



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA

# Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}}=1920\text{m}^3/\text{d}$ )

AUTOR: CARLOS DOMINGO TORNER

TUTORAS: M. AMPARO BES PIÁ Y BEATRIZ ELENA CUARTAS URIBE

Curso Académico: 2019-20

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## **RESUMEN**

El presente TFM busca proponer una solución eficaz para mejorar la calidad del agua tras el tratamiento secundario de una EDARU de 40000 He. Se tratará una parte del efluente de esta EDARU con el fin de obtener un caudal producto de  $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , el cual se podrá reutilizar en diversos sectores industriales principalmente.

Para llevar a cabo del diseño de la instalación, se han realizado ensayos en el laboratorio basados en una selección de técnicas dentro del grupo del tratamiento terciario, que tienen como objetivo incrementar la calidad del agua.

Por un lado, se han probado dos tipos de carbón activo para llevar a cabo ensayos de adsorción con el fin de evaluar su impacto en la reducción de la DQO del agua residual. Asimismo, se han llevado a cabo ensayos de ultrafiltración (UF) empleando dos membranas orgánicas (PES, Polietersulfona) de diferentes cortes de peso molecular (cut-off) para evaluar la calidad del agua obtenida. Tanto los ensayos de adsorción como los de UF han sido realizados con el objetivo de evaluar su capacidad como pretratamiento del agua para el último bloque de ensayos del presente TFM, y el más relevante, un proceso de nanofiltración (NF) que busca mejorar la calidad del agua residual para cumplir con los criterios de reutilización.

Con los resultados experimentales obtenidos se ha realizado el diseño de la instalación, de forma que el permeado producido tendría la calidad suficiente para su reutilización en diferentes aplicaciones tales como el sector cerámico, torres de refrigeración y agua de caldera.

### **Palabras clave:**

**Efluente secundario, adsorción, ultrafiltración, nanofiltración, reutilización de agua**

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## **RESUM**

El present TFM busca proposar una solució eficaç per a millorar la qualitat de l'aigua després del tractament secundari d'una EDARU de 40000 He. Es tractarà una part de l'efluent d'esta EDARU a fi d'obtindre un cabal producte de  $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , el qual es podrà reutilitzar en diversos sectors industrials principalment.

Per a dur a terme del disseny de la instal·lació, s'han realitzat assajos en el laboratori basats en una selecció de tècniques dins del grup del tractament terciari, que tenen com a objectiu incrementar la qualitat de l'aigua.

D'una banda, s'han provat dos tipus de carbó actiu per a dur a terme una sèrie d'assajos d'adsorció amb la finalitat d'avaluar en seu l'impacte en la reducció de la DQO de l'aigua residual. Així mateix, s'han dut a terme una sèrie d'assajos d'ultrafiltració (UF) emprant membranes orgàniques (PES, Polietersulfona) de diferents cut-off per a avaluar la qualitat de l'aigua obtinguda. Tant els assajos d'adsorció com els de UF han sigut realitzats amb l'objectiu d'avaluar la seua capacitat com a pretractament de l'aigua per a l'últim bloc d'assajos del present TFM, i el més rellevant, un procés de nanofiltració (NF) que busca millorar la qualitat de l'aigua residual per a complir amb els criteris de reutilització.

Amb els resultats experimentals obtinguts s'ha realitzat el disseny de la instal·lació, de manera que el permeat produït tindria la qualitat suficient per a la seua reutilització en diferents aplicacions com ara el sector ceràmic, torres de refrigeració, aigua de caldera i reg.

**Paraules clau:**

**Efluent secundari, adsorció, ultrafiltració, nanofiltració, reutilització d'aigua**

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## **ABSTRACT**

The present TFM seeks to propose an effective solution to improve the quality of water after secondary treatment of an EDARU of 40000 He. A part of the effluent of this EDARU will be treated in order to obtain a product flow of  $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , which can be reused in various industrial sectors mainly.

To carry out the design of the facility, laboratory tests have been carried out based on a selection of techniques within the tertiary treatment group, which aim to increase water quality.

On the one hand, two types of activated carbon have been tested to carry out a series of adsorption tests to assess their impact on the reduction of COD in wastewater. In addition, a series of ultrafiltration (UF) tests have been carried out using two organic membranes (PES, Polietersulfone) of different cut-off to evaluate the quality of the water obtained. Both, adsorption and UF tests, have been carried out with the aim of evaluating their capacity as water pretreatment for the last block of tests of this TFM, and the most relevant, a nanofiltration process (NF) which seeks to improve the quality of wastewater to meet the reuse criteria.

With the experimental results obtained, the design of the installation has been carried out, so that the permeate produced would have enough quality for its reuse in different applications such as the ceramic sector, cooling towers, boiler water and irrigation, mainly.

**Keywords:**

**Secondary effluent, adsorption, ultrafiltration, nanofiltration, water reuse**

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## **DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM**

- Memoria
- Anexos de la memoria
- Planos
- Presupuesto

## **ÍNDICE DE ABREVIATURAS:**

**TFM:** Trabajo de Fin de Máster

**UF:** Ultrafiltración

**NF:** Nanofiltración

**UE:** Unión Europea

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**RD:** Real Decreto

**EDAR:** Estación Depuradora de Aguas Residuales

**EDARU:** Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas

**EDARI:** Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno

**PTM:** Presión Transmembranal

**PES:** Polietersulfona

**SST:** Sólidos en suspensión totales

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA

# MEMORIA

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETIVOS .....	1
2. JUSTIFICACIÓN .....	3
3. ANTECEDENTES.....	5
4. LEGISLACIÓN.....	9
4.1. Normativa europea sobre reutilización de aguas .....	9
4.2. Normativa nacional .....	10
4.3. Normativa de la Comunitat Valenciana .....	11
4.4. Comparativa de criterios de calidad a nivel estatal (España), europeo y las recomendaciones de la USEPA .....	12
4.5. Calidad de agua requerida en diferentes procesos industriales .....	13
5. LÍNEA DE AGUAS DE LA EDAR .....	17
5.1. Pretratamiento .....	17
5.2. Tratamiento primario .....	17
5.3. Tratamiento secundario .....	18
5.4. Tratamiento terciario .....	18
6. PROCESOS DE MEMBRANA .....	21
7. PROCESOS DE ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVO.....	31
8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL, MATERIALES Y MÉTODOS ANALÍTICOS.....	35
8.1. Adsorción con carbón activo. Ensayos Jar-test .....	35
8.2. Ensayos de ultrafiltración .....	36
8.3. Ensayos de nanofiltración .....	38
8.4. Materiales y métodos analíticos .....	41
9. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	49
9.1. Caracterización del efluente secundario.....	49
9.2. Ensayos de adsorción con carbón activo.....	50
9.3. Ensayos de ultrafiltración .....	56
9.4. Ensayo de nanofiltración.....	59
9.5. Conclusiones de la parte experimental.....	63
10. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE MEMBRANAS .....	65

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

10.1.	Diseño de la etapa de NF.....	65
10.2.	Diseño de los tanques de mezcla y depósitos.....	68
10.3.	Cálculo del volumen de reactivos para la etapa de limpieza .....	71
10.4.	Selección de elementos de la planta.....	73
10.5.	Cálculos complementarios: gestión del concentrado .....	79
11.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DISEÑADA .....	83
12.	ESTUDIO ECONÓMICO.....	85
12.1.	Energía.....	85
12.2.	Personal.....	87
12.3.	Productos químicos .....	87
12.4.	Mantenimiento.....	88
12.5.	Resumen de los gastos por partida .....	88
13.	CONCLUSIONES.....	91
14.	BIBLIOGRAFÍA .....	93
15.	ANEXO.....	99
15.1.	Fichas de seguridad .....	99
15.2.	Informe del diseño con la aplicación informática WAVE .....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de la línea de aguas de una EDAR modelo. Fuente: Elaboración propia .....	19
Figura 2.	Esquema de funcionamiento de un proceso de membrana .....	21
Figura 3.	Representación esquemática de los rechazos de los procesos de membrana gobernados por la presión.[38] .....	25
Figura 4.	Módulo de membranas plano. [41].....	27
Figura 5.	Módulo de membrana tubular. [42].....	27
Figura 6.	Módulo de membrana de fibra hueca. [42] .....	28
Figura 7.	Módulo de membrana de arrollamiento en espiral.[43].....	28
Figura 8.	Equipo de Jar-Test de la marca VELD Científica modelo JLT 6 .....	35

