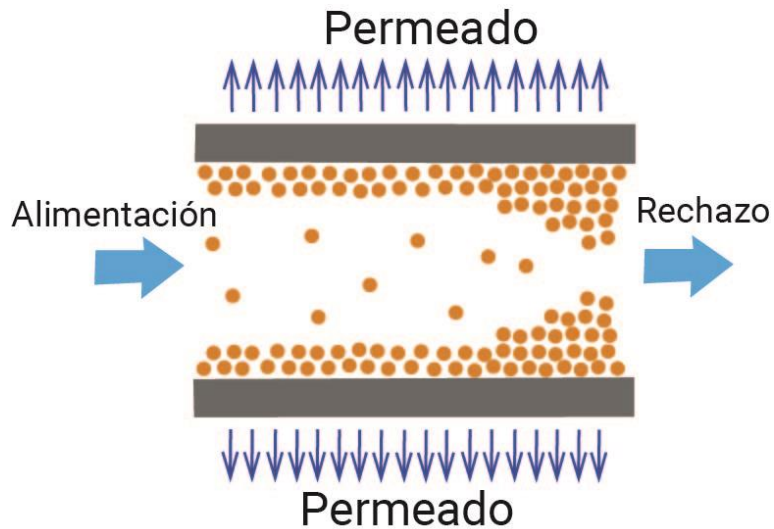


Figura 15 Filtración tangencial (Elaboración propia)

**Mecanismo de exclusión de Donnan.** Cuando una membrana semipermeable divide 2 soluciones con iones disueltos, los iones difunden a través de la membrana según sus gradientes de concentración y carga eléctrica. Sin embargo, se produce un fenómeno conocido como exclusión de Donnan. Este fenómeno se produce normalmente en membranas semipermeables que mantienen un intercambio iónico. (Vezzani & Bandini, 2002)

Los iones de carga opuesta a las moléculas presentes en la membrana se ven atraídos hacia la membrana y tienden a acumularse cerca de ella. Esto crea un gradiente de concentración efectiva de iones a lo largo de la membrana, donde la concentración de iones en la solución que contiene las moléculas impermeables atrae a los iones de carga opuesta hacia la membrana, lo que resulta en una distribución desigual de iones a ambos lados de la membrana.

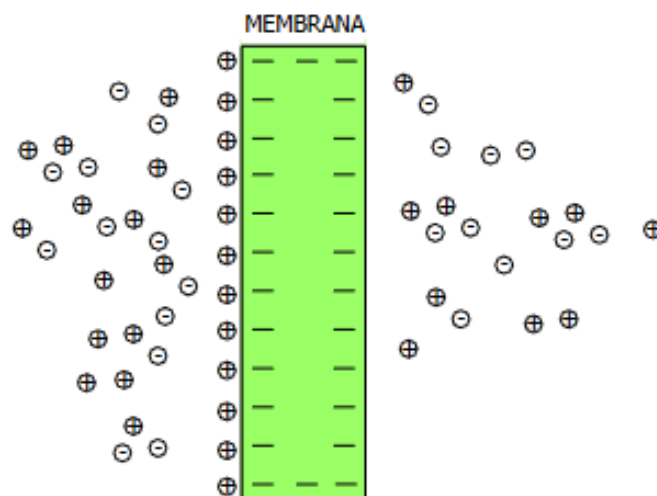


Figura 16 Mecanismo de Donnan (Ibáñez Mengual et al., 1997)

## 2.7 Importancia y aplicaciones de las membranas

Las membranas desempeñan un papel fundamental en una amplia gama de aplicaciones industriales y científicas debido a sus propiedades únicas de separación y purificación. Estas superficies delgadas y selectivas permiten la separación de diferentes componentes de una mezcla basada en diferencias en tamaño, forma, carga y afinidad química. Como resultado, las membranas se han convertido en una herramienta indispensable en industrias que van desde la alimentaria hasta la farmacéutica, desde el tratamiento de aguas hasta la producción de energía como indica el nuevo hallazgo de la compañía Stalkraft. (BBC News Mundo, 2009).

En la industria alimentaria, las membranas se utilizan para la concentración y purificación de productos como jugos, leche, vino y proteínas. La tecnología de membranas permite la eliminación de contaminantes, como bacterias y virus, así como la retención de nutrientes y sabores esenciales, preservando así la calidad y la seguridad de los alimentos. En la Figura 17 se observa un sistema de filtrado por membranas en una empresa del sector lácteo:



*Figura 17 Filtración por membranas en industria láctea (Membranas y Sistemas de Filtración Para la Industria Láctea - Industria Alimentaria - s. f.)*

En el campo farmacéutico, las membranas son esenciales para la separación y purificación de productos biofarmacéuticos, como proteínas, anticuerpos y vacunas. Estas aplicaciones requieren membranas de alta selectividad y capacidad de retención para garantizar la pureza y la eficacia

terapéutica de los productos finales. Los productos farmacéuticos necesitan de esta agua pura por el bien de la calidad del producto.

Por otro lado, en el ámbito medioambiental, las membranas se utilizan para la separación y recuperación de recursos valiosos a partir de corrientes de desecho, como la recuperación de solventes en la industria química o la captura de dióxido de carbono en aplicaciones de captura y almacenamiento de carbono.

En la Tabla 1 Aplicaciones nanofiltración se disponen ejemplos de aplicaciones industriales de las membranas de nanofiltración:

*Tabla 1 Aplicaciones nanofiltración*

<b>Industria</b>	<b>Aplicación NF</b>
Alimentaria	Concentración zumos Desmineralización lactosuero Separación aceites vegetales Purificación de ácidos orgánicos
Química	Eliminación de sulfatos Recuperación de sosa
Textil	Eliminación de color de efluentes Limpieza de agua

Los distintos tipos de membranas se pueden utilizar también en tratamientos avanzados de agua.

*Tabla 2 Aplicaciones de membranas*

PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE	Desalación de aguas marinas.	OI
	Desalación de aguas salobres.	OI NF EDR
	Potabilización.	OI NF EDR
	Ablandamiento.	NF EDR
	Clarificación Esterilización/Desinfección.	MF - UF
REUTILIZACIÓN DE AGUAS DEPURADAS	Aguas para riego y uso industrial.	OI NF EDR
PRODUCCIÓN DE AGUA INDUSTRIAL	Agua para industria alimentaria, farmacéutica y biomédica.	OI NF
PRETRATAMIENTOS OI, NF Y EDR	Desalación y reutilización de aguas.	MF - UF

## 2.8 Desventajas del uso de membranas de Ósmosis inversa

Las membranas de ósmosis inversa (OI) presentan varios problemas durante su uso, siendo el más significativo el ensuciamiento. Estas membranas son susceptibles a la acumulación de partículas, minerales y otros contaminantes en su superficie, lo que conlleva varias consecuencias negativas:

1. **Disminución de la eficiencia:** El ensuciamiento de la membrana por contaminantes dificulta el paso del agua, reduciendo la cantidad de agua purificada producida.
2. **Aumento de los costes de mantenimiento:** Para mantener la eficiencia de la OI, es necesario realizar limpiezas regulares de las membranas, lo que implica gastos adicionales en mano de obra, energía y productos químicos.
3. **Reducción de la vida útil:** La acumulación de contaminantes deteriora la membrana con el tiempo, acortando su vida útil y requiriendo reemplazos prematuros, lo que representa un costo significativo.

Las consecuencias de esta fragilidad incluyen interrupciones en el proceso de ósmosis inversa y costes adicionales de reparación o reemplazo. Para evitar generar problemas de gestión de residuos o incrementar el presupuesto por medidas de tratamiento o eliminación de producto no deseado, se utiliza agua proveniente del mar.

Finalmente, estas membranas son susceptibles al crecimiento de microorganismos, como bacterias, algas y hongos, en un fenómeno conocido como biofouling.

El biofouling ensucia la capa activa de la membrana, reduce la eficiencia del proceso y puede contaminar el agua purificada, deteriorando su calidad y haciéndola insegura para el consumo humano.

## 2.9 Impacto ambiental y sostenibilidad

Las membranas de ósmosis han emergido como una tecnología clave en la purificación de agua y el tratamiento de aguas residuales en todo el mundo. Sin embargo, su impacto ambiental y su sostenibilidad son temas de gran importancia en la actualidad, dada la creciente preocupación por la conservación de recursos y la mitigación del cambio climático.

Es esencial considerar el impacto ambiental de la producción y el uso de estas membranas. Aunque las membranas de ósmosis inversa están diseñadas para ser altamente eficientes en la eliminación de contaminantes del agua, su fabricación implica el consumo de recursos naturales y la emisión de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, la producción de materiales como la poliamida, comúnmente utilizada en la fabricación de membranas, puede requerir grandes cantidades de energía y generar residuos.

Además, la disposición adecuada de las membranas de ósmosis al final de su vida útil también es un aspecto crucial para evaluar su sostenibilidad. Si no se gestionan adecuadamente, estas membranas pueden terminar en vertederos, donde pueden tardar años en descomponerse, contribuyendo a la contaminación del suelo y del agua.

Sin embargo, a pesar de estos desafíos, las membranas de ósmosis también ofrecen beneficios significativos en términos de sostenibilidad. Por ejemplo, al proporcionar una fuente de agua limpia y segura, estas membranas pueden reducir la dependencia de fuentes de agua no renovables, como los acuíferos subterráneos, y ayudar a conservar los ecosistemas acuáticos naturales. El uso de membranas de ósmosis en el tratamiento de aguas residuales puede contribuir a la conservación de recursos al recuperar y reutilizar el agua, en lugar de desecharla. Esto no solo reduce la presión sobre los suministros de agua dulce, sino que también disminuye la contaminación del agua al evitar la descarga de efluentes no tratados en los cuerpos de agua.

Un buen ejemplo de investigación en el problema de los residuos es el proyecto Remark, liderado por Cetaqua con sede en Barcelona. Este trabajo de investigación se realiza con el fin de darle una salida a las 500 membranas de ósmosis inversa que se producen como residuo al día. Se busca alargar la vida útil de las membranas y reducir los residuos plásticos. Concretamente reducen el desecho de 150000 membranas de ósmosis, evitando 100 toneladas de  $CO_2$  a la atmósfera.



*Figura 18 Proyecto Remark. (Proyecto Remark: reutilización de membranas de ósmosis inversa - IndustriAmbiente.)*

Otro proyecto de investigación desarrollado en España se llama Regenera'M. La empresa PASCUAL Y BERNABEU, S.A., en colaboración con la Agencia Valenciana de Innovación (AVI), participa en el proyecto Regenera'M, cuyo objetivo es reutilizar las membranas de ósmosis inversa desechadas por



ensuciamiento irreversible en plantas industriales. Estas membranas serán regeneradas y utilizadas como membranas de nanofiltración (NF) y ultrafiltración (UF) en depuradoras industriales textiles, mejorando la calidad de las aguas residuales tratadas para su reciclaje en procesos productivos y aplicaciones agrícolas y urbanas.



Figura 19 Proyecto Regenera'M. (Proyecto Regenera'M | Pascual y Bernabeu, s. f.)

## 2.10 Perspectivas futuras

Las membranas de ósmosis han demostrado ser una tecnología crucial en la purificación del agua y el tratamiento de aguas residuales en las últimas décadas. A medida que avanzamos hacia el futuro, se vislumbran varias perspectivas emocionantes para el desarrollo y la aplicación de estas membranas, que podrían transformar aún más el panorama de la gestión del agua a nivel mundial.

En primer lugar, se espera que las mejoras en la eficiencia y la durabilidad de las membranas de ósmosis jueguen un papel fundamental en su adopción generalizada. Los avances en la nanotecnología y la ingeniería de materiales están abriendo nuevas posibilidades para el diseño de membranas más resistentes y selectivas, capaces de operar en una variedad más amplia de condiciones y de eliminar una gama más amplia de contaminantes.

Además, se espera que la investigación continúe en la dirección de reducir los costes asociados con la producción y el mantenimiento de las membranas de ósmosis. Esto podría incluir la optimización de procesos de fabricación, el uso de materiales más económicos y la implementación de estrategias de recuperación de energía para reducir los requisitos de consumo de energía durante la operación de las plantas de tratamiento.

Según afirma el periódico El País, en 2022, el mundo presenciaba aproximadamente 18500 plantas desaladoras que generan 87 millones de metros cúbicos al día. De este total el 70% es consumo humano. Pero que prevén un aumento para la próxima década en este sector.

# CAPÍTULO 4

---

## MODELO MATEMÁTICO

### 3. Modelado matemático

#### 3.1 Balance de materia

El modelado matemático de este proyecto consiste en el balance de materia que se produce en el módulo de membranas. Los ensayos realizados en el laboratorio serán significativos para el desarrollo del escalado industrial.

Pues bien, en la mayoría de los módulos de membranas se obtienen estas ecuaciones:

$$Q_A = Q_P + Q_R \quad \text{Ec. 1}$$

$$Q_A = \frac{Q_P}{\eta} \quad \text{Ec. 2}$$

En las que:

$Q_A$  = caudal de alimentación,  $m^3/h$

$Q_P$  = caudal de permeado,  $m^3/h$

$Q_R$  = caudal de rechazo,  $m^3/h$

$\eta$  = rendimiento del proceso

A continuación, se observa el diagrama de bloques de dicho instrumento:

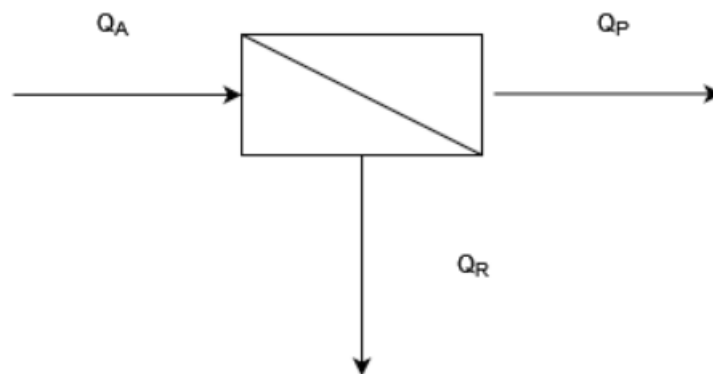


Figura 20 Diagrama de bloques (Elaboración propia)

En el caso de que se conozca cualquiera de los datos necesarios, el sistema se resuelve.