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de  
membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Figura 9. Módulo de membranas Millipore de 300 mL.....	36
Figura 10. Esquema del montaje del módulo de UF de Millipore.....	37
Figura 11. Balanza electrónica de la marca Kern .....	38
Figura 12. Esquema de la planta piloto de NF utilizada en los ensayos.....	39
Figura 13. Espectrofotómetro DR6000 de HACH .....	42
Figura 14. Reactivos A, B y C (azul) para el método micro BCA .....	44
Figura 15. Cubetas del kit de reactivos de DQO de la marca Merck.....	45
Figura 16. Termorreactor TR 300 de Merck.....	46
Figura 17. Fotómetro NOVA 30 de Merck.....	46
Figura 18. Medidor de pH GLP 21+ de Crison .....	47
Figura 19. Conductímetro GLP 31+ de Crison .....	47
Figura 20. Turbidímetro de Dinko .....	48
Figura 21. Rendimiento de eliminación de la DQO con la concentración de C001 para t=1 h y t= 2 h	51
Figura 22. Rendimiento de eliminación de proteínas con la concentración de C001 para t=1h y t=2h	52
Figura 23. Rendimiento de eliminación de carbohidratos con la concentración de C001 para t=1h y t=2h .....	52
Figura 24. Rendimiento de eliminación de la DQO con la concentración de C002 para t=1 h y t= 2 h	54
Figura 25. Rendimiento de eliminación de proteínas con la concentración de C002 para t=1h y t=2h	55
Figura 26. Rendimiento de eliminación de carbohidratos con la concentración de C002 para t=1h y t=2h .....	55
Figura 27. Evolución de la densidad de flujo de permeado para la membrana 5 kDa UF (3,7 bar y 200 rpm).....	57
Figura 28. Evolución de la densidad de flujo de permeado para la membrana 100 kDa UF (3,7 bar y 200 rpm).....	57
Figura 29. Permeabilidad hidráulica inicial de la membrana NF270 por duplicado. ....	60
Figura 30. Variación de $J_p$ con FRV para NF270 (8 bar y $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ). ....	61
Figura 31. Permeabilidad hidráulica final de la membrana NF270 .....	61
Figura 32. Esquema planta NF diseñada .....	65
Figura 33. Resumen del contenido iónico del agua de alimento en WAVE .....	67
Figura 34. Válvula BV5095 de la casa VOLT.....	73
Figura 35. Válvula BV5089 de VOLT .....	73

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de  
membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Figura 36. Válvula reductora de presión PR4305 de VOLT.....	74
Figura 37. Bomba centrífuga SE1.80.80.15.4.50D.B de Grundfos.....	74
Figura 38. Bomba dosificadora de la casa comercial Denios .....	75
Figura 39. Agitador vertical de la casa comercial Traxco .....	75
Figura 40. Sensor de pH de la casa comercial PCE .....	76
Figura 41. Sensor de nivel LS-10-7479388 de WIKA.....	76
Figura 42. Conductímetro PCE-SM11 de la casa comercial PCE.....	76
Figura 43. Manómetro WIKA para presiones de hasta 10 bar .....	77
Figura 44. Caudalímetro electrónico SI500 de IFM .....	77
Figura 45. Sensor de temperatura WTR 280 de la marca PCE .....	78
Figura 46. Filtro Dim-Spun014 de la casa comercial DimWater Engineering.....	78
Figura 47. Carcasa de filtros de cartucho del grupo Dimasa.....	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de calidad en España para reutilización de aguas depuradas en procesos industriales. [17] .....	11
Tabla 2. Parámetros de calidad del agua exigidos en España y por la USEPA para su reutilización. [18][19][20][21].....	12
Tabla 3. Parámetros requeridos del agua utilizada en diversos procesos industriales. ....	14
Tabla 4. Clasificación de procesos de membrana según la fuerza impulsora.....	23
Tabla 5. Características de los procesos de membrana gobernados por la presión.[38] .....	24
Tabla 6. Diferencias entre fisisorción y quimisorción [45] .....	32
Tabla 7. Concentraciones y masa de carbón activo empleada. Del C001 y C002. ....	36
Tabla 8. Diluciones para elaboración de recta de calibrado de antrona.....	43
Tabla 9. Caracterización del efluente secundario para ensayos de adsorción y UF .....	49
Tabla 10. Caracterización del efluente secundario para ensayos de NF.....	49
Tabla 11. Caracterización del agua tras ensayo adsorción al cabo de una hora (GAC C001) .....	50
Tabla 12. Caracterización del agua tras un ensayo adsorción al cabo de 2 horas (GAC C001).....	50
Tabla 13. Caracterización del agua tras ensayo Jar-Test al cabo de una hora (GAC C002).....	53

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Tabla 14. Caracterización del agua tras un ensayo Jar-Test al cabo de 2 horas (GAC C002) .....	53
Tabla 15. Caracterización del permeado para la membrana de 100 kDa .....	58
Tabla 16. Caracterización del permeado para la membrana orgánica de 5 kDa .....	59
Tabla 17. Caracterización del permeado de la membrana NF270 .....	62
Tabla 18. Tabla resumen de rendimientos de eliminación de las diferentes técnicas ensayadas.....	62
Tabla 19. Parámetros de la membrana NF270-400/34i .....	66
Tabla 20. Resultados de la simulación en WAVE. Membrana NF270-400/34i.....	68
Tabla 21. Volumen nominal de los tanques de almacenamiento y resumen de sus características ....	72
Tabla 22. Límites de vertido según la Directiva 91/271/CEE.....	79
Tabla 23. Consumo energético anual de la instalación diseñada .....	85
Tabla 24. Resumen de la tarifa "Plan 3.0" de Iberdrola para consumos superiores a 15 kW.....	86
Tabla 25. Coste de personal asociado a la operación de la instalación diseñada .....	87
Tabla 26. Coste de reactivos de la instalación diseñada .....	88
Tabla 27. Costes asociados al mantenimiento de la instalación diseñada.....	88
Tabla 28. Resumen estudio económico .....	89

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

## 1. OBJETIVOS

El **objetivo principal** del presente Trabajo de Fin de Máster es diseñar una instalación que permita la reutilización de efluentes secundarios de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas mediante el uso de procesos de membrana y fomentar la economía circular en el ámbito de la reutilización. El caudal producido será de  $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

Para ello, se han llevado a cabo los siguientes **objetivos específicos**:

- Realización de ensayos a nivel de laboratorio que incluyen procesos de adsorción con diferentes muestras de carbón activo, ensayos de ultrafiltración con membranas orgánicas de diferente tamaño de poro en modo concentración y ensayos de nanofiltración en modo concentración.
- Estudiar posibilidades de reutilización del agua tratada en diferentes procesos industriales a partir de los requisitos de las empresas y legislación existente.
- Estudiar la posibilidad del uso del rechazo para riego agrícola atendiendo a la legislación europea y estatal.
- Realizar el estudio económico anual teniendo en cuenta los costes energéticos, de personal, reactivos químicos y mantenimiento.
- Realizar el presupuesto de la instalación.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 2. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, el incesante crecimiento en la demanda de agua para su uso en todos los sectores económicos, así como el incipiente problema del cambio climático, han convertido este recurso en un bien indispensable. Con ello, su disponibilidad se ha ido reduciendo con el paso del tiempo, haciéndose cada vez más notable un descenso en las reservas de agua a nivel global. A nivel de la UE (Unión Europea) casi un tercio del territorio presenta problemas de escasez de agua debido a sequías cada vez más frecuentes. Por ello, el desarrollo de tecnologías capaces de reutilizar este recurso se ha vuelto imprescindible, pues su reutilización en sectores como el agroalimentario o el industrial supone una reducción del estrés hídrico al disminuir el consumo directo del agua del medio natural. El conjunto de técnicas de reutilización de agua en este TFM se alinea con las políticas adoptadas por la UE para promocionar la Economía Circular, que tiene como objetivo mantener dentro del sistema productivo todos los recursos empleados en él, minimizando la cantidad de residuos generados, así como el consumo de materia prima natural consumida. Asimismo, estas técnicas actúan acorde a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo en particular al ODS número 6 sobre 'Agua potable y saneamiento', orientado a garantizar la disponibilidad del agua y su gestión sostenible.

En búsqueda de una solución, la UE tiene también en marcha una serie de propuestas legislativas que tienen como objetivo elaborar una normativa válida y actual para regular la reutilización del agua según el tipo de actividad. Algunas de ellas son, hoy en día, una práctica bastante extendida, como son ciertas actividades industriales cuyos requisitos en los parámetros del agua a utilizar son menos restrictivos como por ejemplo las dedicadas a la producción de energía, minería...; otras, en cambio, como la irrigación de campos agrícolas para el consumo humano o animal, o para la recarga de acuíferos subterráneos poseen parámetros de calidad mucho más restrictivos, pues son actividades con un impacto más directo en la salud humana. Además, en el ámbito nacional existe el Real Decreto RD 1620/2007 acerca de la reutilización del agua, lo que muestra el interés de España en este ámbito, esperable al tratarse de un país donde diversas zonas sufren de frecuentes sequías, sobre todo en la época estival.