### 3.2 Parámetros operativos

El factor de concentración, conocido como CF, muestra el grado de aumento de la concentración de un componente durante un ensayo.

$$CF = \frac{C_R}{C_A} \quad Ec. 3$$

Donde  $C_R$  y  $C_A$ , son respectivamente, concentración en el rechazo y en la alimentación.

Por otro lado, el parámetro paso de sales (SP), se define como:

$$SP = \left( \frac{C_P}{C_A} \right) \cdot 100\% \quad Ec. 4$$

Siendo  $C_P$  la concentración del agua producto o permeado. SP aumenta cuanto mayor es la concentración en el permeado. Por lo que interesa un porcentaje de paso de sales bajo. Es decir, si pasa menos sales por la membrana, mayor será el porcentaje de rechazo, menor será la concentración en el permeado. El porcentaje de rechazo es entonces calculado de la siguiente manera:

$$\% R = \left( \frac{C_A - C_P}{C_A} \right) \cdot 100\% \quad Ec. 5$$

# CAPÍTULO 5

---

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA EMPLEADA

## 4. Procedimiento experimental y metodología

A continuación, se va a indicar la metodología llevada a cabo en el proyecto. En este apartado se va a incluir desde los instrumentos pertenecientes a la planta piloto como la explicación de cada uno de los pasos llevados a cabo. Los ensayos se realizaron en 2 plantas similares. La única diferencia aparente son las condiciones de trabajo por lo que si no se indica una especificación los elementos pertenecen a sendas plantas.

### 4.1 Planta piloto

A continuación, se dispone Figura 21 Planta piloto con la que se realiza el ensayo:



*Figura 21 Planta piloto*

Para llevar a cabo la caracterización de las membranas, se va a utilizar en el laboratorio una planta piloto que consta de las siguientes partes:

- Bomba de pistón.

Parte fundamental de la instrumentación ya que su función primordial será la de proveer el agua y la presión al sistema. Funciona con pistón y por ende se ha de seguir rigurosas precauciones, ya que, aunque sean más eficientes son más delicadas. Este tipo de bomba se utiliza en plantas de pequeña capacidad. La presión se medirá en bar en un rango de 1 a 10 bar.



Figura 22 Bomba planta piloto

- Filtro de cartucho.

Previo a la bomba, obligatorio para este tipo de bomba ya que no pueden entrar partículas sólidas a la camisa del pistón. Se dispone en vertical junto a dicho instrumento. Presenta una entrada perpendicular a la tapa y una salida en la parte superior. Compuesto por 2 partes, un recipiente que suele ser transparente de PVC y el propio filtro que suele ser de polipropileno bobinado. Este instrumento puede trabajar entre un rango de presiones de 2 a 9 bar y con una capacidad filtrante entre 20 y 100 micras.



Figura 23 Filtro de Cartucho (Catálogo DirectIndustry)

- Módulo de membranas (Área activa  $0,0042 \text{ m}^2$ )

Dispositivo en el que se van a disponer las membranas que se estudian. En este instrumento es en el que se realiza el permeado, el agua entra en contacto con la membrana a una presión determinada y pasa a través de ella dependiendo de la capacidad que tenga la membrana de realizar este proceso. Tiene una forma rectangular y consta de 1 entrada frontal junto a una salida en posición paralela que

conduce el caudal rechazado y en la parte posterior del módulo existe la segunda salida, que se conoce como colector de permeado.



Figura 24 Módulo planta piloto

El módulo de membranas se ha diseñado para muchos tipos de sistemas de membranas de ósmosis. Este en concreto es para láminas planas. Estas láminas son más versátiles que las tubulares o de fibra hueca.

Las membranas finas presentan mayor facilidad en la colocación, en su posterior extracción y en su limpieza. Lo que quiere decir que tanto el módulo como la membrana son fácilmente reutilizables.

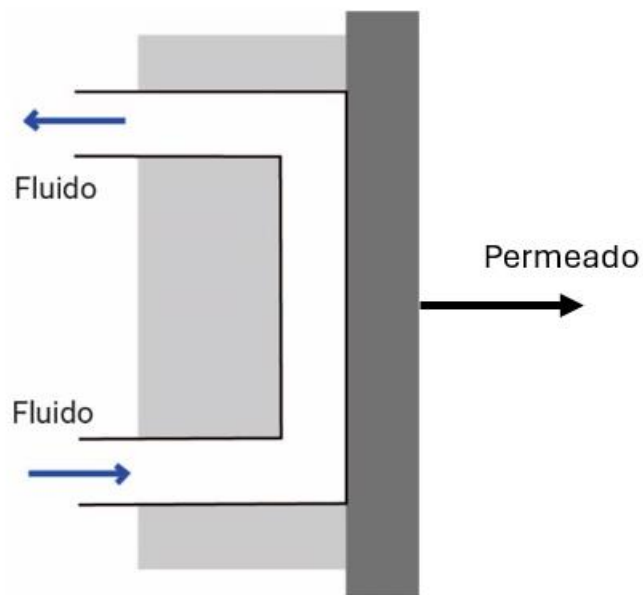


Figura 25 Funcionamiento módulo de membranas poliméricas. (Elaboración propia)



En la Figura 25 Funcionamiento módulo de membranas poliméricas. (Elaboración propia) se observa como el fluido entra en contacto con la membrana, representada en gris oscuro, y se dirige de nuevo al depósito de alimentación.

- Manómetro.

Este dispositivo de medida de presión irá instalado a la salida de la bomba y a la salida del módulo de membranas. Es un punto que es necesario proteger con teflón ya que durante los ensayos solían haber fugas de agua. Cabe destacar que los manómetros que tiene la planta están rellenos de glicerina / silicona. Mide en bar, trabaja entre 1 bar y 25 bar.



Figura 26 Manómetro (Catálogo DirectIndustry)

- Sensor de temperatura o termopar.

Se encuentra en el depósito de alimentación en el que reposa el fluido que circula por el sistema. Mide la temperatura de este y da la información de esta. Realiza las medidas en grados centígrados. El sensor es capaz de medir por debajo del 0 y por encima de 50 °C aunque el rango sea de 20 a 25 °C. Aunque la planta industrial no necesite uno, ofrece información al operario.



Figura 27 Termopar (Catálogo DirectIndustry)

- Válvula reguladora de presión.

Válvula que gradúa la presión, caudal y velocidad del fluido que circula por el sistema. Se regula de forma manual. Abre en sentido antihorario y cierra en sentido horario.



Figura 28 Válvula reguladora de presión (Redirect Notice, s. f.-d)

- Válvulas de dirección de flujo.

La planta debe presentar unas válvulas que puedan dirigir el flujo o detenerlo si fuera necesario. Tienen una estructura muy sencilla y en este caso son de PVC. En la planta industrial se encuentran en la salida del depósito de alimentación y en cada salida de cada elemento de membranas. Esto permitirá al operario un mayor control sobre las etapas del sistema y permite el funcionamiento de la planta en caso de mantenimiento de algún elemento de membrana.

- Rotámetro.

Instrumento de medida de caudal que permite comprobar la cantidad de fluido que circula por el sistema. De 0 a 20 L/min.

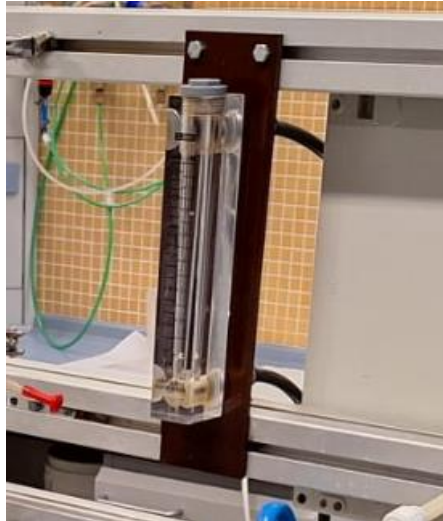


Figura 29 Caudalímetro de la planta piloto (Elaboración propia)

- Sistema de adquisición de datos.

El muestreo, que se realiza para investigar el permeado de las membranas dispuestas en su respectivo módulo, se realiza sobre una balanza y el software LABVIEW que grafica las medidas de flux cada 30 segundos para controlar la dispersión de los puntos obtenidos.

Cabe destacar que un diagrama de flujo es la representación gráfica del proceso de filtración paso por paso.

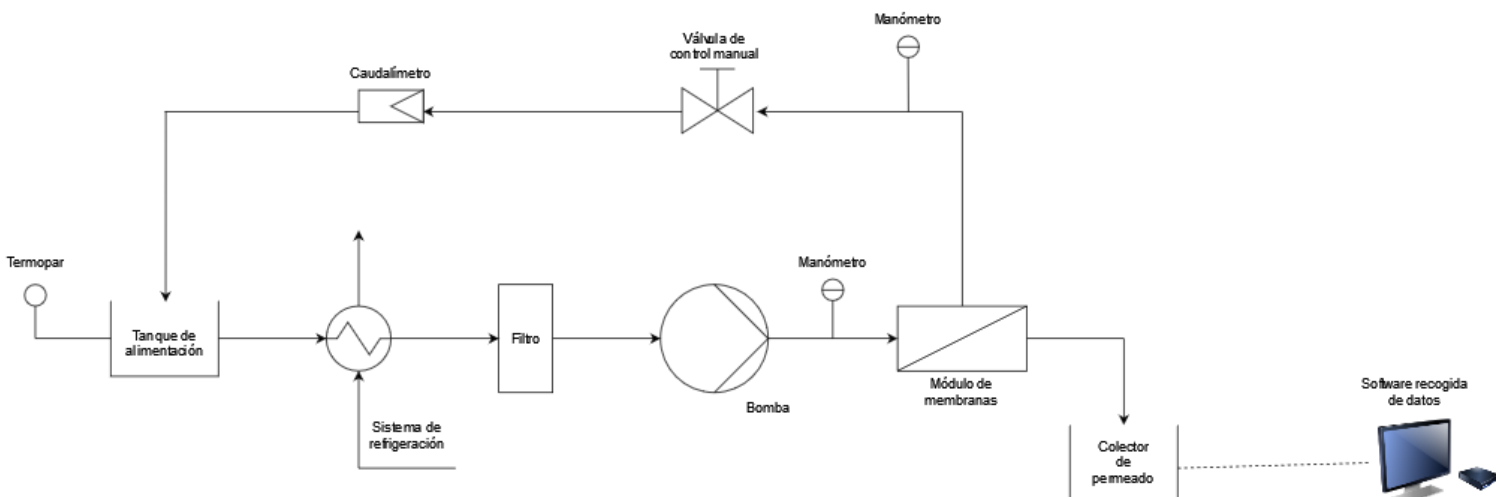


Figura 30 Diagrama de flujo planta piloto (Elaboración propia)

## 4.2 Preparación de las membranas

Para realizar los ensayos es necesario obtener las láminas del elemento original. Por lo que se recortan de varios lugares para obtener una media en la medición. Se busca que la información obtenida tras dichos ensayos sea lo más uniforme posible.

Además, tienen que caber en el módulo por lo que debe tener un tamaño máximo de 16 cm de largo y 8 cm de ancho. Estas muestras presentan una superficie permeable de  $0,0042 m^2$ , siendo acorde al módulo.

Una vez recortadas deben permanecer húmedas por lo que se disponen con una disolución de agua destilada y formaldehído 1%. Es recomendable que estas bolsas permanezcan en una nevera.

Para diferenciar las membranas que van siendo individualizadas se ha seguido la siguiente nomenclatura.

Aquellas que han sido expuestas a hidróxido sódico (NaOH) que fueron las primeras, seguían el nombre MA1, MB1, MC1 y así en serie. La explicación consiste en M de membrana, la letra del abecedario siguiente se trata del orden en el que fueron guardadas y el número indica que tipo de prueba se ha realizado con ella. 1 nanofiltración, 2 ultrafiltración.

Como el flux se alejaba en exceso del objetivo, se desestimaron los ensayos con estas membranas y se dispuso a cambiar la preparación.

El procedimiento a continuación es distinto. Para realizar la limpieza de las membranas se ha llevado a cabo el siguiente procedimiento. Las membranas se exponen a un componente ácido para evitar que el polímero contenga sales adheridas de su anterior trabajo, en este caso se utiliza ácido acético. Se ha determinado que con 30 minutos es suficiente ya que no se han visto cambios en exposiciones más duraderas. Finalizado el tiempo, se limpian con agua para posteriormente exponer las membranas al oxidante. El uso de NaOCl como oxidante se debe a la facilidad de obtención en grandes cantidades y su bajo precio. En la sección 4.5 Ensayo de nanofiltración y ultrafiltración se dispone una tabla con las diferentes características de los ensayos realizados.

Es por ello por lo que se creó otra nomenclatura. M1, M2, M3, etc. En este caso enumera las membranas según el orden de cómo se iban poniendo a degradar.

## 4.3 Preparación del software

La planta piloto utilizada en el ensayo está vinculada a un ordenador que recopilará y procesará toda la información del permeado mediante un software especializado llamado LABVIEW. Este software emplea un método de medición por diferencia de peso para determinar con precisión la cantidad de agua que se dirige a la balanza, controlando el flujo gota a gota.

Este programa proporciona la capacidad de visualizar gráficos que representan el tiempo y el flujo durante el desarrollo del ensayo.

El procedimiento de preparación implica ingresar los datos pertinentes de la membrana en el programa, incluyendo su referencia, área y si se trata de una membrana polimérica o cerámica, entre otros detalles relevantes.

Es esencial destacar que el dispositivo realiza muestreos a intervalos de tiempo de 30 segundos, lo cual garantiza la adquisición de datos adecuada sin generar excesivas interferencias. El área de acción de la membrana que se dispondrá es de  $0,0042 \text{ m}^2$ .

Posteriormente, en MATLAB, se programa el código que ajusta los datos obtenidos en dichos ensayos para realizar las gráficas de muestra.

A continuación, se muestra el código:

```
% Importar los datos del pendrive
M = importdata ('M9_10bar_20C_1.txt');
% Columnas de tiempo y flux para representar
TiempoM = M.data(:,2);
FluxM = M.data(:,8);
FluxM(1,:) = [];
% Media columna flux
media_FluxM = mean(FluxM)

% Umbral de exclusión de datos
umbral = 2;
desviacion_estandar_FluxM = std(FluxM);
datos_filtrados = FluxM(abs(FluxM - media_FluxM) < umbral *
desviacion_estandar_FluxM, :);
flux_filtro = datos_filtrados;
longitud_filtrada = length(flux_filtro);
TiempoM_recorte = TiempoM(1:longitud_filtrada);

plot(TiempoM_recorte,flux_filtro, 'o');
hold on
ylim([0,120])
plot(get(gca,'xlim'), [media_FluxM media_FluxM], 'r--');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Flux (Lmh)');

grid on
```

Se comienza importando los datos obtenidos de los ensayos y se obtienen las columnas de tiempo y flux. Estos datos se importan desde un archivo de texto y se almacenan en la variable "M". Más adelante, se extraen la columna de tiempo y la columna de flux de estos datos. La primera fila de esta última columna se elimina para evitar una desviación en los datos.

A continuación, se calcula una media de los valores de *fluxM* y se vuelve a almacenar como *media\_FluxM* para utilizarlo más tarde. Se hace un filtrado de datos basados en un umbral. Se define el umbral y se calcula la desviación estándar de *FluxM* y se filtran los datos para incluir solo aquellos dentro de dos desviaciones estándar de la media (*umbral · desviacion\_estandar\_FluxM*). Los datos filtrados se almacenan en *flux\_filtro*, y *TiempoM\_recorte* se ajusta a la longitud de los datos filtrados.

Por último, la visualización de los datos, se realiza un gráfico de dispersión de los datos filtrados (*flux\_filtro*) frente al tiempo (*TiempoM\_recorte*). La línea de la media de *FluxM* se traza como una línea punteada roja. Los ejes se etiquetan como "*Tiempo (s)*" y "*Flux (L/m<sup>2</sup>·h)*", y se activa una cuadrícula para mejorar la visualización.

## 4.4 Preparación del ensayo

El encendido de la planta debe ser prudente, se debe seguir unos pasos obligatorios para que el ensayo funcione lo mejor posible.

1. Se llena el depósito de suministro / alimentación de la planta con aproximadamente 6 o 7 litros de agua destilada.
2. Se enciende primero el intercambiador de calor con la finalidad de preparar la temperatura del agua en el circuito. Normalmente se regula el intercambiador para que el alimento intervenga a una temperatura estable y constante mientras se realizan las pruebas. Durante el ensayo se consiguen temperaturas estables entre 19 y 21 °C.
3. Se comprueban todas las válvulas de dirección de flujo. Deben estar todas abiertas menos la de limpieza. Esa debe quedar cerrada para evitar la salida del agua del circuito.
4. Antes de encender el circuito, se realizan 2 incisiones en la membrana dispuesta a introducirse en el módulo. Ya que va fijada en 2 soportes.

5. Una vez quede el módulo firmemente cerrado, se enciende el PLC que controla la planta piloto. Se debe ajustar para obtener un caudal de 5 l/min.
6. Una vez hayan desaparecido las burbujas del caudalímetro se cierra la válvula previa que genera la presión necesaria sobre el módulo. Así se sabe que el sistema no contiene nada de aire en su interior.

## 4.5 Protocolo de limpieza de membranas de nanofiltración y ultrafiltración

A continuación, en la Tabla 3 Membranas, tiempo de exposición y flux se puede distinguir la nomenclatura de las membranas, su tiempo de exposición al oxidante y el flux obtenido en sus respectivos ensayos en la planta piloto preparada para nanofiltración. A unos 20 °C y 10 bar de presión. La concentración inicial de ácido acético al que se exponen las membranas es de 1% en volumen y la concentración de hipoclorito sódico (oxidante) es del 50% en volumen. En cambio, las membranas M3D, M3E, M3F y M3G se expusieron a una concentración menor de oxidante. Los porcentajes al lado del tiempo de exposición indica la concentración en % volumen del hipoclorito sódico.

Tabla 3 Membranas, tiempo de exposición y flux

<b>MEMBRANAS EN NANOFILTRACIÓN</b>	<b>TIEMPO DE EXPOSICIÓN (h)</b>	<b>FLUX OBTENIDO (l/h·m<sup>2</sup>)</b>
M1	2	25
M2	3	47
M3	4	
M3B	4	160
M3C	4	350
M3D	4 (25%)	55
M3E	4 (10%)	250
M3F	4 (25%)	475
M3G	4 (10%)	60
M4	5	225
M5		
M6	14	175
M7	24	300
M8	4	250

Durante los ensayos se pudo determinar que estas membranas pueden romperse. En el primer ensayo con una membrana M3, se produce una rotura en el polímero. Esto se detecta con una subida repentina de flux.

Aquellas membranas que han obtenido valores de flux por encima de  $150 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2$  en la planta de nanofiltración, se cambia la planta piloto para prepararla para ultrafiltración.

Las condiciones que se van a utilizar en la planta de ultrafiltración son las siguientes:

Se mantiene la temperatura a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  pero la presión ahora cambia de 10 a 2 bar.

Tabla 4 Membranas, tiempo de exposición y flux

<b>MEMBRANAS EN ULTRAFILTRACIÓN</b>	<b>TIEMPO DE EXPOSICIÓN (h)</b>	<b>FLUX OBTENIDO (<math>\text{L/h}\cdot\text{m}^2</math>)</b>
M4	5	42,5
M6	14	42,5
M7	24	77,5

## 4.6 Preparación recta patrón

Una vez se tienen membranas preparadas y ensayadas con agua destilada se comprueba el rechazo de estas. El rechazo se comprueba midiendo la conductividad del permeado. Entonces, ¿Cómo se obtienen valores de concentración de las sales a partir de la medición de la conductividad?

Esta pregunta se responde con la recta de calibrado, o también conocida como recta patrón. Este procedimiento consiste en realizar 5 disoluciones a diferentes concentraciones de la sal en cuestión.

Se parte de 1 L de disolución de  $\text{MgSO}_4$  y se preparan 5 matraces. La concentración y la conductividad resultante se puede ver en el siguiente apartado.

De la misma forma se prepara la recta patrón de PEG 35 y 20 kDa.

### 4.6.a Recta patrón en Nanofiltración

La recta patrón se realiza para conocer la capacidad de rechazo y permeado que tiene la membrana sobre una sal específica. Según una marca fabricante DUPONT, de membranas, la caracterización de las membranas de nanofiltración se



realiza con  $MgSO_4$ . Por lo que se ha preparado unas medidas de conductividad a diferentes concentraciones. Tabla 5 Recta patrón Nanofiltración.

Tabla 5 Recta patrón Nanofiltración

Recta patrón $MgSO_4$		
Muestra	Concentración (g/L)	Conductividad (mS/cm)
1	0,125	0,1196
2	0,25	0,212
3	0,5	0,372
4	1	0,661
5	2	1,143

Que genera la siguiente recta:

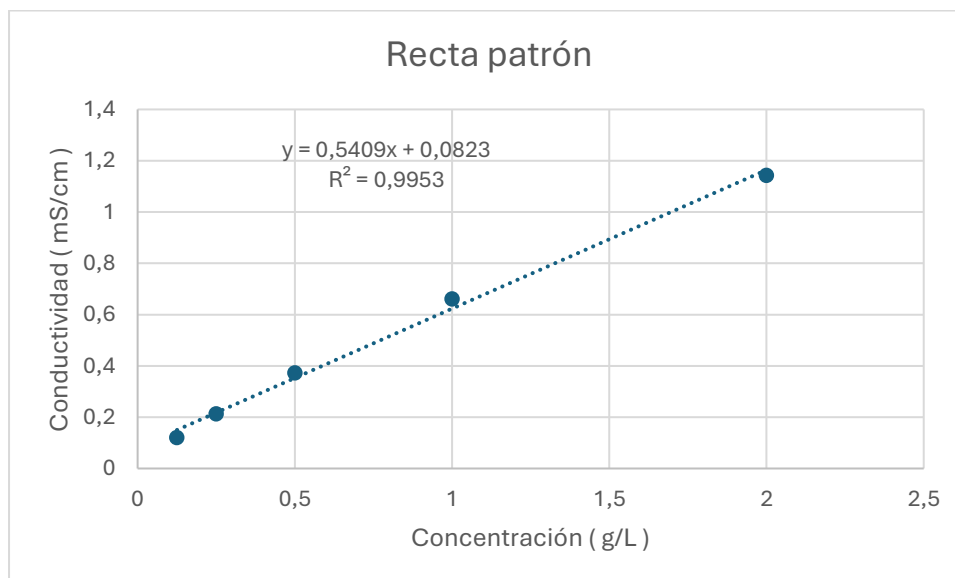


Figura 31 Recta patrón  $MgSO_4$

#### 4.6.b Recta patrón en Ultrafiltración

Para la caracterización de las membranas en ultrafiltración se utilizará Polietilenglicol 35 kDa y 20 kDa. La unidad de medida kDa es kilodalton, es una unidad de medida para expresar la masa molecular. Se han utilizado 2 tipos ya que se quiere comprobar cuál es la eficiencia del grado de oxidación de la capa activa, ya que, como se consiguieron buenos resultados con una masa molecular de 35 kDa se cambia a un componente de masa molecular menor para poder determinar el rango de permeabilidad de la membrana.

Al igual que en el anterior caso, aquí se disponen las rectas patrones para cada uno de los componentes. Ya que se utilizarán las ecuaciones de estas rectas en el cálculo del rechazo de las membranas de ultrafiltración.

En el eje x, se encuentra la concentración en % peso y en el eje y, se encuentra el índice de refracción (adimensional). Figura 32 Recta patrón PEG 35 kDa.

Tabla 6 Recta patrón PEG 35 kDa

Recta patrón PEG 35 kDa		
Muestra	Concentración %peso	Índice de refracción
1	0	1,3340
2	0,5	1,3345
3	1	1,3350
4	5	1,3405

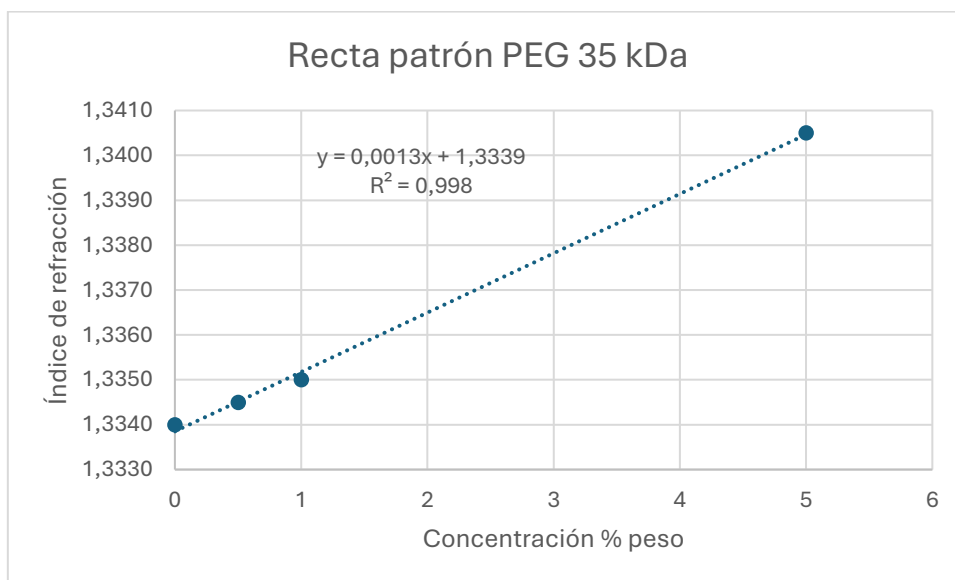


Figura 32 Recta patrón PEG 35 kDa

Tabla 7 Recta patrón PEG 20 kDa

Recta patrón PEG 20 kDa		
Muestra	Concentración %peso	Índice de refracción
1	0	1,3331
2	0,5	1,3337
3	1	1,3345
4	5	1,3397

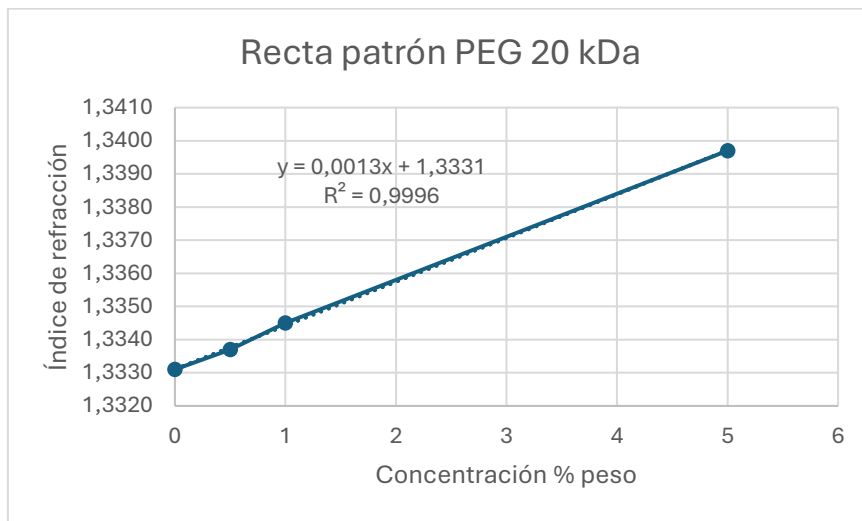


Figura 33 Recta Patrón PEG 20 kDa

# CAPÍTULO 6

---

## EXPOSICIÓN DE RESULTADOS

## 5. Resultados de los ensayos

Tras realizar el procedimiento experimental en la planta piloto tal como se ha explicado anteriormente, se ha dividido los resultados en 2 apartados. El primer apartado dedicado a nanofiltración y el segundo para ultrafiltración. Sendos apartados comparten estructura.