En vista de esta creciente necesidad y reutilización de agua, el presente TFM busca aportar una vía para la reutilización de agua residual en diferentes sectores como el industrial que de forma tan acuciante se necesita y evitar o reducir el consumo de recursos hídricos procedentes de ríos o pozos. Para ello se han seleccionado como posibles tratamientos los procesos de membranas, concretamente, ultrafiltración y nanofiltración. Asimismo, se estudia la opción de emplear un proceso de adsorción con carbón activo. El fin de estos tratamientos es disminuir la carga orgánica, sólidos en suspensión y sales, entre otras, de tal manera que el agua pueda alcanzar los parámetros requeridos para su uso posterior.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

### 3. ANTECEDENTES

Toda agua residual ya sea de origen urbano o industrial, debe ser sometida a un proceso de depuración previo antes de su retorno al medio natural. Tras el proceso de depuración, el agua residual deberá haber adquirido una serie de requisitos de carácter físico-químico que actuarán como indicador de calidad del agua. Para poner solución a esto, existen las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), las cuales según el origen del agua a tratar se diferencian en EDARU, cuando tratan aguas residuales urbanas o EDARI cuando tratan aguas residuales industriales.

Toda EDAR consta de cuatro tratamientos principales, cada uno con un objetivo diferente: un pretratamiento, que tiene como meta eliminar los sólidos de mayor tamaño, aceites y grasas de forma que se protejan los equipos de los tratamientos posteriores; el tratamiento primario, que busca eliminar una parte de los sólidos en suspensión y materia orgánica, mediante técnicas de coagulación, floculación y decantación; el tratamiento secundario o biológico, tiene como objetivo prioritario reducir la carga orgánica presente en el agua (medida a través de los parámetros de DQO y  $\text{DBO}_5$ ); y el tratamiento terciario, el cual no es siempre obligatorio en las EDAR salvo que haya una posterior reutilización del agua. Este tratamiento busca la eliminación de los contaminantes que no han podido eliminarse en los tratamientos anteriores, principalmente, patógenos y turbidez, aunque también consigue eliminar materia orgánica y sólidos en suspensión residuales, dependiendo del proceso.

El tratamiento terciario abarca diferentes tipos de técnicas y equipos como pueden ser los filtros de arena o tratamientos con cloro o radiación ultravioleta, siendo estos los que se emplean actualmente. Sin embargo, el presente TFM busca centrarse en aquellas técnicas que involucran procesos de membrana, puesto que suponen una alternativa muy viable por su ratio de coste y eficacia del tratamiento. En este grupo se encuentran, entre otros, los procesos de microfiltración (MF), ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF) que son, sin duda, los más extendidos en el sector del tratamiento de aguas, aunque el presente trabajo se centrará en los dos últimos. Además, se evaluará una técnica algo menos frecuente que las anteriores pero muy conocida como es el uso de carbón activo para la adsorción de moléculas orgánicas, y su impacto en la calidad del agua.

Todos estos procesos tienen un hueco muy importante en la industria desde hace mucho tiempo, por ello, existen una gran cantidad de estudios que respaldan este tipo de técnicas en el sector.

Un ejemplo es el de Tchobanoglous et al. [1] donde ya desde el año 1998 se plantea un sistema de UF con membranas de fibra hueca de polisulfona para el tratamiento de aguas residuales urbanas, donde ya entonces se alcanzaron reducciones en la  $\text{DBO}_5$  desde 8 a 1,1 ppm y, de DQO, de 29,3 a 6,2 ppm, además de una recuperación de agua reutilizable del 85%.

Desde entonces, la tecnología de membranas ha ido incrementado su popularidad, dando lugar a una gran variedad de estudios e investigaciones que tienen como fin dejar constancia de su efectividad en el campo del tratamiento y reutilización de las aguas residuales. Algunos de esos ejemplos se recogen a continuación.

El planteado por Bousbih et al. (2019)[2] muestra los resultados obtenidos por una membrana fabricada a partir de arcilla tunecina. Los rendimientos de eliminación fueron de un 80% para la DQO y un 99% de la turbidez de un agua industrial proveniente de la industria textil.

De igual forma en el ámbito del tratamiento de aguas provenientes de la industria textil, se encuentra el trabajo de Yang et al. (2020) [3]. En este trabajo se recogen rendimientos de eliminación del 98% de un colorante presente en el agua residual; o el de Berradi et al. (2019) [4], donde se estudió la efectividad de diversas membranas poliméricas fabricadas principalmente de una mezcla de N,N-Dimetilformamida (DMF) en combinación con polisulfona (PSU), cloruro de polivinilo (PVC) y poliestireno expandido. Los resultados muestran reducciones del contenido en colorante entre un 80% y 89% según la composición de la membrana, siendo las más eficaces las de mayor contenido en polisulfona.

Para la reutilización de un agua proveniente de una industria de fabricación de hilos de algodón (textil) se encuentra el trabajo de Gozávez-Zafrilla et al. (2008) [5], donde se emplea un proceso de NF para la reutilización del agua en la industria textil, con rendimientos de eliminación de la DQO del 99% y un alto índice de rechazo de sales (75-95%), de forma complementaria y como se plantea en este TFM, se evaluó el impacto de un proceso de UF como pretratamiento, consiguiendo aumentar la cantidad permeado de la NF (en un 50% aproximadamente) y una disminución de la DQO del alimento de la NF de un 40%.

Un trabajo que posee un objetivo común con el presente TFM, es el de Lubello et al. (2003) [6], donde se evalúa la capacidad de un sistema de membranas de ultrafiltración de fibra hueca para la reutilización del agua de un efluente secundario en la EDAR italiana de Empoli (con 60000 he y un caudal tratado de  $13500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ) en la industria, cumpliendo los parámetros establecidos por la legislación italiana que se aprobó en ese mismo año, el DM 185/2003 y que establece como valores límite 160 ppm de DQO, con pH entre 5,5-9 y 80 ppm de SST (Sólidos en Suspensión Totales), los mismos que para vertido a agua superficial, aunque pueden restringirse en función del proceso industrial concreto. Los resultados, obtenidos a lo largo de cuatro meses, fueron muy satisfactorios, obteniendo un agua de alta calidad, donde se había alcanzado una reducción del 94,5% de la turbidez, un 98,7% de los sólidos en suspensión y, en menor medida, una reducción del 35% en la DQO. Asimismo, tras un estudio económico, consiguieron que el coste fuera de  $0,38 \text{ €/m}^3$  de agua tratada para su reutilización, frente a la convencional  $1,23 \text{ €/m}^3$  de la EDAR municipal.

Para el tratamiento de aguas provenientes de plantas de gestión de animales muertos, donde las aguas generadas presentan altas cantidades de grasas, proteínas, azúcares y sólidos; el trabajo de Racar et al. (2017)[7] estudia el efecto de membranas tanto de UF como de NF con fines de reutilización del agua en la misma planta para limpieza y para la generación energética por vapor. Por un lado, las membranas de ultrafiltración de poliamida consiguieron grandes resultados de eliminación de DQO (>84%) y turbidez (>93%), aunque resultaron ineficientes en la eliminación de nitrógeno. Además, tras tres días de ensayo se redujo la densidad de flujo de permeado en un 28%. Por otro lado, las membranas de NF de la marca Dow-FilmTec (modelo NF90), también de poliamida, consiguieron una gran reducción de las sales presentes, con una disminución de la conductividad del 97%, nitrógeno total de Kjeldahl de más del 67% y de más del 70% en DQO soluble.

Asimismo, relacionado con el tratamiento de aguas de la industria láctica Andrade et al. (2014) [8] emplea un sistema de membranas de NF tras el tratamiento secundario en un MBR con el fin de conseguir un agua apta para la reutilización en el sector industrial (sistemas de enfriamiento, generación de vapor, limpieza de zonas industriales...), y que busca eliminar la mayoría de sólidos disueltos que quedan tras el tratamiento secundario, obteniendo excelentes resultados. Existen estudios también como el de Malekian et al. (2015) [9] donde se trabaja con un sistema de nanofiltración para la reutilización de agua en una industria papelera. En este trabajo, se consiguen reducciones en torno al 90% en la DQO al trabajar con presiones de 8 bar. Además, un ejemplo de aplicación a la reutilización de la industria textil vaquera se encuentra trabajo de Amar et al. (2009) [10] donde se emplea un proceso combinado de UF seguido de una NF con una membrana de módulo arrollado en espiral.

En lo relativo al uso del carbón activo en la reutilización del agua, se encuentra el trabajo de Viegas et al. (2020) [11] acerca del uso combinado de carbón activo en polvo junto con un proceso de microfiltración con membranas cerámicas de  $0,1 \mu\text{m}$  para la eliminación de fármacos del agua gracias al uso del carbón activo además de conseguir eliminaciones extra del 47-56% de tres de los fármacos de control del experimento.

También se encuentra el trabajo de Zhu et al. (2019) [12] sobre el uso combinado de electrocoagulación y carbón activo para eliminar sulfatos de un agua de la industria minera, donde se alcanzaban reducciones extra del 51,3%.

Para el tratamiento de las aguas residuales en la industria láctea se encuentra el trabajo de Mohan and Sheena (2019) [13] sobre el uso de un lecho combinado de carbón activo sintetizado a partir de corteza de coco, con laterita (adsorbentes naturales) en una proporción 2:1 (carbón-laterita) durante 6 minutos de contacto; donde se conseguían eliminaciones de  $\text{DBO}_5$  del 70,16% y de DQO del 52,1%.