### 5.1 Resultados en nanofiltración

La degradación por oxidante en las membranas de nanofiltración ha sido algo más difícil de conseguir. Se han obtenido para las mismas horas de oxidación unos rangos de valores algo dispersos, algunos trozos presentan mayor densidad o grosor que otros aun siendo tomados del mismo tramo por lo que es normal que se produzcan variaciones en las mediciones.

Lo óptimo en membranas de nanofiltración es obtener un porcentaje de rechazo de sales mayor al 90 %, el máximo obtenido en el laboratorio lo presenta la membrana M3D con un 82 %. Cabe destacar que las membranas de nanofiltración se caracterizan para obtener un porcentaje de rechazo de sales superior al 95 %.

Los rangos que se han tomado de flux para considerar una membrana como productora en nanofiltración oscila entre 50 y 100  $l/h \cdot m^2$ .

Como se puede observar en la Tabla 8 Membranas en planta de nanofiltración, se presentan las distintas membranas con sus respectivas horas de exposición al oxidante y los flux obtenidos.

*Tabla 8 Membranas en planta de nanofiltración*

MEMBRANAS EN NANOFILTRACIÓN	TIEMPO DE EXPOSICIÓN (h)	Flux ( $l/h \cdot m^2$ )
M0	0,5	14
M1	2	25
M2	3	65
M3	4	
M3B	4	160
M3C	4	350
M3D	4 (25%)	55
M3E	4 (10%)	250
M3F	4 (25%)	

M3G	4 (10%)	60
M4	5	225
M5	10	
M6	14	175
M7	24	300
M8	4	250
M9	1	65
M10	2	125
M11	3	100
M12	0,5	17,5
M13	1	70
M14	1,5	15
M15	1,5	500
M16	2	20

En verde han sido marcadas aquellas que están dentro de los valores estimados para esta función y que pueden pasar a ser caracterizadas.

Es necesario destacar que las membranas M3, M3F y M5 se rompieron durante el proceso, M3 se ha explicado anteriormente. En cuanto a M3F durante el ensayo presentaba valores de flux por encima de 700, por lo que se desestimó. M5 en cambio, en la colocación en el módulo de membranas se produjo una rotura en la parte trasera de la membrana.

Ahora, en cuanto al porcentaje de rechazo que presentan las membranas en verde, se realiza la prueba de caracterización con la disolución de la sal de  $MgSO_4$  en unas condiciones específicas, 4,8 bar y 25 °C.

Como se ve en la Tabla 11, se presenta el nombre de la membrana del ensayo, la medida de la conductividad, la concentración de sal en el permeado obtenido a través de la ecuación de la recta patrón y el porcentaje de rechazo.

Tabla 9 Concentración de sal en el permeado en nanofiltración

Concentración de permeados en Nanofiltración [ 4,8 bar; 25 °C ]			
Muestra	Conductividad ( mS/cm )	Concentración ( g / l )	Rechazo (%)
M3B	1,10	1,88	5,93
M6	1,12	1,92	4,17
M2	0,88	1,47	38,13
M3D	0,32	0,44	82,00
M3G	0,379	0,55	76,96
M9	0,473	0,72	69,03

M10	1,11	1,90	18,55
M11	1,127	1,93	17,20
M13	0,831	1,38	34,54
M3G	0,702	1,15	45,82
M9	0,311	0,42	80,00

Como se explica anteriormente, en verde quedan destacadas las membranas obtenidas con mejor porcentaje de rechazo. En blanco, aquellas que presentan también un porcentaje alto también, pero por debajo del 80 %. En rojo, todas aquellas que presentan un porcentaje de rechazo mínimo e insuficiente.

Por último, se muestra en la Figura 34 el flux obtenido por cada membrana ensayada en la planta de nanofiltración frente al tiempo de exposición al oxidante.

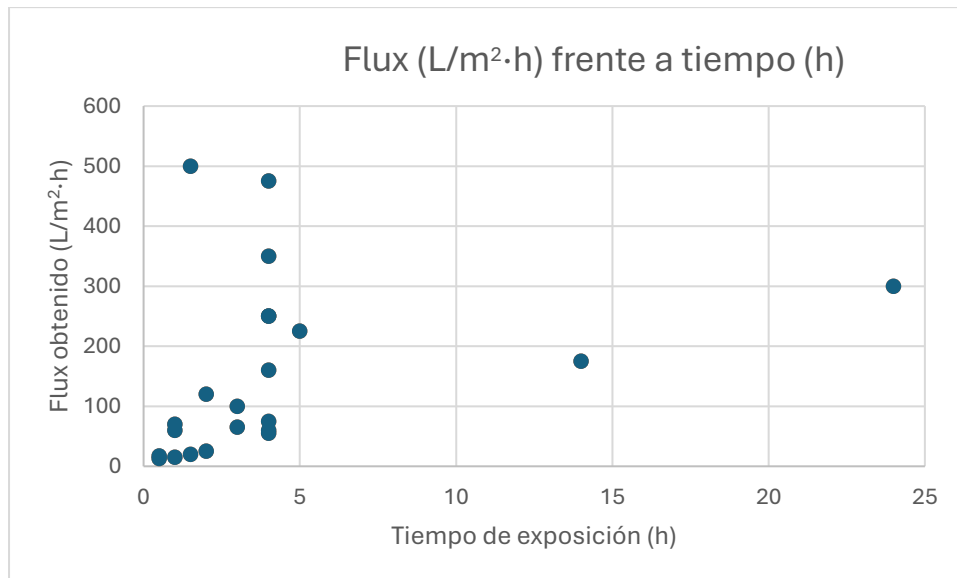


Figura 34 Flux frente a tiempo de exposición en nanofiltración

## 5.2 Resultados en ultrafiltración

La degradación de las membranas mediante NaOCl tras ciertas horas de exposición consigue abrir los poros de estas.

Se ha determinado que a partir del rango de 120 y 150 l/h·m<sup>2</sup> en condiciones de nanofiltración, que aquellas membranas que lo superasen pertenecen al rango de ultrafiltración.

De esta manera estas son las membranas enviadas a ultrafiltración con sus respectivos flux y horas de exposición:

Tabla 10 Membranas en ultrafiltración

MEMBRANAS EN ULTRAFILTRACIÓN	TIEMPO DE EXPOSICIÓN (h)	Flux (l/h·m <sup>2</sup> )
M3C	4	85
M3E	4	77
M4	5	42
M6	14	42
M7	24	77

Se ha medido el porcentaje de rechazo de las membranas M4, M6 y M7 para comprobar su estado, las 3 superaron con éxito el ensayo. Por lo que se puede generar la idea de que aquellas membranas que superen las 5 horas de exposición al oxidante presentan un flux semejante al necesario que presentan las membranas de UF en el mercado con un cut off en las moléculas de hasta 20 kDa de tamaño. En la Tabla 11 se disponen los valores del ensayo con PEG 35 kDa:

Tabla 11 Valores de rechazo en ultrafiltración (PEG 35 kDa)

Concentración de permeados en Ultrafiltración [ 2 bar; 20 °C ]			
Muestra [PEG 35]	Índice de refracción	concentración ( % peso )	Rechazo (%)
M4	1,333	0	100
M6	1,3332	0	100
M7	1,3335	0	100

Debido a que con el componente orgánico de 35 kDa no quedaba duda del potencial de las membranas seleccionadas se probaron con un componente más pequeño. PEG 20 kDa:

Tabla 12 Valores de rechazo en ultrafiltración (PEG 20 kDa)

Concentración de permeados en Ultrafiltración [ 2 bar; 20 °C ]			
Muestra [ PEG 20 ]	Índice de refracción	Concentración ( % peso )	Rechazo (%)
M4	1,3332	0,077	95,45
M6	1,3331	0	100
M7	1,3335	0,31	81,82



Como se observa en la Tabla 12, un tiempo de exposición al oxidante elevado como presenta M7 (24 horas) puede generar una peligrosa degradación de la capa activa de la membrana.

A continuación, se ha examinado el Flux obtenido en función del tiempo de exposición para buscar una relación entre dichos parámetros. En cambio, como es observable en la Figura 35, no aparece tal relación muy probablemente debido a la heterogeneidad de la capa activa de la membrana de OI de la que se ha partido y al grado de ensuciamiento que presenta.

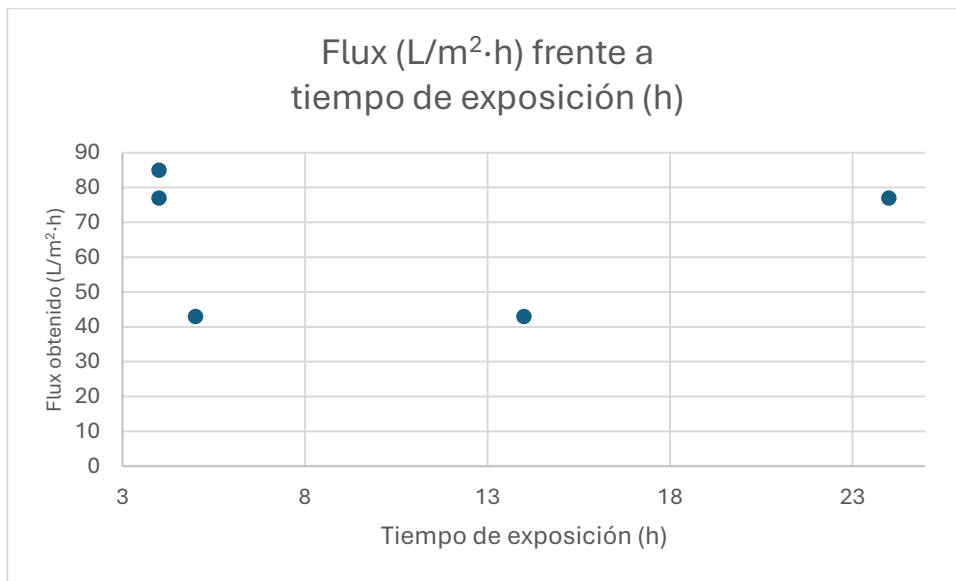


Figura 35 Flux frente a tiempo de exposición

Por último, todos los gráficos producidos en los ensayos de estas membranas están presentados en el Anexo 2.

# CAPÍTULO 7

---

## REALIZACIÓN DEL DISEÑO Y ESCALADO INDUSTRIAL

## 6 Diseño y escalado industrial

En el presente apartado, se detalla el diseño y selección de componentes clave para la implementación industrial de un sistema de membranas de ósmosis inversa. Una vez completado el proceso experimental en laboratorio, se procede a trasladar los resultados obtenidos a un contexto industrial. Este proceso implica una serie de decisiones técnicas fundamentales, desde la elección de las tuberías hasta la integración de válvulas, manómetros y otros instrumentos esenciales. A lo largo de este apartado, se describen los distintos componentes y sus características, justificando la elección de cada uno y proporcionando una visión detallada del sistema en su totalidad. El objetivo es garantizar que el diseño industrial no solo mantenga la eficacia observada en laboratorio, sino que también cumpla con los estándares de robustez y operatividad necesarios para su aplicación práctica.

### 6.1 Tuberías

Una vez finalizado el proceso experimental, es necesario llevar el ensayo del laboratorio a la industria. Para ello, se diseña el proceso con el tamaño adecuado para un elemento de membranas. Como es lógico, a nivel industrial, se utilizará la planta para adecuar elementos completos por lo que el diseño debe ir acorde.

Lo más básico es el elegir las tuberías por las que va a pasar el fluido de las membranas. Este debe resistir el paso de ácido acético, hipoclorito sódico y agua en unas condiciones específicas. Estas sustancias son corrosivas y por lo tanto el material de las tuberías debe resistir los fluidos cloros alcalinos. Existen 2 tipos de corrosiones con las tuberías de acero, por ejemplo. Aquellas tuberías que están formadas por acero al carbono sufren más de corrosión localizada, mientras que las de acero inoxidable sufre corrosión por estrés. Además de las corrosiones, las tuberías deben soportar diferencias de presión.

El PVC, o policloruro de vinilo, es un polímero termoplástico ampliamente utilizado debido a su versatilidad y durabilidad.



Figura 36 PVC (Gd-Admin, s. f.)

Una de las características más destacadas del PVC es su resistencia química, lo que lo hace adecuado para entornos corrosivos como tuberías de alcantarillado y aplicaciones que requieren contacto con productos químicos. Además, el PVC es conocido por su durabilidad y resistencia al impacto, lo que lo convierte en una elección popular para productos que necesitan resistir el desgaste y el uso continuo.

A pesar de sus propiedades robustas, el PVC sigue siendo un material relativamente económico de producir, lo que lo convierte en una opción atractiva. Su facilidad de trabajo, tanto en términos de corte y moldeo como en unión, lo hace accesible para diversos procesos de fabricación. En adición, el PVC es reciclable, lo que significa que puede ser reutilizado en diferentes aplicaciones después de su vida útil inicial, contribuyendo así a la sostenibilidad.

Según el diagrama de flujo, Figura 42, las tuberías de PVC están seccionadas en tramos.

El primer tramo conecta la salida de acero de la bomba con el elemento de membranas. Tiene aproximadamente 1,3 metros de largo. Esta distancia se justifica con la intención de que un operario de cualquier altura pueda acceder al elemento de membranas. El segundo tramo, en cambio, se encuentra en la salida del rechazo del elemento de membranas. Este consta de una boquilla de PVC y una forma tipo T, a su vez, conectada a 2 válvulas en los respectivos extremos de la T. Estas válvulas permitirán al operario dirigir el flujo del sistema a voluntad.

Por la primera válvula, sale un tercer tramo de tubería que conduce el fluido al tanque dónde succiona la bomba. Con una medida de 0,7 metros. Se trata de una tubería que desciende 0,7 metros para que no coincida con las dimensiones del depósito de alimentación. Por la segunda válvula del tipo T, se encuentra una válvula de cierre manual y un cuarto tramo de tubería de PVC, de unos 30

centímetros. Esta sección finaliza en un desagüe para la eliminación de los fluidos del sistema. El permeado del elemento no es necesario que sea de PVC ya que no necesita resistir las condiciones dichas anteriormente.

## 6.2 Pérdidas de carga en tuberías

El cálculo de la pérdida de carga de las tuberías sirve para decidir la dimensión de la bomba o las dimensiones de las tuberías. Proporciona una base sólida para la toma de decisiones en este tipo de sistemas.

La pérdida de carga se puede obtener a partir de varias fórmulas.

Ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = \frac{8 \cdot f \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$f$  = factor de fricción;

$L$  = longitud total de la tubería (m);

$g$  = aceleración de la gravedad ( $m^2/s$ );

$D$  = diámetro interno de la tubería (m);

$Q$  = caudal que transporta la tubería (l/s);

Ecuación de pérdidas de carga por longitud:

$$j = h_f / L \quad \text{Ec. 7}$$

Ecuación general de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right] \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$f$  = factor de fricción;

$D$  = diámetro interno de la tubería (m);

$Re$  = número de Reynolds;

$\varepsilon$  = rugosidad de la tubería (mm);

Ecuación general simplificada de Swamme-Jain:

$$f = 0.25 \cdot \left[ \log_{10} \left[ \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right] \right]^{-2} \quad Ec. 9$$

Donde:

$f$  = factor de fricción;

$D$  = diámetro interno de la tubería (m);

$Re$  = número de Reynolds;

$\varepsilon$  = rugosidad de la tubería (mm);

Ecuación del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad Ec. 10$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido ( $\frac{kg}{m^3}$ );

$v$  = velocidad del fluido (m / s);

$d$  = diámetro (m);

$\mu$  = viscosidad dinámica (Pa · s);

Partiendo de los siguientes datos:

*Tabla 13 Datos del sistema*

Datos del sistema		
<b>Caudal</b>	$Q (m^3 / s)$	$8,3 \cdot 10^{-5}$
<b>Dinterior</b>	$D (m)$	0,07
<b>Espesor</b>	$e (mm)$	3
<b>Velocidad</b>	$v (m / s)$	0,02
<b>Viscosidad agua</b>	$\mu (cm^2 / s)$	0,0104

Se obtienen los siguientes valores:

Tabla 14 Pérdidas de carga

Resultados pérdidas		
<b>Reynolds</b>	Re	1,482
<b>Factor fricción</b>	f	0,0547
<b>Pérdidas de carga</b>	$hf [mca]$	0,0000536
<b>Pérdidas de carga por longitud</b>	$j [mca / m]$	$1,786 \cdot 10^{-5}$

$j$  queda definida anteriormente como pérdida de carga por longitud.

Ya que las pérdidas de carga de las tuberías de la planta industrial son tan cercanas a 0, se pueden despreciar.

### 6.3 Soporte para el elemento de membranas

Los elementos de membrana van sujetos en un tubo de presión. Normalmente los tubos de presión están contruidos a partir de materiales duraderos y resistentes a la corrosión. Comúnmente hechos de plásticos de alta calidad como el polietileno (PE), polipropileno (PP) o policloruro de vinilo (PVC).

Según la ficha técnica de YUKANE, (YUKANE, 2019), este tipo de tubos soportan 8,6 bar y un rango de temperatura entre 4 a 42 °C.



Figura 37 Carcasa para membranas

## 6.4 Válvulas y Manómetros

En cuanto a los manómetros, es necesario que la planta presente 4 unidades. Uno en la entrada de los elementos y los otros 3 en la salida de cada uno de ellos respectivamente. Esto permitirá al operario obtener información de la diferencia de presiones entre la salida de la bomba y la salida del elemento.



*Figura 38 Manómetro (Catálogo DirectIndustry)*

En el primer anexo se pueden ver las características de los manómetros que se van a utilizar. En este caso es el MAN-RF 22/72 100mm VA

En cuanto a las válvulas, se disponen de 2 tipos. Una válvula de presión que se encuentra en la salida del elemento que regula la presión del circuito y otra que permita o no la circulación del fluido. Estas válvulas son componentes esenciales en los sistemas de tuberías del sistema ya que en ciertas ocasiones se requerirá el cierre parcial del circuito, bien para vaciar o por mantenimiento. En este caso serán de PVC.

## 6.5 Bomba hidráulica

Debido a que las necesidades de presión y caudal en la planta para limpieza son bajos, aproximadamente entre 2 y 10 bar de presión y una capacidad de bombeo hasta 15 L/min para que los elementos de membrana puedan limpiarse eficazmente, la bomba escogida es una bomba centrífuga.



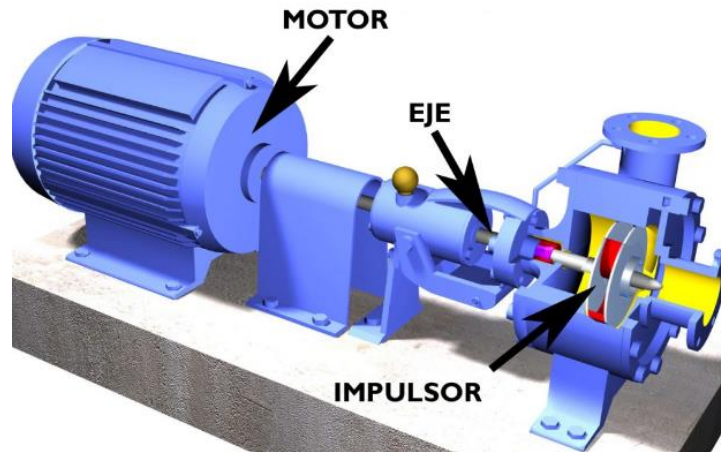


Figura 39 Bomba centrífuga (Vladimir Nishnik, Technology Consultant Software&Control en Rockwell Automation et al., 2023)

Estas bombas son de las más utilizadas para impulsar fluidos en la industria ya que permite un amplio catálogo de opciones. El modelo que mejor plantea esta función a estas características es:



### Centrifugal pump (S)TC25 series

for industrial water for coolant for lubricants

Sold by:

LINETA, S. L. Barcelona, Spain

Figura 40 Bomba centrífuga (Catálogo DirectIndustry)

Según las especificaciones de la bomba, Figura 41, es capaz de bombear el agua al sistema con el flujo necesario para el funcionamiento del sistema. El modelo exacto que se va a utilizar es el Centrifugal pump (S) TC25 series.

**Flow**  
10 l/min  
(2.64172 us gal/min)

**Head**  
Max.: 140 m  
(459'03" )

Min.: 28 m  
(91'10" )

**Power**  
Max.: 1.75 kW  
(2.38 hp)

Min.: 0.48 kW  
(0.65 hp)

*Figura 41 Características bomba centrífuga*

## 6.6 Filtro de cartucho

La bomba del sistema debe estar protegida por 2 filtros de cartucho de 1 y 0,5 micras respectivamente lo que impide la entrada de sólidos. Al tener varios filtros y presentando cada uno de una luz distinta mejora la eficacia del filtrado. Esto permite evitar que tanto la bomba como el elemento de membranas puedan romperse.

## 6.7 Diagrama de flujo

A continuación, se presenta en forma de diagrama de flujo, Figura 42, las conducciones de las tuberías, posición de los manómetros y válvulas, entre otros instrumentos pertenecientes al equipo completo.

Para la planta industrial, se ha decidido colocar 3 módulos de membrana en paralelo. En el diagrama siguiente se observa la nueva estructura decidida y las tuberías e instrumentación con el tamaño correspondiente. Cabe destacar que gracias a las válvulas de dirección de flujo permite el funcionamiento de los elementos de manera independiente o simultáneamente.

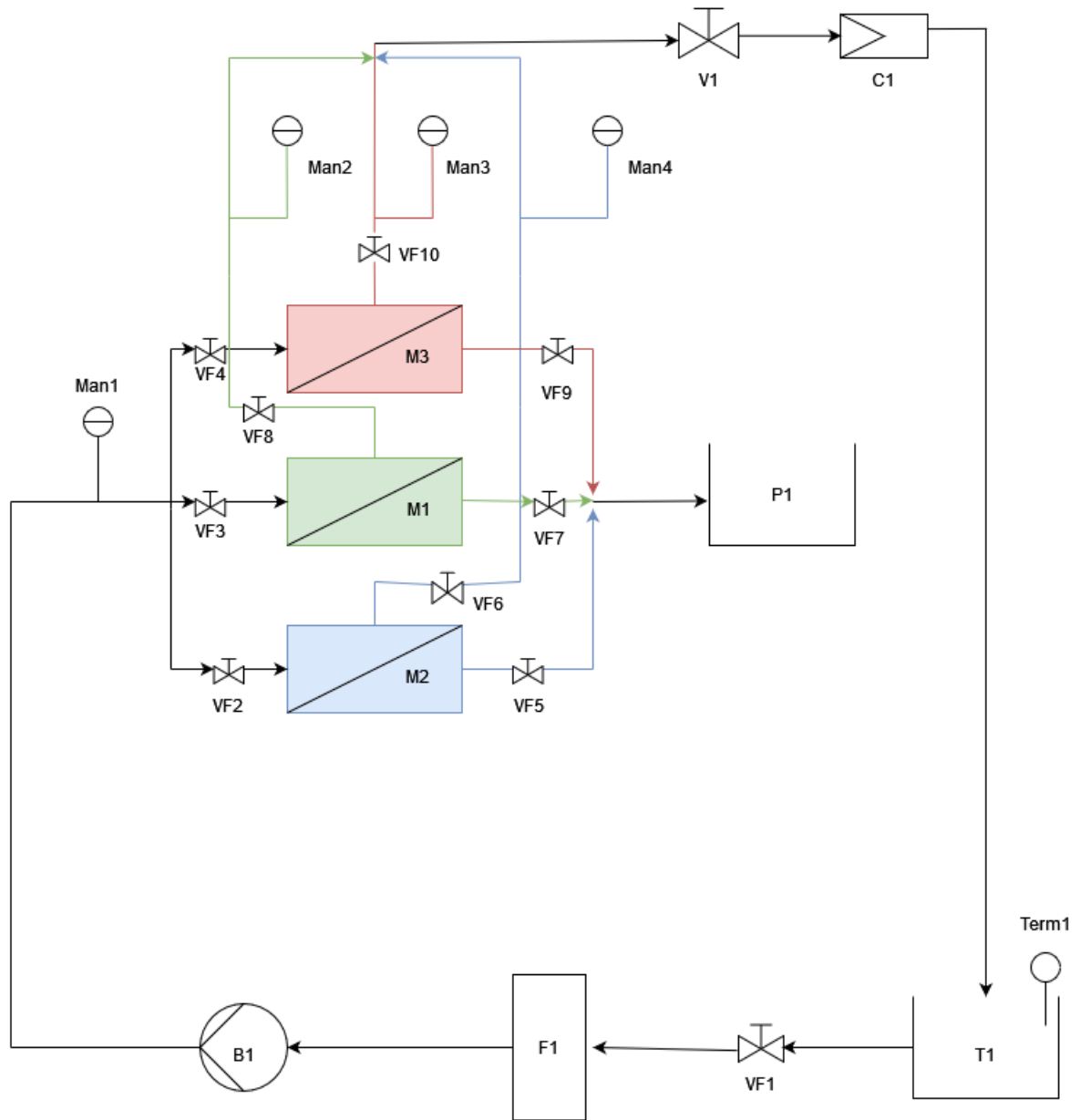


Figura 42 Diagrama de flujo para 3 elementos de membrana (Elaboración propia)

En la Figura 42, se observa el diagrama de flujo de la planta diseñada a nivel industrial. Los distintos elementos se han llamado de la siguiente manera. El depósito de alimentación es T1, el conjunto de 2 cartuchos se llama F1, la bomba de suministro de presión y fluido es B1, los 3 elementos de membrana han seguido los nombres M1, M2 y M3. Por otro lado, el colector de permeado es P1, el caudalímetro es C1 y los manómetros han seguido el nombre de Man1, Man 2, Man 3 y Man 4. Por último, la distinción de las válvulas. La válvula reguladora de presión es V1 y aquellas que su función es únicamente redirigir el fluido se llaman VF. De 10 constará el sistema.