En otras industrias también se utiliza el carbón activo granular, como en la textil, tal y como describen Guilloso et al. (2019) [14] donde se conseguían eliminar en gran medida la concentración de microcontaminantes orgánicos, manteniendo al 70% de los mismos con concentraciones por debajo de los  $200 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Todos estos estudios junto con la normativa vigente han servido como base para definir las condiciones de los ensayos experimentales para este TFM, donde se evalúan los procesos de adsorción con carbón activo y la ultrafiltración, como pretratamientos previos a un proceso de nanofiltración, como métodos de depuración de un efluente secundario de EDAR con fines de reutilización.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 4. LEGISLACIÓN

Actualmente, tanto a nivel europeo como nacional en España, existe un conjunto de normativas, propuestas y planes que tienen como objetivo regular tanto el tratamiento de las aguas residuales, como su reutilización con el fin de tener un impacto mínimo en el medio ambiente.

A modo de contextualizar la situación legislativa, hay que mencionar la iniciativa denominada Agenda 2030, promovida por Naciones Unidas y que consta del apoyo total de la UE. Esta iniciativa fue aprobada en el año 2015 con el objetivo de promover un crecimiento socioeconómico orientado a un desarrollo sostenible con el medio ambiente. Dentro de dicha iniciativa se plantearon los llamados ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), que recogen en 17 objetivos las principales líneas de acción de dicha agenda. El presente TFM se ajusta al ODS número 6 sobre “Agua limpia y saneamiento”, más concretamente al punto 6.3 que establece: “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial” [15]. Esto implica impulsar líneas de I+D+i que fomenten la reutilización de las aguas residuales tratadas. De forma paralela, la UE tiene vigente un plan de acción desde 2015 sobre la economía circular, que busca que el valor de productos, materiales y recursos se mantenga en la economía el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo la generación de residuos [16].

### 4.1. Normativa europea sobre reutilización de aguas

- **Reglamento 2020/741**

Este reglamento, aprobado por el Parlamento Europeo el 25 de mayo de 2020, hace referencia a los requisitos mínimos para la reutilización del agua en la agricultura, actualizando la anterior directiva 91/271/CEE, que con casi 30 años requería de una actualización. La UE a través de este reglamento ha definido las medidas destinadas a facilitar la reutilización del agua depurada para su uso en la agricultura. Esta nueva normativa tan esperada por los países miembros desde hace unos años facilitará la adaptación al cambio climático, la escasez del agua y su disponibilidad para una utilización más eficiente y así adaptarse a una economía circular con el fin de minimizar la pérdida de cosechas y por consiguiente escasez de alimentos.

- **Directiva 2000/60/CE**

La Directiva 2000/60/CE, conocida como Directiva Marco del Agua, establece un marco europeo de actuación en el terreno de la política de aguas. Con esta directiva, la UE organiza la gestión de las aguas continentales, costeras, subterráneas, superficiales y de transición, para prevenir y reducir su contaminación y promover un uso sostenible de las mismas, paliando los efectos de inundaciones y sequías. Asimismo, hace una breve referencia a la reutilización de aguas (Anexo VI, parte B) donde se

indican algunas medidas complementarias para llevar a cabo esta reutilización adecuadamente como por ejemplo el fomento de tecnologías de eficiencia hidráulica en industria y técnicas economizadoras de agua en el riego.

#### 4.2. Normativa nacional

- **Ley de Aguas**

Aprobada mediante el RD 1/2001, establece que el Gobierno debe desarrollar las condiciones básicas de la reutilización y precisar la calidad de las aguas regeneradas (Art. 109 RD 1/2001).

- **Real Decreto 1620/2007**

Establece el régimen jurídico para la reutilización de aguas depuradas. En él, se recogen los sectores para los que las diferentes aguas depuradas podrán destinarse en función de la calidad de las mismas. Algunos de los sectores destinados a la reutilización del agua, son: la irrigación de jardines privados, parques y áreas de deportes urbanas, limpieza de calles y vehículos, irrigación de campos y pastos, recarga de acuíferos, procesos de limpieza en instalaciones industriales, torres de enfriamiento y equipos de condensación...

Sin embargo, también establece una serie de usos prohibidos: como el consumo humano, la industria alimentaria (excepto las destinadas a limpieza y agua de proceso), los hospitales o el uso en instalaciones recreativas, entre otros.

Además, en este RD se detallan los límites de los parámetros de calidad del agua que se exigen en España, los valores de los parámetros establecidos en este Real Decreto se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterios de calidad en España para reutilización de aguas depuradas en procesos industriales. [17]

Parámetro (uds)	Valor
Sólidos en suspensión totales ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	5-35
Turbidez (NTU)	1-15
DBO <sub>5</sub> ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Sin especificar
DQO ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Sin especificar
pH	Sin especificar
Conductividad ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	3000 (para uso agrícola)
Nitrógeno total ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	10 (sólo si es para recarga de acuíferos o zonas recreacionales)
Fósforo total ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	2 (sólo si es para recarga de acuíferos o zonas recreacionales)

- **Plan Hidrológico Nacional**

Establecido en la Ley 11/2005, donde se establecen las medidas para la coordinación de los diferentes planes hidrológicos de cuenca, condiciones de transferencia de recursos hidráulicos entre territorios, y con el que se busca fomentar la reutilización y depuración de aguas residuales, de canalización y de escorrentía. Asimismo, cada plan hidrológico de cuenca (Norte, Tajo, Guadiana, Guadalquivir, Júcar y Canarias) contempla diferentes medidas de regulación para la reutilización de aguas y una serie de parámetros mínimos de calidad. Algunas de estas regulaciones son, por ejemplo: en el Plan Hidrológico del Tajo, se prohíbe la reutilización del agua depurada en circuitos de refrigeración en la industria alimentaria o similares; en el del Norte se permite la reutilización en centrales termoeléctricas... Además, con el avance de los años, nuevas iniciativas están pendientes de estudio como el Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (Plan DSEAR) planteado en el 2018 y que tiene como objetivo garantizar una gestión del agua sostenible, así como aportar transparencia a los procesos de gestión.

#### 4.3. Normativa de la Comunitat Valenciana

A nivel autonómico se encuentra la Ley 2/1992 sobre el suministro, evacuación, depuración, tratamiento y reutilización de aguas residuales. Concretamente, esta Ley destaca la importancia de la reutilización de las aguas residuales en la mejora de la eficiencia y sostenibilidad hidráulica, fomentando su uso, evitando su desaprovechamiento y asegurando la financiación de infraestructuras (instalación y explotación) relacionadas con este ámbito, así como la posibilidad de su reutilización en

actuaciones de restauración ambiental y para usos consuntivos en base a la normativa que corresponda.

#### 4.4. Comparativa de criterios de calidad a nivel estatal (España), europeo y las recomendaciones de la USEPA

La USEPA (United States Environmental Protection Agency) establece en el documento “Guidelines for water reuse”, publicado en 1992 y revisado en 2004, una serie de directrices a seguir en el ámbito de la reutilización de aguas en sectores como el agrícola, urbano, ambiental, recreativo y, en el que se centrará este punto, el industrial. Para ello se ha elaborado la siguiente comparativa (Tabla 2) donde se recogen algunos de los indicadores microbiológicos y físico-químicos más destacables recogidos tanto en el RD 1620/2007 como en el Reglamento 2020/741 y las directrices de la USEPA en el sector industrial.

**Tabla 2. Parámetros de calidad del agua exigidos en España y por la USEPA para su reutilización.**

[18][19][20][21]

Parámetro (uds)	RD 1620/2007	USEPA	Reglamento 2020/741 (riego agrícola)
DBO <sub>5</sub> (mg·L <sup>-1</sup> )	Sin recomendaciones	≤30	≤10 (Clase A) ≤25 (Clase B, C, D)
pH	Sin recomendaciones	6-9	Sin recomendaciones
SST (mg·L <sup>-1</sup> )	<35 (grupo 3.1) <5 (grupo 3.2)	≤30	≤10 (Clase A) ≤35 (Clase B, C, D)
Turbidez (NTU)	<15 (grupo 3.1.a, 3.1.b) Sin límite (grupo 3.1.c) <1 (grupo 3.2)	≤2	≤5 (Clase A) Sin recomendaciones (Clase B, C, D)
Nemátodos intestinales (huevos/10L)	Sin límite (grupo 3.1.a, 3.1.b) <1 (grupo 3.1.c y 3.2)	Sin recomendaciones	Sin recomendaciones
Escherichia coli (UFC/100 mL)	<10000 (grupo 3.1.a y 3.1.b) <1000 (grupo 3.1.c) Ausencia (grupo 3.2)	≤200	≤10 (Clase A) ≤100 (Clase B) ≤1000 (Clase C) ≤10000 (Clase D)