Los colores de las corrientes de los distintos elementos de membrana son simplemente para distinguir las tuberías de cada uno de ellos respectivamente.

## CAPÍTULO 8

---

### ESTUDIO DE VIABILIDAD ECONÓMICA

## 7 Estudio de viabilidad económica

Para evaluar la viabilidad de este proyecto, se ha llevado a cabo un análisis económico exhaustivo. Este estudio abarca los costes y la amortización a largo plazo.

Los costes se han dividido en los siguientes apartados:

1. Costes de inversión.
2. Costes de operación.
  - a. Directos.
  - b. Fijos.
3. Costes variables
4. Costes totales
5. Comparación de precios.

En la sección 7.4 Costes totales, en la Tabla 21, se dispone un desglose de los porcentajes que supone cada sección del coste total junto con el presupuesto de cada una respectivamente.

### 7.1 Costes de inversión

Estos gastos son los necesarios para la puesta en marcha y desarrollo de un proyecto. En estos valores se tendrán en cuenta el equipo necesario, así como la bomba, tuberías, válvulas, termopar, entre otros. El coste de las tuberías, así como el de los equipos han sido obtenidos de la página CYPE (CYPE Ingenieros, n.d.). Esta página web consiste en una base de datos para diferentes oficios. (Arquitectura o ingeniería). El resto de los costes se han obtenido de los valores genéricos y correlaciones del libro *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (Turton & Turton, 2012).

Tabla 15 Presupuesto de inversión

Variación IPC (1,4 %)		
Cantidad	Equipos	Precio / €
	<b>Costes totales de cada equipo</b>	
1	Bomba centrífuga centrifugal pump (S) TC25 series	18037,09
4	Manómetro glicerina	173,16
2	Filtro de cartucho	50,92

<b>1</b>	Válvula de presión	19,34
	<b>Otros costes asociados</b>	
	Costes en tuberías	431,90
	Costes en instrumentación y válvulas extras	4160,63
	Costes en material eléctrico	2971,88
	Coste en estructuras, aislantes y pinturas	5943,75
	<b>Coste de inversión total</b>	
		<b>31788,66</b>

La variación del IPC se ha obtenido de la página oficial INE, entre el periodo de diciembre de 2021 y diciembre de 2023.

Como se observa en la Tabla 15, el coste de inversión inicial es de 31788,66 €.

A continuación, se adjunta la Tabla 16 que indica los porcentajes del coste total de inversión inicial respectivamente.

*Tabla 16 Porcentaje de cada componente respecto al total*

<b>Cantidad</b>	<b>Equipos</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
	<b>Costes totales de cada equipo</b>	
<b>1</b>	Bomba centrífuga centrifugal pump (S) TC25 series	56,74%
<b>4</b>	Manómetro glicerina	0,54%
<b>2</b>	Filtro de cartucho	0,16%
<b>1</b>	Válvula de presión	0,06%
	<b>Otros costes asociados</b>	
	Costes en tuberías	1,36%
	Costes en instrumentación y válvulas extras	13,09%
	Costes en material eléctrico	9,35%
	Coste en estructuras, aislantes y pinturas	18,70%
	<b>Coste de inversión total</b>	
		<b>100%</b>

Como se observa, el elemento más caro de la inversión inicial es la bomba centrífuga que ocupa un **56,74 %** del total de la inversión. Los costes en instrumentación y válvulas extras que son necesarias en la dirección de flujo ocupan un **13,09 %** y el coste en la estructura, aislantes y pinturas del lugar de instalación ocupa otro **18,70 %** del total.

## 7.2 Costes de operación

Los costes de operación de una planta industrial son los gastos necesarios para mantenerla en funcionamiento y producir bienes o servicios. Incluyen el coste de los materiales, la mano de obra, y la energía. Además, se consideran los gastos en mantenimiento y reparación de equipos, así como la depreciación de los activos físicos debido al desgaste.

También se suman los costes de gestión y administración, que abarcan los salarios del personal administrativo, y los costes de seguridad y salud, necesarios para garantizar un ambiente de trabajo seguro.

Otros componentes son los gastos en almacenamiento y logística, los costes de cumplimiento normativo y ambiental, y las primas de seguros para proteger la planta contra riesgos.

### 7.2.a Costes de operación directos

Los costes de operación directos de la planta en un año son los siguientes:

*Tabla 17 Costes de operación directo*

Items	Coste ( € )	Porcentaje (%)
<b>Costes de operación directo</b>		
Materias primas	3562,40	1,31
Tratamiento de residuos	1569,50	0,58
Suministros	649,28	0,24
Personal	45226,16	16,66
Mantenimiento y reparaciones	5943,75	2,19
Suministros operativos	891,56	0,33
Cargos de laboratorio	3864,00	1,42
<b>Costes de operación directos totales</b>	<b>61706,65</b>	<b>43,00</b>

El tratamiento de residuos se refiere a la gestión de los residuos producidos por la planta. En el libro nombrado anteriormente, (Turton & Turton, 2012), dedica un apartado para realizar esta estimación.



El porcentaje que se observa en la Tabla 17 es sobre el cómputo total, en este caso es del **43,00 %** y el coste de operación directo de la planta en un año es de **61706,65 €**.

El coste del personal se ha determinado a partir de las siguientes estimaciones. Un operario de planta trabaja 48 semanas del año, suponiendo que trabaja 5 días de 8 horas cada uno a la semana. Esto quiere decir que cada operario tendrá 240 días laborables en esta planta (5 días laborales a la semana · 48 semanas). Se necesitan 2 operario por día, uno por turno.

Según 3 plataformas distintas relacionadas con el empleo, el sueldo promedio de un operario de planta en España es de 1615,22 € al mes. Se han repetido este rango de sueldos en las plataformas indeed, InfoJobs y LinkedIn.

Por otro lado, el apartado de supervisión se refiere a la función esencial de gestión y control dentro de una operación de fabricación, que implica la planificación, organización, dirección y evaluación de las actividades y procesos productivos. Este rol es desempeñado por personal especializado, cuyos deberes incluyen no solo la vigilancia y coordinación de las tareas diarias, sino también la implementación de políticas de empresa, la optimización de recursos, y la garantía del cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad.

## 7.2.b Costes de operación fijos

Los costes fijos que se adjuntan a continuación en la Tabla 18 no dependen de ninguna variable. En este caso, amortización, tasas y seguros y un pequeño resguardo desviado a otros costes.

*Tabla 18 Costes de operación fijos*

Items	Coste ( € )	Porcentaje ( % )
<b>Costes de operación fijos</b>		
Amortización	3181,41	2,22
Tasas y seguros	2971,88	2,07
Otros costes	1506,89	1,05
<b>Costes de operación fijos totales</b>	<b>7660,18</b>	<b>5,34</b>

Estos costes son del total un **5,34 %** y la suma de ellos es de **7660,18 €**.

### 7.3 Costes variables

Por último, los costes variables. En este apartado se ha estimado el coste energético de la planta durante un año. Se ha basado en el coste medio de electricidad al día siendo 0,11 €/kWh y un consumo eléctrico anual de unos 5762,40 kWh. El coste energético puede variar en un año debido a cambios en el consumo eléctrico que a su vez depende de la demanda de producto y por la variación del coste de la electricidad. En la Tabla 19 se observa el resultado:

Tabla 19 Costes variables

Items	Coste ( € )	Porcentaje ( % )
<b>Costes variables</b>		
Coste energético	<b>74124,29</b>	<b>51,66</b>

Con un coste anual de **74124,29 €** formando parte del **51,66 %** de la suma total.

### 7.4 Costes totales

Como se nombra al comienzo del apartado 7, aquí se presenta la suma de todos los costes anteriores y los porcentajes se dispone en la Tabla 20:

Tabla 20 Costes totales

Items	Coste ( € )	Porcentaje ( % )
Costes de operación directos totales	<b>61706,65</b>	<b>43,00</b>
Costes de operación fijos totales	<b>7660,18</b>	<b>5,34</b>
Coste energético	<b>74124,29</b>	<b>51,66</b>
Costes totales	<b>143491,12</b>	<b>100,00</b>

Los costes de operación directos totales ascienden a **61706,65 €**, lo que representa el **43,00 %** del total de los costes. Incluyen todos los gastos directamente relacionados con la producción, como materias primas, personal de producción, mantenimiento, suministros operativos, entre otros. Estos costes son variables y dependen directamente del volumen de producción y de las operaciones diarias.

En cuanto a los costes de operación fijos totales, suman **7660,18 €**, equivalente al **5,34 %** del total. Se refieren a los gastos que no varían significativamente con los cambios en la producción, como la amortización, seguros, impuestos fijos, y otros gastos administrativos y de estructura que son necesarios para mantener la operación, independientemente del nivel de producción.

Por último, los costes variables en total son **74124,29 €** siendo un **51,66 %** del total. En estos costes tan solo se incluyen los costes energéticos.

La suma total de todos los costes mencionados es de **143491,12 €**, lo que representa el **100 %** del coste total de operación y fabricación de la planta.

## 7.5 Comparación de precios

Tras una investigación sobre precios reales que se disponen públicamente, en la que se observa lo siguiente. La compra de una membrana de nanofiltración que soporte el caudal necesario de  $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , se suele realizar sobre 350 €. Puede variar entre 300 y 400 €. (Aguamarket, 2002). La compra de una membrana de ultrafiltración, en cambio, suele oscilar entre 150 y 300 €. (Aguamarket, 2002); (DIPROCLEAN, n.d.). La compra de una membrana de ósmosis inversa, siendo la más cara, puede variar el precio entre 300 y 1200 €. (Aguamarket, 2002; DIPROCLEAN, n.d.) Por otro lado, una empresa experimentada en la limpieza de membranas conocida como Oasis Exprés, asegura que limpia y caracteriza membranas de ósmosis inversa sobre 80 €. Debido a esto y al coste de producción, se ha establecido en la Tabla 21 que las membranas tendrán los siguientes precios de venta:

*Tabla 21 Precios de venta de membranas*

Tipo de membrana	Precio por unidad (€)
Ultrafiltración	100
Nanofiltración	195

El precio de un elemento de membrana completamente nuevo puede llegar a costar el doble del que se ha estimado en el reciclado. Pero estas membranas recicladas no es seguro que presenten la misma vida útil que aseguran los vendedores de los elementos de membrana nuevos ya que la función de este proyecto es reciclar las membranas para su posterior uso. La nueva vida útil de estas membranas no ha sido estudio de este trabajo.

## 7.6 Cálculo de VAN, TIR y Payback

El estudio de viabilidad económica se realiza para obtener los términos económicos VAN, TIR y payback. Primeramente, el VAN, Valor Anual Neto, consiste en un método de evaluación de proyectos de inversión que calcula el valor de los flujos de caja futuros que genera el proyecto. Por lo que se realiza con la finalidad de conocer si un trabajo es rentable. Si es positivo es rentable, si es negativo no lo es y si es de valor igual a 0 solo devolverá el dinero invertido. Por otro lado, el TIR es conocido como la Tasa Interna de Retorno. Si este es positivo, el proyecto se considera aceptable porque se espera que genere un retorno superior al mínimo requerido. Por último, el Payback, este valor indica los años en los que se recupera el dinero.

Para el cálculo del VAN se sigue la siguiente ecuación:

$$VAN = -I_0 + \frac{FC}{(1+i)^n} \quad Ec.$$

Donde:

$I_0$  = inversión inicial

FC = flujo de caja

i = intereses

n = años de amortización

El flujo de caja será la suma del beneficio y la amortización, los intereses son un 3,5 % y se ha diseñado la planta con 10 años de amortización. Si se obtiene una producción media de 440 elementos de membrana al mes de los cuales una estimación del 50 % nanofiltración y 50 % ultrafiltración y se venden por los precios estimados anteriormente.

El TIR se calcula con la expresión del VAN igualada a 0 y despejando el valor de i:

$$VAN = 0 = -I_0 + \frac{FC}{(1+i)^n} \quad Ec. 10$$

El Payback se calcula con la división de la inversión inicial entre los ingresos:

$$Payback = \frac{Inversión\ inicial}{Promedio\ de\ beneficios} \quad Ec. 11$$

En la Tabla 22 se observa el resultado de este estudio:

*Tabla 22 VAN, TIR y Payback*

VAN	47413,03 €
TIR	27 %
Payback	5,32

Se ha obtenido un VAN de **47413,03 €** y un TIR de **27 %**. Con el payback se observa que en función de si se consigue la venta estimada, en 5 años y 4 meses se vuelve a conseguir el valor inicial de inversión. Pese a observar que el estudio económico resulta aparentemente viable y la inversión se recupera en un corto periodo de tiempo, no se puede conocer si realmente si el sistema se comportaría como está planeado.

# CAPÍTULO 9

---

## CONCLUSIÓN

## 8 Conclusión

En este trabajo se ha buscado una forma eficaz y útil para reciclar membranas de ósmosis inversa en membranas de ultrafiltración y nanofiltración mediante la exposición de un compuesto oxidante. A partir del uso de LABVIEW y MATLAB se ha llevado a cabo el cálculo y las estimaciones del proceso.

A partir de este estudio se ha demostrado una forma viable de obtención de membranas de UF y NF en buenas condiciones para continuar su vida útil alineándose con los objetivos propuestos al inicio del trabajo y aportando algo de conocimiento al sector del reciclaje y al sector del tratamiento de aguas.

Por otro lado, en base a los resultados de los ensayos se ha logrado determinar un protocolo de limpieza y caracterización de las membranas, cabe destacar que, a pesar de ser seleccionadas del mismo lugar, presentaban características sobre su funcionamiento algo distintas debido a la heterogeneidad del elemento de membranas. Se ha determinado un tiempo promedio para las membranas de nanofiltración de 4 horas de exposición al oxidante y de 8 horas para las membranas de ultrafiltración.

Cabe destacar que se ha podido seguir paso a paso el procedimiento de creación de una planta de limpieza de membranas y se ha presentado un prototipo de planta con capacidad para 3 elementos de membrana. A pesar de ello, este proyecto no tiene la capacidad de asegurar que las membranas recicladas puedan ofrecer el mismo tiempo de uso que unas membranas de estos tipos completamente nuevas.

En cuanto al estudio de viabilidad económica, se han estimado unos precios de venta basándose en los costes de producción y en cómo se desenvuelve el mercado con estos productos. A pesar de no poder asegurar una vida útil más larga que la de un fabricante especializado, si se asegura un producto más económico para el mercado. Siendo 100 € el precio por unidad de membrana de ultrafiltración y 195 € para las membranas de nanofiltración.

No obstante, se ha realizado un estudio con visión de 10 años para disponer de la rentabilidad de la planta en el que se determina que comienza a producir beneficios más allá de cubrir la inversión inicial a partir del quinto año. Convirtiendo esta planta en recomendable para la industria.

En resumen, este trabajo desarrolla un método para reciclar membranas de ósmosis inversa en membranas de ultrafiltración y nanofiltración usando un compuesto oxidante, apoyado en cálculos realizados con MATLAB. Se demostró la viabilidad del proceso y se estableció un protocolo de limpieza y caracterización de membranas. Además, se diseñó un prototipo de planta de limpieza y con respecto

a lo económico, se estima que la planta sería rentable a partir del quinto año, ofreciendo opciones más económicas para el mercado.



# CAPÍTULO 10

---

## BIBLIOGRAFÍA

## 9 Bibliografía

- A. Hernandez, F. T., J. I. Arribas, L. M., & F. Martínez. (1990). *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa: Vol. Volumen 4*. LERKO PRINT.
- Aquapro. (n.d.). *Historia de la ósmosis inversa*.
- ASCE. (2012). *Membrane Technology and Environmental Applications*. .
- Contyquim. (2023). *Tipos de membranas para ósmosis inversa: Tecnología clave en el tratamiento de aguas*.
- Corbatón Báguena, M. J. (2015). *Industrial Limpieza de membranas de ultrafiltración aplicadas en la industria alimentaria por medio de técnicas no convencionales y caracterización del ensuciamiento de las membranas*. [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València.
- Cuartas Uribe, B. E. (2005). *ESTUDIO DEL PROCESO DE NANOFILTRACIÓN PARA LA DESMINERALIZACIÓN DE LACTOSUERO DULCE*. [Tesis doctoral]. Universitat Poltècnica de València.
- Franco R., Á. (n.d.). *CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN. ESTUDIO COMPARATIVO MEDIANTE POROSIMETRÍA LLDP y ANÁLISIS DE IMÁGENES SEM* [Trabajo Fin de Máster]. Universidad de Valladolid.
- IndustriAmbiente. (2023, October 19). *Proyecto Remark: reutilización de membranas de ósmosis inversa* .
- Jacques Bolard. (2015). *Osmosis and life according to Dutrochet*. (English translation). French National Centre for Scientific.
- Jiménez Castillo, L. (2019). *Modelado y simulación de configuraciones típicas de módulos de membrana en cascada para permeación de gases*. [Proyecto Fin de Grado]. Universidad de Sevilla.
- Journal Of Membrane Science. (1997). *Membrane distillation*. (1st ed., Vol. 124).
- Journal of Membrane Science. (2016). *Membrane fouling in Osmotically driven Membrane Processes: A review*. (Vol. 499).
- Lawson, K. W., & Lloyd, D. R. (1997). *Membrane distillation*.
- Muñoz Guerrero, H. (2010). *Gestión medioambiental de salmueras de desalado de bacalao. Tratamiento mediante tecnología de membranas* [Tesis doctoral]. Universitat Politècnica de València.
- ProdetecS. (2023, November 21). *El uso de la membrana de ósmosis en la producción de cosméticos*. Prodetecs.
- Remtavares. (2015). *Membranas de ósmosis inversa: del residuo al recurso*. *Fundación Para El Conocimiento de Madrid*.  
<https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2015/02/13/132095>
- Rouco, F. (2016, May 13). *¿La solución está en el mar?* .

- Solorio, J. (2022, May 12). *Cómo seleccionar tubería adecuada para las plantas alcalinas de cloro*.
- Muñoz Guerrero, H. "Gestión medioambiental de salmueras de desalado de bacalao. Tratamiento mediante tecnología de membranas," Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, València, España, 2010.
- Hwang, K. J. and Lin, T. T. "Effect of morphology of polymeric membrane on the performance of cross-flow microfiltration," *Journal of Membrane Science*, vol. 199, pp. 41-52, 2002.
- Mulder, M. *Basic Principles of Membrane Technology*, 2nd ed. London, UK, 1996.
- Gallego Ocampo, H. L. "Factores que influyen en la colmatación de membranas de microfiltración tangencial y representación matemática," *Revista RECITEIA*, vol. 11, pp. 187-210, 2011.
- Ghosh, R. "Biopharmaceutical Separations by Ultrafiltration," in *Advanced Membrane Technology and Applications*, ed: John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 435-450.
- Ho, C. C. and Zydney, A. L. "A Combined Pore Blockage and Cake Filtration Model for Protein Fouling during Microfiltration," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 232, pp. 389-399, 2000.
- GmbH, K. M. (s. f.). *Equipos industriales de medición y control en el ámbito del caudal, presión, nivel y temperatura | Kobold Messring GmbH*. <https://www.kobold.com/es>
- DirectIndustry - The B2B marketplace for industrial equipment: sensors, automation, motors, pumps, handling materials, packaging, etc.* (s. f.). <https://www.directindustry.com/>
- CYPE. (s. f.). *Generador de precios CYPE*. Generador de Precios CYPE. Recuperado 15 de mayo de 2024, de <https://generadordeprecios.info/#gsc.tab=0>
- Limpieza (lavado) de membrana de ósmosis inversa 4x40"*. (s. f.). Oasis Expres OEV200603G22. <https://oasisexpres.com/products/limpieza-lavado-de-membrana-de-osmosis-inversa-4x40>
- BBC News Mundo. (2009, 25 noviembre). *Energía a base de ósmosis*. [https://www.bbc.com/mundo/ciencia\\_tecnologia/2009/11/091124\\_energia\\_osmotica\\_men](https://www.bbc.com/mundo/ciencia_tecnologia/2009/11/091124_energia_osmotica_men)
- Proyecto Regenera'M | Pascual y Bernabeu*. (s. f.). <https://www.pascualybernabeu.com/proyecto-regeneram/>
- colaboradores de Wikipedia. (2024, 28 febrero). *Ósmosis*. Wikipedia, la Enciclopedia Libre. <https://es.m.wikipedia.org/wiki/%C3%93smosis>
- Kontturi, K., Mafé, S., Manzanares, J. A., Svarfvar, B. L., & Viinikka, P. (1996). Modeling of the Salt and pH Effects on the Permeability of Grafted Porous Membranes. *Macromolecules*, 29(17), 5740–5746. <https://doi.org/10.1021/ma960501y>
- Vezzani, D., & Bandini, S. (2002). Donnan equilibrium and dielectric exclusion for characterization of nanofiltration membranes. *Desalination*, 149(1), 477–483. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00784-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00784-1)
- Aguamarket. (2002). *Precio referencial membrana de nanofiltración*.

DIPROCLEAN. (n.d.). *Empresa de aguas*.

Ibáñez Mengual, J. A., Berná Amorós, L. M., & Valerdi Pérez, R. P. (1997). Desalación por membranas . In *Desalación por membranas*. DM.

Turton, R., & Turton, R. (2012). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (4th edition.). Prentice Hall.

YUKANE. (2019). *Tubo ósmosis inversa 1/4*.

Pinnau, I., & Freeman, B. D. (1999). Formation and Modification of Polymeric Membranes: Overview. In *Membrane Formation and Modification* (Vol. 744, pp. 1–22). American Chemical Society. <https://doi.org/doi:10.1021/bk-2000-0744.ch001>

## Anexo I. Características de instrumentos

### Manómetro

El primer plano de instrumentos es el del manómetro:

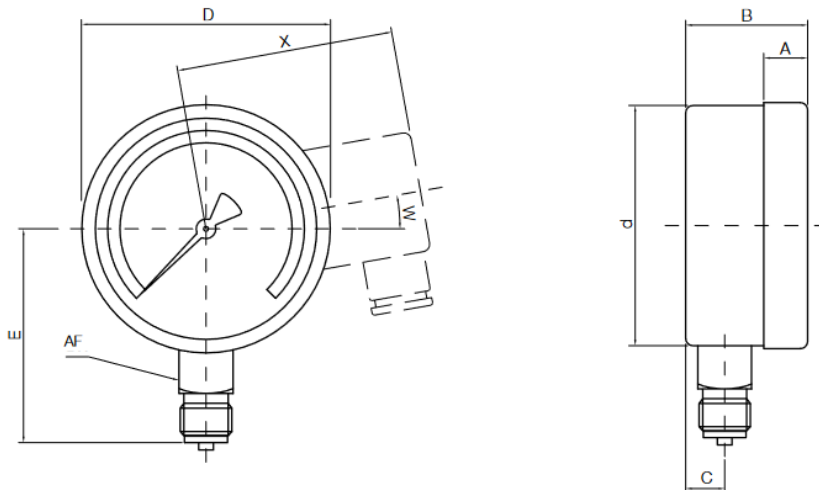


Figura 43 Plano manómetro

Siendo las medidas:

Code	NG	A	B without contact	B 1 or 2 contacts	B 3 contacts	B 4 contacts	C	d	D	E	AF	W	X
MAN-RD 21/71	63 mm	6	31	-	-	-	13	52	68	55	14	-	-
MAN-RE 22	80 mm	5	43.5	-	-	-	16	80	84	76	22	-	-
MAN-RF 22/72	100 mm VA	17	48	82	97	110	15	100	101	86.5	22	0	88
MAN-RF 32/62	100 mm Alu	-	43	91	107	107	15	100	-	86.5	27	0	88
MAN-RG 22/72	160 mm VA	21	50	101	120	120	15	159	162	117	22	0	118
MAN-RG 32/62	160 mm Alu	-	48	101	127	127	18.5	160	-	115	27	25°	118

Figura 44 Medidas manómetros

En este caso, los manómetros del sistema son los del código: MAN-RF 22/72 100 mm VA.

### Bomba

La siguiente tabla de características es sobre el modelo de bombas y sus respectivas características:

**Flow**  
10 l/min  
(2.64172 us gal/min)

**Head**  
Max.: 140 m  
(459'03" )

Min.: 28 m  
(91'10" )

**Power**  
Max.: 1.75 kW  
(2.38 hp)

Min.: 0.48 kW  
(0.65 hp)

*Figura 45 Modelo y características de las bombas*

## Refractómetro

En cuanto al refractómetro utilizado durante los ensayos de ultrafiltración se utiliza el modelo Refractómetro dig. ABBE 315 RS.

Que presenta las siguientes especificaciones:

### Especificaciones

- Lectura mediante display digital
- Compensación automática de temperatura
- Rango: Brix: 0-95%
- índice de refracción: 1,300-1,700 nD
- Precisión: Brix +/- 0,1%
- nD: +/- 0,0002nD
- Rango de temperatura: 0 a 50°C
- Salida RS232 para conexión a PC
- Alimentación eléctrica: 220VAC/50Hz



Figura 46 Refractómetro utilizado durante los ensayos de ultrafiltración

## Medidor de pH y conductividad

En cuanto al medidor de pH y conductividad utilizado durante los ensayos de caracterización de las membranas de nanofiltración, se trata del Medidor de pH PCE-PDH 1.

### Especificaciones

<b>Medición de pH</b>	
Rango de medición	0,00 ... 14,00 pH
Resolución	0,01 pH
Precisión	± 0,02 pH +2 dígitos
Calibración	3 puntos (pH4, pH7 y pH10)
Compensación de temperatura	Automática con sensor de temperatura Adicional (0 ... 60°C) o manual (0 ... 100 °C)

**Medición de conductividad**

Rango de medición	0 ... 200,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 0,2 ... 2,000 $\text{mS}/\text{cm}$ 2 ... 20,00 $\text{mS}/\text{cm}$ 20 ... 200,0 $\text{mS}/\text{cm}$
Resolución	0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 0,001 $\text{mS}/\text{cm}$ 0,01 $\text{mS}/\text{cm}$ 0,1 $\text{mS}/\text{cm}$
Precisión	$\pm 2\%$ del rango de medición + 1 dígito
Calibración	1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Compensación de temperatura	Automática 0 ... 60 $^{\circ}\text{C}$



Figura 47 Medidor de pH y conductividad utilizado durante nanofiltración



## Anexo II. Gráficas pertenecientes a los ensayos

Las siguientes figuras que se encuentran a continuación han sido seleccionadas porque aportan información sin ser repetitivas entre sí. Es por ello por lo que no aparecen algunos ensayos ya que no son diferenciales y se consideran repetitivos con los aquí presentados.