Los diferentes grupos de proceso de usos industriales establecidos en el RD 1620/2007 y a los cuales se hace referencia en la Tabla 2 se recogen a continuación:

- 3.1.a) Aguas de proceso y limpieza menos en la industria alimentaria
- 3.1.b) Otros usos industriales
- 3.1.c) Aguas de proceso y limpieza incluido en la industria alimentaria
- 3.2) Torres refrigeración y condensadores evaporativos

Respecto a los grupos de calidad establecidos en el reglamento europeo 2020/741 de la Tabla 2, se diferencian en:

- Clase A: para cultivos de alimentos que se consumen crudos, donde la parte comestible está en contacto con el agua regenerada, así como tubérculos que se consumen crudos
- Clase B: igual que la Clase A, pero la parte comestible del alimento no está en contacto con el agua regenerada, además de para cultivos de alimentos transformados y cultivos no alimenticios, incluidos aquellos cultivos para alimentar a animales productores de leche o carne.
- Clase C: es la misma que la Clase B, la diferencia radica en el método de riego permitido, ya que en Clase B se permiten todos, pero Clase C sólo permite riego por goteo
- Clase D: para cultivos destinados a la industria y a producción de energía y semillas

En vista de lo recogido en la Tabla 2 se observa que la normativa estadounidense es más restrictiva en lo referente a los parámetros químicos, al establecer unos valores límites de  $\text{DBO}_5$  y pH, los cuales no son contemplados en la normativa española. Sin embargo, la normativa europea introducida este mismo año, contempla una categoría de calidad de agua bastante más restrictiva en todos los parámetros.

#### 4.5. Calidad de agua requerida en diferentes procesos industriales

Adicionalmente, dado que el presente TFM busca aprovechar el agua residual tratada en procesos industriales, se ha elaborado una tabla guía (Tabla 3) donde se recogen algunos de los parámetros mínimos del agua requerida en distintas operaciones industriales. Sin embargo, numerosos estudios que buscan reutilizar el agua en este tipo de procesos se amparan en la normativa nacional de su país de origen, por lo que los valores aquí recogidos son orientativos y más o menos variables en función del producto a fabricar o del proceso en el que participan.

**Tabla 3. Parámetros requeridos del agua utilizada en diversos procesos industriales.**

Parámetro	Sector industrial					
	Calderas [7]	Textil [5], [22]	Torres/sistemas de refrigeración [23][24][25]	Industria cerámica [26] [27]	Industria láctica [28]	Industria de curtido [29]
DQO ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		< 20; 30	<30; <75	< 50	24,7	10
Conductividad ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	Baja	< 500; <1800	< 2250	<2000	<242	<176
SST ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		-; 10	100	< 500	128	
pH	8,3-10		8-8,8; 6-9		7,3	
Cloruros ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )			<1000; 500		58	89
Sulfatos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )			500			35
Dureza ( $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ )		270	400		88	11

Los procesos industriales y sus requerimientos a los que se hace referencia en la Tabla 3 se recogen a continuación:

- **Calderas:** el agua interviene en el proceso de generación de vapor. Se buscan conductividades bajas con el fin de evitar deposiciones de sales o incrustaciones que pudieran dañar al equipo.
- **Textil:** el agua participa en procesos de teñido, blanqueo y acabado, donde interesa valores bajos de DQO y conductividad para evitar daños irreversibles o una contaminación en el producto final que pudiera derivar en su deterioro. Además, los parámetros mínimos pueden variar en función del tipo de fibra que se utilice (algodón, seda, poliéster) y, por tanto, de su resistencia. También influye mucho el proceso en cuestión, por ejemplo, para el blanqueo y lavado interesa una dureza baja del agua, ya que un alto contenido en sales puede interferir en el proceso y con los agentes surfactantes que se emplean. También la presencia de materia orgánica, nitritos y sulfuros en el agua pueden alterar el color creando tonos y matices indeseados.
- **Torres de refrigeración:** es importante controlar diversos parámetros: el pH debe estar cercano a la neutralidad, porque si es básico puede generar incrustaciones, si es ácido, bajo condiciones determinadas suele ser corrosivo, dañándose en ambos casos los equipos; la conductividad es muy importante también, ya que, a mayor valor, mayor potencial de corrosión e incrustación; la DQO también interesa mantenerla baja para evitar el afloramiento de microorganismos.
- **Industria cerámica:** busca minimizar los valores de DQO y SST para evitar interferencias en la formación de pastas y en procesos de lavado.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

- **Industria láctica:** presenta grandes gastos de agua, ya que interviene en casi todos los procesos: limpieza, sanitización, calentamiento y enfriamiento y limpieza. Es importante mantener bajo control los valores de DQO y SST para evitar el crecimiento de microorganismos.
- **Industria de curtidos:** el agua se utiliza en abundancia, prácticamente en todas las etapas del proceso: desde las etapas iniciales de limpieza y preparado de las pieles (descarnado y pelambre) hasta las finales (curtido y tintado).

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 5. LÍNEA DE AGUAS DE LA EDAR

Aunque cada EDAR presenta variaciones en su proceso de tratamiento, no sólo en tamaño sino también en las técnicas, la mayoría de ellas presenta un esquema general del proceso muy similar, donde en función del agua entrante a la planta se realizan algunas variaciones en el sistema.

A continuación, se explicará, por orden de aplicación, los diferentes sistemas de saneamiento que posee una EDAR a nivel general, los cuales se dividen en pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario como se comentaba en apartados anteriores.

### 5.1. Pretratamiento

Este grupo de procesos tiene como objetivo acondicionar el agua para facilitar los posteriores tratamientos, buscando minimizar el daño a equipos ya sea por erosión o colapso. Nada más entrar a la planta, se encuentran las rejillas de gruesos y finos, que buscan eliminar los residuos sólidos más grandes que han sido arrastrados hasta la EDAR, evitando así que saturen los equipos o dañen los sistemas biológicos posteriores. Seguidamente se encuentra una etapa de tamizado donde se eliminan aquellos residuos sólidos suspendidos en el agua que hayan podido atravesar las rejillas debido a tener un tamaño inferior. A continuación, se encuentra un tanque de homogeneización donde se consigue disminuir la velocidad de la corriente para poder variarla a placer mediante bombas para las siguientes etapas, consiguiendo un caudal y velocidad constantes. Finalmente, en esta parte se encuentra el desarenador y desengrasador, donde como su nombre indica se eliminan la arena (muy erosiva) y las grasas suspendidas (que podrían interferir con el tratamiento biológico posterior).

### 5.2. Tratamiento primario

En segundo lugar, se encuentra el tratamiento primario, donde se realizan procesos físico-químicos de sedimentación, flotación y coagulación-floculación. Esta última etapa sirve para generar un flóculo que, al aumentar de peso, pueda sedimentar en un decantador (decantador primario) eliminando gran parte de los sólidos orgánicos en suspensión coloidal. Generalmente, para este proceso se adiciona cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  en función del anión deseado (cloruros o sulfatos, aquello que sea más fácil de gestionar posteriormente en la planta)

### 5.3. Tratamiento secundario

A continuación, se encuentra el tratamiento secundario o biológico, donde se hace uso de un reactor biológico con una fauna bacteriana encargada de eliminar gran parte de la materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo).

En esta etapa hay una serie de factores a tener muy en cuenta de cara a regular y proteger la fauna bacteriana del reactor: el caudal de entrada, asegurándose de tener un tiempo de residencia óptimo, ya que, por ejemplo, un caudal demasiado elevado puede suponer un exceso de alimento para las bacterias, descontrolándose su población; la concentración y tipo de los contaminantes, es decir, hay que asegurarse que ningún elemento tóxico supere ciertos umbrales de concentración ya que eso dañaría la población bacteriana; y también la climatología, sobre todo, la temperatura, ya que las bacterias presentes en el reactor biológico poseen rangos óptimos de crecimiento, fuera de ellos puede suponer su descenso brusco o un aumento descontrolado de bacterias indeseadas.

Hay diversos tipos de tratamiento secundarios siendo algunos de los más habituales los fangos activados, los biofiltros o los contactores biológicos rotativos. Los fangos activados consisten en una aireación combinada con un vigoroso mezclado del agua a tratar para que quede bien oxigenada. En los biofiltros, se hace pasar el agua residual por lechos de piedras, piezas de plástico, entre otros, a un flujo lento y en presencia de aire, permitiendo el crecimiento microbiano en la superficie y formando una película biológica fija que degrada los componentes del agua residual que está en contacto. Los contactores biológicos rotativos, donde de forma similar a los biofiltros, se forma una capa biológica microbiana sobre unos discos semisumergidos que giran lentamente, permitiendo una adecuada oxigenación.

### 5.4. Tratamiento terciario

Finalmente, el tratamiento terciario, que tiene como objetivo global eliminar la carga orgánica residual y otros elementos tanto inorgánicos (nutrientes) como patógenos, parásitos o bacterias que no se eliminaron en procesos anteriores, mejorando en gran medida la calidad del agua y dejándola perfectamente apta para su reutilización o vertido al medio natural.