### Ensayos de nanofiltración

Ensayo de la membrana M2 en nanofiltración:

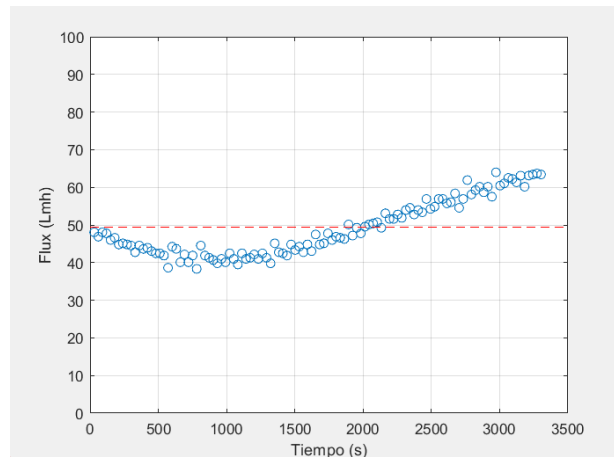


Figura 48 Ensayo de la membrana M2 en nanofiltración

Ensayo de la membrana M3B en nanofiltración:

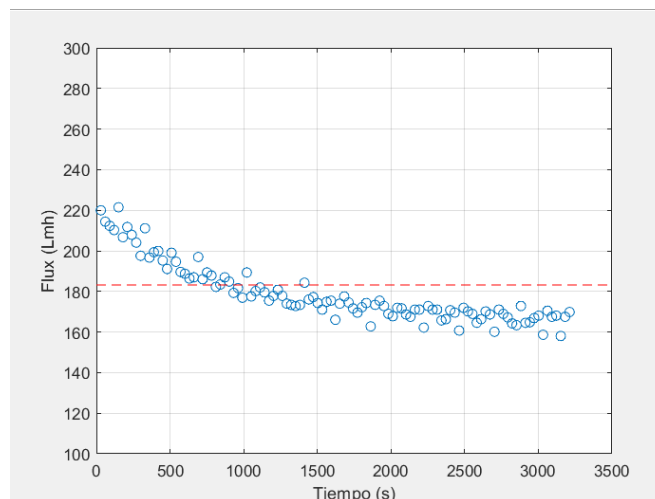


Figura 49 Ensayo de la membrana M3B en nanofiltración

Ensayo de la membrana M3D en nanofiltración:

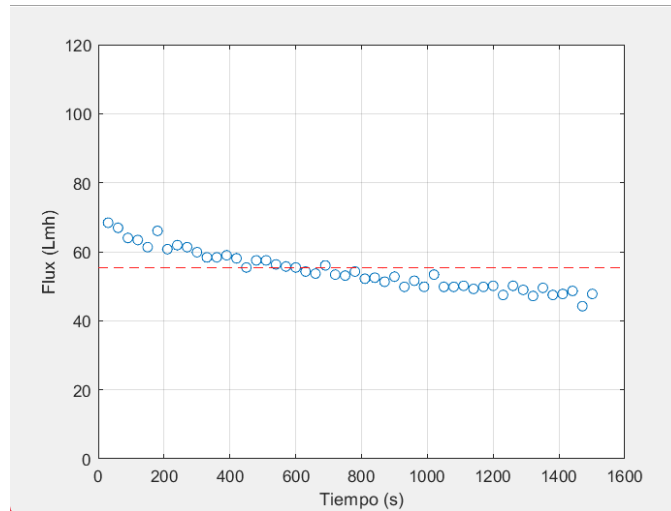


Figura 50 Ensayo de la membrana M3D en nanofiltración

Ensayo de la membrana M3G en nanofiltración:

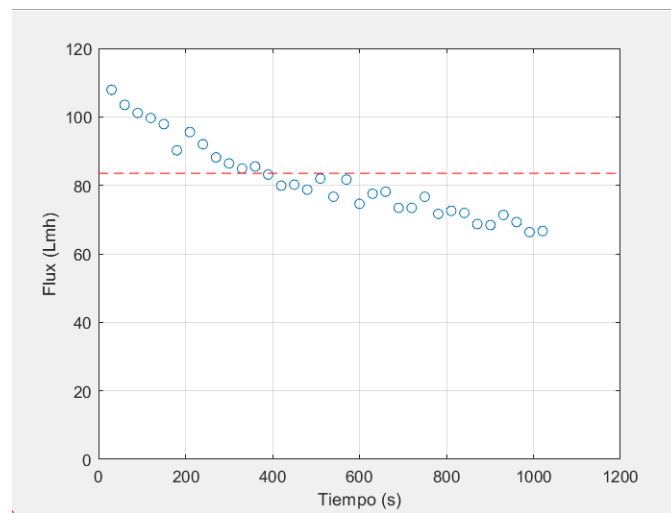


Figura 51 Ensayo de la membrana M3G en nanofiltración

Ensayo de la membrana M6 en nanofiltración:

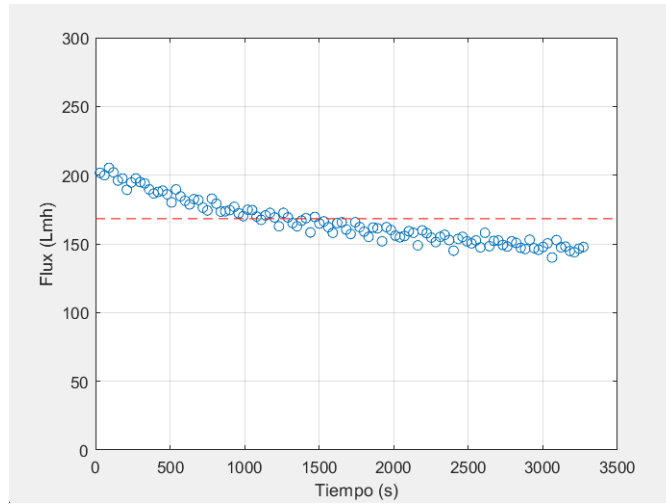


Figura 52 Ensayo de la membrana M6 en nanofiltración

Ensayo de la membrana M9 en nanofiltración:

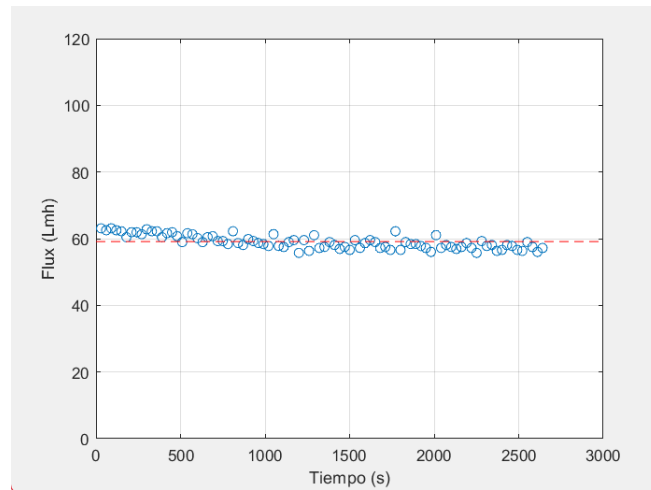


Figura 53 Ensayo de la membrana M9 en nanofiltración

Ensayo de la membrana M10 en nanofiltración:

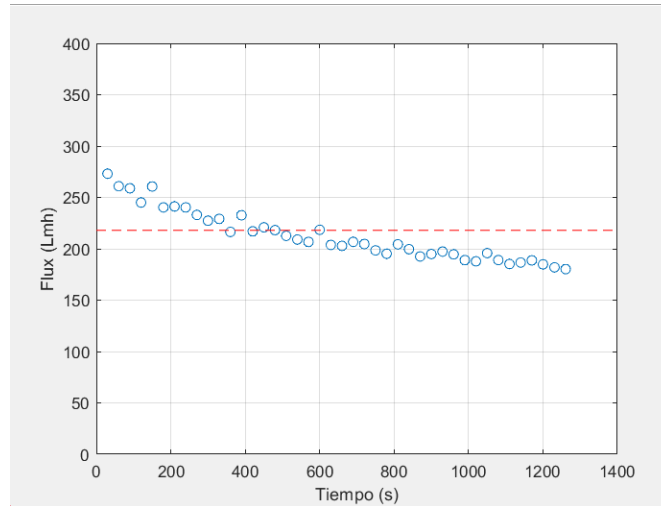


Figura 54 Ensayo de la membrana M10 en nanofiltración

Ensayo de la membrana M11 en nanofiltración:

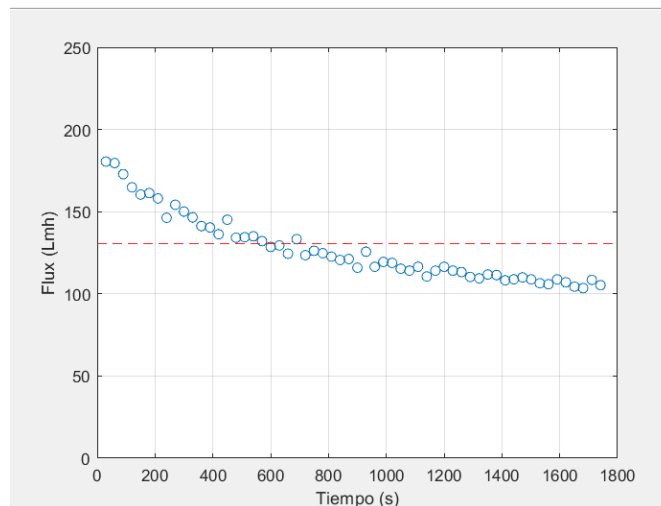


Figura 55 Ensayo de la membrana M11 en nanofiltración

Ensayo de la membrana M13 en nanofiltración:

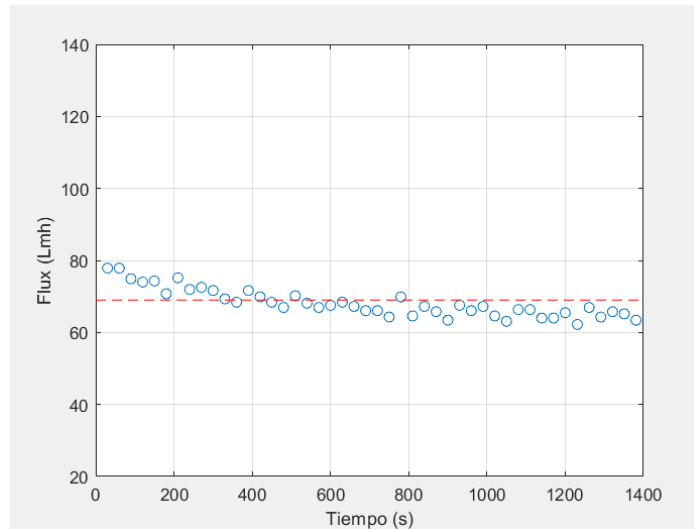


Figura 56 Ensayo de la membrana M13 en nanofiltración

## Ensayos de ultrafiltración

Ensayo de la membrana M6 en ultrafiltración:

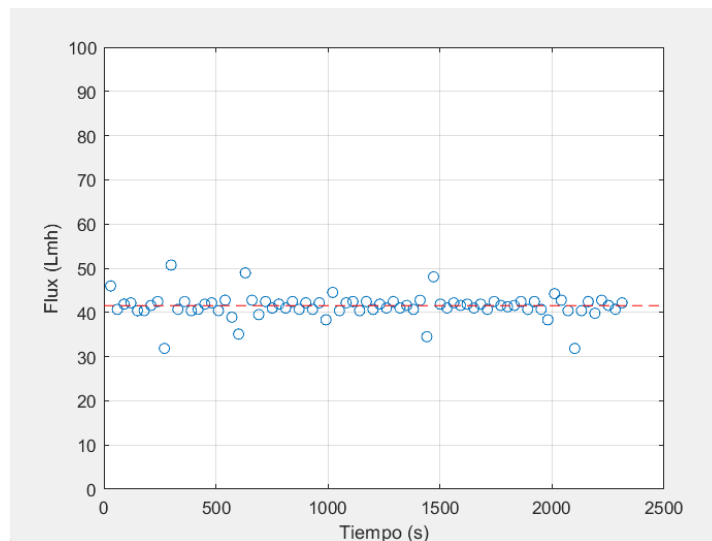


Figura 57 Ensayo de la membrana M6 en ultrafiltración

Ensayo de la membrana M7 en ultrafiltración:

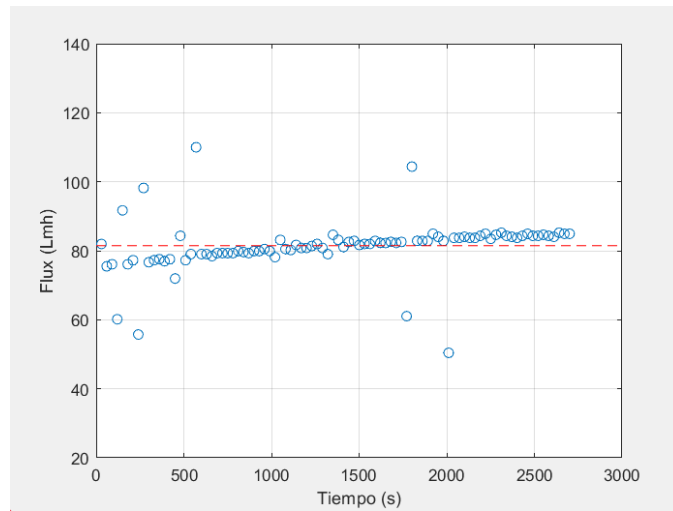


Figura 58 Ensayo de la membrana M7 en ultrafiltración