Los sistemas para el tratamiento terciario más utilizados según Rico and Melgarejo (2006) [30] son: sistemas de coagulación-floculación, descritos en el tratamiento primario; sistemas de filtrado (filtros de arena, membranas...) y sistemas de desinfección. A continuación, se describen brevemente algunos de estos procesos a excepción del sistema de membranas, el cual se tratará con mayor profundidad en puntos posteriores.

Los sistemas de filtros de arena son muy simples, pues se basan en hacer pasar la corriente de agua residual del efluente secundario por un lecho filtrante, arena en este caso, reteniendo todo tipo de moléculas y elementos suspendidos en el agua a tratar. Tal y como se describe en estudios como el de

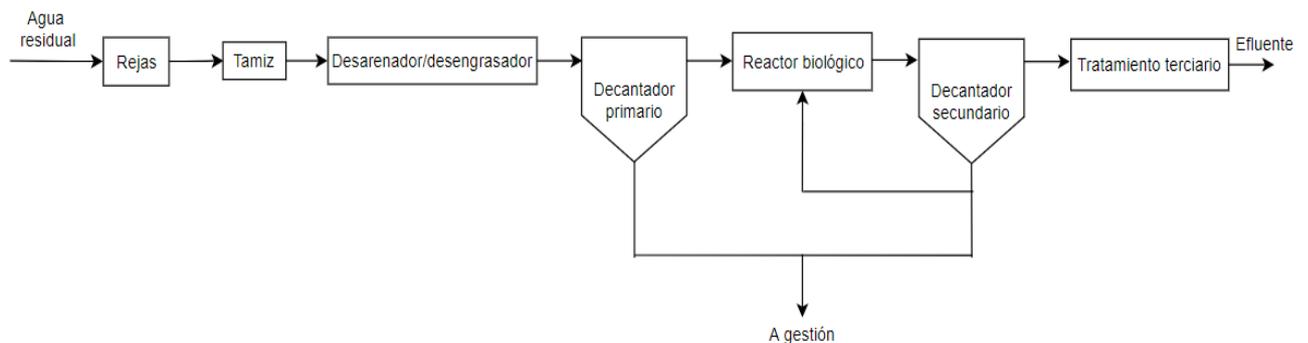
Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Ostad-ali-askari (2019)[31], Seeger et al. (2016) [32] o M. Racar et al. (2019)[33], estos sistemas se emplean mucho como desinfectantes para la eliminación de patógenos como los organismos coliformes, E. Coli... y también como sistemas de pretratamiento para disminuir en gran medida el ensuciamiento de las membranas de tratamientos posteriores.

Los sistemas de desinfección consisten en la eliminación de patógenos y otros elementos perjudiciales, como los contaminantes emergentes, antibióticos y otros microcontaminantes (pesticidas, productos sanitarios...), mediante la adición de un elemento químico desinfectante como cloro u ozono (Burch, 2019 [34]), o por utilización de radiación ultravioleta (Cerreta et al., 2020 [35]).

Finalmente, a modo de ejemplo, se plantea uno de los muchos esquemas de una línea de aguas de una EDAR (Figura 1), con un tratamiento de fangos activos:



**Figura 1. Esquema de la línea de aguas de una EDAR modelo. Fuente: Elaboración propia**

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 6. PROCESOS DE MEMBRANA

Los procesos de membrana son procesos de separación que se basan en el tamaño de la partícula o molécula para retener y purificar la corriente tratada, donde todo elemento de un tamaño mayor que el tamaño de poro queda retenido. Sin embargo, a nivel técnico, la capacidad de retención de una membrana se define en base al llamado “molecular weight cut-off, MWCO” que se define como el valor de peso molecular en unidades de  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  (denominado Dalton, Da) a partir del cual el 90% del soluto de mayor peso molecular queda retenido en la membrana. A diferencia de otros procesos de separación, las membranas no necesitan ser regeneradas como sucede en algunas técnicas como las resinas de intercambio iónico. Son procesos que requieren una limpieza cada cierto tiempo para una eficiencia máxima, dicha limpieza se realiza normalmente por adición de reactivos químicos. Además, se adicionan otros productos para minimizar el daño que sufren, cuando fueran necesarios, como los antiincrustantes (para reducir el ensuciamiento provocado por la deposición de sales); o que busquen mejorar su eficiencia, como los agentes coagulantes y floculantes, lo que mejora mucho la calidad final del efluente que se desea conseguir.

La corriente de entrada a la membrana, el alimento, se divide en dos corrientes: el permeado, la corriente purificada que atraviesa la membrana y que contiene una corriente libre de los solutos que contenía el alimento; y el rechazo, que es la corriente que no atraviesa la membrana y que está más concentrada en solutos que el alimento. Esta operación de separación se refleja en la Figura 2:

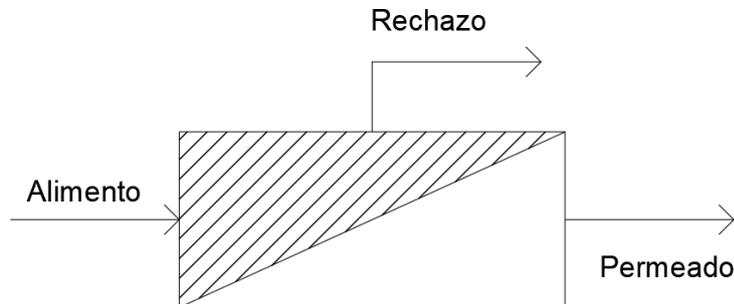


Figura 2. Esquema de funcionamiento de un proceso de membrana

Una de las variables de estudio de las membranas es la densidad de flujo de permeado ( $J_p$ ), de cuyo análisis puede observarse alteraciones en la eficacia de la membrana, sobre todo, del ensuciamiento de esta. Este parámetro puede obtenerse según la Eq. 1 [36]:

$$J_p = \frac{Q_{\text{permeado}}}{A_{\text{membrana}}} \quad \text{Eq. 1}$$

donde  $Q_{\text{permeado}}$  está en  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$  y  $A_{\text{membrana}}$  en  $\text{m}^2$ .

De igual forma, se puede definir el parámetro de permeabilidad, que de forma teórica se define como la capacidad de un material para que un flujo lo atraviese manteniendo su estructura inalterada. Es característico de cada membrana, y a menos que se le haga pasar un flujo de un fluido con cierta carga de solutos, se mantiene constante. Por ello es un parámetro utilizado como indicador para evaluar el ensuciamiento de la membrana. En los procesos gobernados por la presión, se obtiene experimentalmente al evaluar la densidad de flujo de permeado de una membrana a diferentes presiones transmembranales, tal y como se refleja en la siguiente Eq. 2:

$$J_p = p \cdot \Delta P \quad \text{Eq. 2}$$

Siendo 'p' la permeabilidad de la membrana y tiene unidades de  $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$  y la presión transmembranal,  $\Delta P$ , con unidades de presión, normalmente en bar.

Este concepto de presión transmembranal se define de forma teórica en la Eq. 3:

$$PTM = P_{\text{capa activa}} - P_{\text{cara permeado}} = \frac{P_{\text{alimento}} - P_{\text{rechazo}}}{2} - P_{\text{atm}} \quad \text{Eq. 3}$$

donde  $P_{\text{alimento}}$  y  $P_{\text{rechazo}}$  se miden de forma experimental con manómetros en cada una de las respectivas corrientes y la presión atmosférica, en valor relativo relativas, toma el valor de 0 bar.

A continuación, otro término muy interesante a definir es el de factor de reducción volumétrico (FRV) (Eq. 4), para cuando un ensayo se realiza a concentración variable. Se trabaja a concentración variable cuando la corriente de permeado se extrae del sistema mientras que la corriente de rechazo o concentrado se reintroduce de nuevo en el tanque de alimentación. Esto provoca que el volumen de alimento sea cada vez menor y, como consecuencia, la corriente de alimento esté cada vez más concentrada. Para determinar el % de reducción de volumen se aplica la ecuación siguiente (Eq. 4):

$$FRV = \frac{V_0}{V_{fin}} \quad \text{Eq. 4}$$

donde  $V_0$  es volumen inicial del tanque de alimentación y  $V_{fin}$  es el volumen del tanque al final del ensayo, ambos en las mismas unidades de volumen (L).

Finalmente, se define el término de conversión de una membrana o proceso de membranas, que relaciona la cantidad de permeado que se obtiene y el alimento según la EQ:

$$Y = \frac{Q_{\text{permeado}}}{Q_{\text{alimento}}} \quad \text{Eq. 5}$$

donde  $Q_{\text{alimento}}$  es la corriente de entrada a la membrana o sistema de membranas

Los procesos de membrana son muy variados y una forma muy típica de clasificarlos es por la fuerza impulsora en la que se basan. La fuerza impulsora es la diferencia de una magnitud físico-química entre fases, manifestada en forma de un gradiente y que permite crear un flujo de componentes a través de,

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

en este caso, una membrana. Así, se pueden definir cuatro tipos de procesos en función de la magnitud que crea esta fuerza impulsora (Crespo and Bøddeker, 2013, [37]):

**Tabla 4. Clasificación de procesos de membrana según la fuerza impulsora**

<b>Fuerza impulsora</b>	<b>Procesos</b>
Concentración	Pervaporación, diálisis, separación de gases, membranas líquidas
Potencial	Electrodiálisis, electrólisis con membranas
Temperatura	Destilación, ósmosis térmica
Presión	Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa

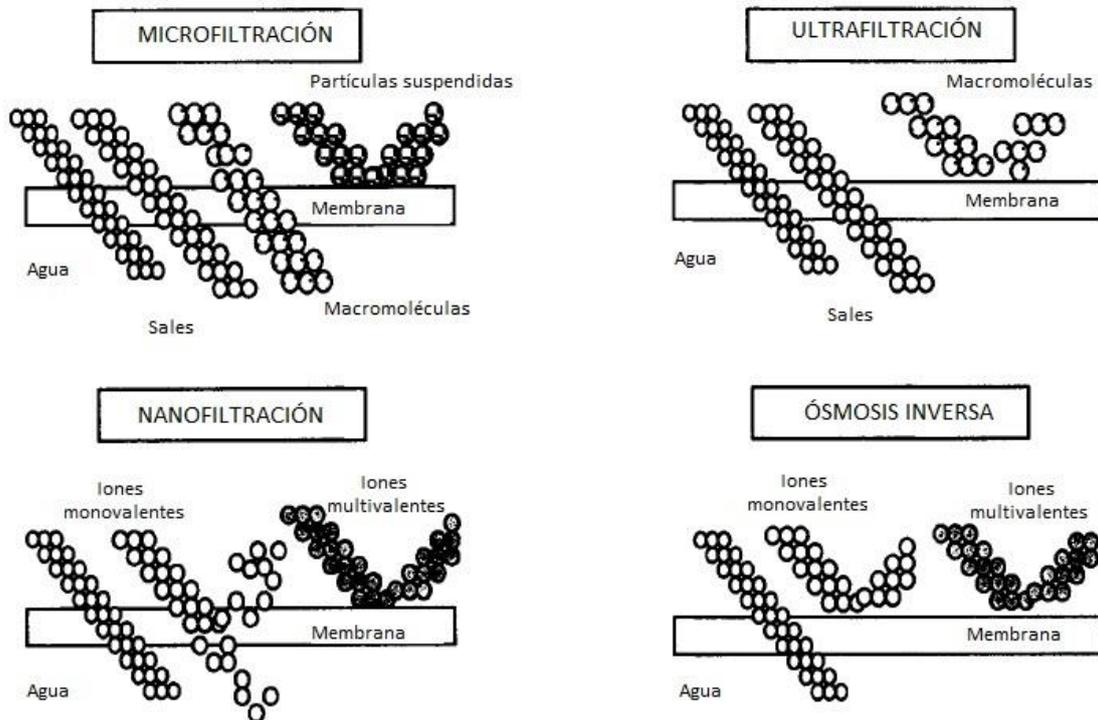
De todos ellos, son los procesos de membrana regidos por la presión los más utilizados en el tratamiento de aguas (Van der Bruggen et al., 2003, [38]) y, por tanto, los más relevantes para el estudio en el presente TFM. Este grupo de procesos se diferencia entre sí por el tamaño del poro de las membranas, siendo de mayor a menor, la microfiltración (MF), la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) y la ósmosis inversa (OI). Sus características y diferencias se recogen a continuación en la Tabla 5:

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

**Tabla 5. Características de los procesos de membrana gobernados por la presión.[38]**

	<b>MF</b>	<b>UF</b>	<b>NF</b>	<b>OI</b>
Permeabilidad ( $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ )	>1000	10-1000	1,5-30	0,05-1,5
Presión (bar)	0,1-2	0,1-5	3-20	5-120
Tamaño de poro (nm)	100-10000	2-100	0,5-2	<0,5
Rechaza:				
- Partículas suspendidas	Sí	Sí	Sí	Sí
- Macromoléculas	No	Sí	Sí	Sí
- Elementos orgánicos pequeños	No	No	Algunos	Sí
- Iones multivalentes	No	Algunos	Sí	Sí
- Iones monovalentes	No	No	No	Sí
Aplicaciones	Clarificación, pretratamiento, eliminación de bacterias	Eliminación de macromoléculas, bacterias y virus	Eliminación de iones multivalentes y componentes orgánicos pequeños	Agua ultrapura, desalación de aguas

Y de forma esquemática se representa en la Figura 3, el tipo de partículas que pueden atravesar cada tipo de proceso de membrana:



**Figura 3. Representación esquemática de los rechazos de los procesos de membrana gobernados por la presión.[38]**

Los procesos de microfiltración (MF) son los que poseen membranas con los poros más grandes (macroporosas), permitiendo el paso de elementos comprendidos entre 0,1-10  $\mu\text{m}$ . Además, el principio de separación en el que se basa es el de la capilaridad. Así pues, actúa como un tamiz que retiene todas las partículas mayores de ese tamaño. Se utiliza sobre todo como una barrera de desinfección frente a la actividad bacteriana, y también frente a partículas que puedan obstaculizar el correcto funcionamiento de procesos posteriores como coloides y diversos microorganismos.

La ultrafiltración (UF) es la técnica que emplea membranas de un tamaño de poro inmediatamente inferior a la MF (mesoporosas), con tamaños entre 2-100 nm (un equivalente de entre 1 y 300 kDa de cut-off) y al igual que ella actúa como un tamiz, más pequeño, cuyo principio de funcionamiento es también la capilaridad. Al poseer permeabilidades inferiores, la presión de funcionamiento requerida es mayor para poder alcanzar densidades de flujo de permeado similares. Sus usos suelen ser para la eliminación de moléculas orgánicas relativamente grandes de todo tipo de industrias. Es una técnica empleada normalmente en el tratamiento de aguas para llevar a cabo una clarificación y desinfección del influente.

La nanofiltración (NF) comprende membranas con tamaños de poro alrededor de 1 nm (microporosas), lo que equivale a un cut-off aproximado de 300  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . En este rango quedan retenidos elementos considerados como microcontaminantes, elementos que otorgan color al agua y iones multivalentes como calcio o magnesio. Su principio de funcionamiento es de disolución-difusión en combinación con la capilaridad. Además, este tipo de membranas se caracterizan por tener grupos ionizables en su estructura, lo que supone que la superficie de la membrana quede cargada en presencia de una

corriente alimento. La diferencia de potencial que se establece entre la superficie de la membrana y el seno del fluido se conoce como el potencial de Donnan, y es gracias a este potencial que este tipo de membranas es capaz de retener componentes iónicos (normalmente divalentes), aun siendo más pequeños que el poro de la membrana. Es por esta característica que diversos autores [39][40], consideran la NF como un proceso híbrido entre la UF y la OI, dado que para iones multivalentes el comportamiento es similar al de una membrana densa como la OI, mientras que para macromoléculas o partículas su comportamiento similar al efecto tamiz de la UF.

La ósmosis inversa (OI) se caracteriza por utilizar membranas densas donde no hay poros como tal, de ahí que su principio de funcionamiento sea únicamente la disolución-difusión. Este tipo de membranas, al tener permeabilidades tan bajas, requieren una alta presión para poder generar un flujo de permeado aceptable, de ahí que sea un sistema con alto consumo energético. Son membranas diseñadas para que idealmente sólo el agua sea permeable a ellas, aunque en la realidad siempre una pequeña fracción de soluto consigue atravesarla. Por esta característica, son membranas capaces de retener solutos de muy bajo peso molecular como los iones monovalentes.

Todos estos procesos son susceptibles del fenómeno del ensuciamiento, que se ha convertido en uno de los principales retos a batir en la actualidad, puesto que a medida que la membrana se va ensuciando, la densidad de flujo de permeado va disminuyendo, convirtiéndose en un proceso cada vez menos eficaz que requiere una limpieza, normalmente química, que restablezca las capacidades de la membrana a cómo eran inicialmente.

A nivel estructural, una membrana está compuesta por dos partes:

- Una **capa activa**, responsable de los valores de flujo de permeado e índice de rechazo de la membrana y cuyo tamaño de poro varía en función de la operación a realizar.
- Una **capa soporte**, al cual se ancla la capa activa, tiene como finalidad aportar resistencia mecánica a la membrana, la cual podría llegar a soportar presiones muy elevadas, como es el caso de las membranas de OI para desalación de agua de mar.

Las membranas, además, no son siempre iguales, sino que existen diferentes tipos de configuración en función de la corriente de alimento a tratar. Algunas de las más típicas se recogen a continuación:

- **Planas**: son los módulos más simples, pues consisten en una membrana en forma de lámina la cual se enmarca en un soporte que puede ser de diversas geometrías como cuadrado o circular. Proporcionan densidades de flujo de permeado bajas debido a la baja superficie de membrana, sin embargo, su fácil montaje permite un proceso de lavado sencillo.

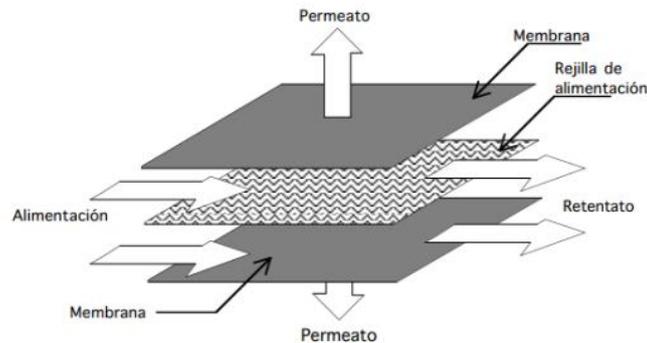


Figura 4. Módulo de membranas plano. [41]

- **Tubulares:** al igual que las planas, es una configuración muy simple donde la membrana se introduce en un soporte poroso tubular, adaptándose a su forma. Trabajan en flujo cruzado tangencial y se usa mucho para tratar corrientes de alimento con un alto contenido en sólidos, grasas o aceites. Poseen una baja densidad de empaquetamiento, sólo superior a la configuración plana, además de que típicamente requieren un alto coste de operación (energía). Sin embargo, es una configuración que se caracteriza por ser de muy fácil limpieza y capaz de soportar todo tipo de lavados, tanto a contracorriente como con productos químicos.

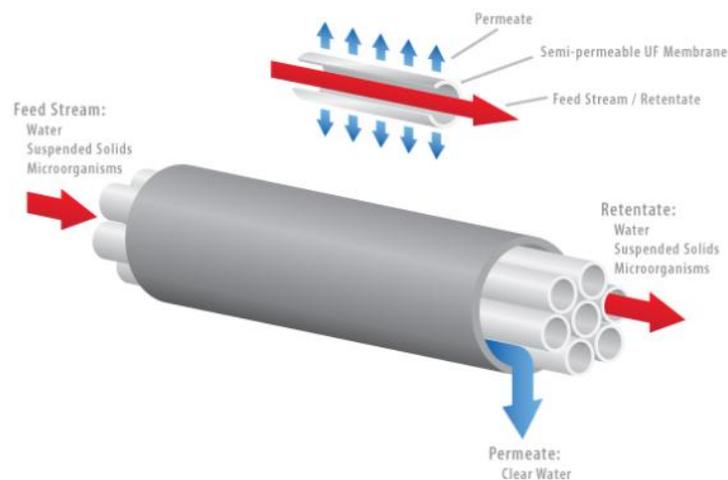


Figura 5. Módulo de membrana tubular. [42]

- **Fibra hueca:** hace uso de miles de fibras porosas y largas de entre 1 y 3,5 mm, introducidas normalmente en una envoltura de PVC. Son fibras con un diámetro muy pequeño y con una alta flexibilidad, empleadas en todo tipo de procesos de membrana. Su funcionamiento se basa en el principio de capilaridad y se emplean en procesos como MBR, tratamientos terciarios de aguas residuales, etc. Y aunque su alto empaquetamiento de fibras y flexibilidad le permite adaptarse a todo tipo de módulos y obtener grandes cantidades de permeado, poseen una serie de desventajas a tener en cuenta, como el ensuciamiento irreversible, la rotura de fibras, y la dificultad de limpieza.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

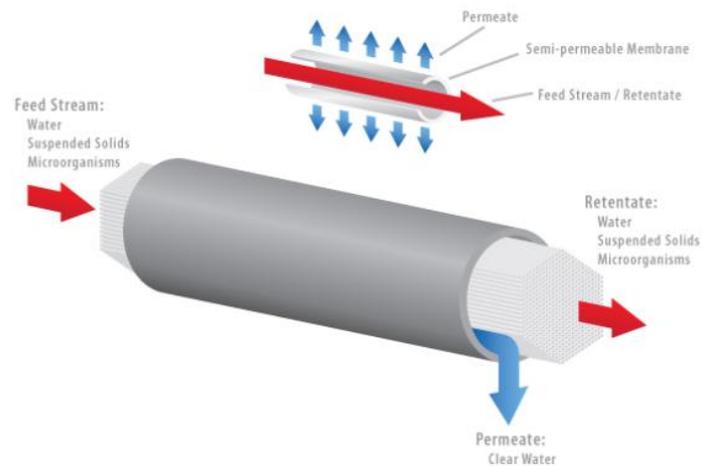


Figura 6. Módulo de membrana de fibra hueca. [42]

- **Arrollamiento en espiral:** formadas por una serie de membranas planas arrolladas entre sí, separadas por espaciadores de membranas formando una estructura en sándwich. La función de estos espaciadores es proveer suficiente espacio para el paso del agua a tratar dando lugar a un flujo uniforme y tangencial. En el centro se encuentra un separador del permeado formando un tubo por donde circula la corriente libre de solutos, alrededor del cual se encuentra esta estructura en sándwich. Es una tecnología muy utilizada, como en la industria láctica, textil, del tratamiento de aguas...Tienen una alta densidad de empaquetamiento, y permiten aprovechar al máximo la superficie de las membranas. Sin embargo, son susceptibles al ensuciamiento por sólidos en suspensión y la limpieza mecánica de las mismas no es viable.

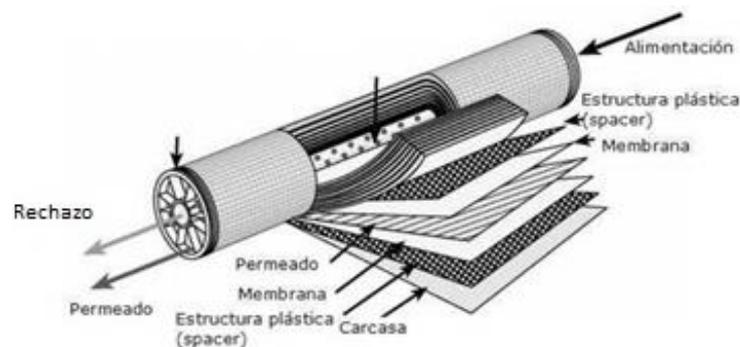


Figura 7. Módulo de membrana de arrollamiento en espiral.[43]

De igual forma, las membranas se fabrican a partir de diversos materiales, cada uno específico para una serie de aplicaciones o para un tipo de corriente alimento, donde la característica más común que comparten entre ellas es la hidrofiliidad, es decir, su afinidad al agua. Se clasifican en dos tipos según su naturaleza química: orgánicas e inorgánicas.

Las membranas orgánicas son generalmente cualquier polímero, aunque debido a que éstos deben cumplir con un mínimo tiempo de funcionamiento, sólo algunos se utilizan actualmente. Los más utilizados son los basados en celulosa debido a su bajo coste y por su baja tendencia a la adsorción. Algunos de ellos como el acetato de celulosa son muy utilizados en el tratamiento de aguas, ya que, aunque poseen cierta sensibilidad a pH ácidos o básicos y una tendencia a la degradación biológica, son resistentes al cloro. Otro grupo de polímeros son las poliamidas aromáticas, que poseen rangos de trabajo de pH más amplios, así como una mayor resistencia a la actividad biológica, sin embargo, su resistencia a la degradación oxidativa es muy baja, por lo que el mínimo rastro de cloro en la corriente alimento las destroza. Finalmente, otro grupo destacable es el de las polisulfonas, sobre todo la polietersulfona (PES) que, aunque no son hidrofílicas y tienen tendencias a la adsorción, sus resistencias mecánicas, químicas y térmicas son muy elevadas.

Las membranas inorgánicas poseen una resistencia química y estabilidad térmica muy superiores a las orgánicas, sin embargo, debido a su fragilidad y alto coste, su uso suele reservarse a las industrias con químicos más agresivos o donde se recurrirá a temperaturas de fluido elevadas. Las más relevantes son las membranas cerámicas, las cuales son de diversos tipos: óxidos, carburos, nitruros o de aluminio o titanio.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 7. PROCESOS DE ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVO

En primer lugar, es necesario introducir el término de la adsorción, la cual se define como un proceso de transferencia de materia en el que un material (sustrato) es capaz de fijar en su superficie ciertos solutos (adsorbatos) presentes en una corriente líquida. Es un proceso normalmente reversible, siendo la desorción el fenómeno contrario.

En la superficie del sólido, se producen una serie de interacciones con el adsorbato que hace posible su fijación en la superficie. Estas interacciones pueden ser de dos tipos: químicas, donde el proceso se denomina quimisorción; y físicas, donde el proceso recibe el nombre de fisisorción.

La fisisorción es un tipo de unión donde participan uniones intermoleculares relativamente débiles (fuerzas de Van der Waals). Puede determinarse que una unión es física si no se comparten electrones ni hay transferencia de éstos, estableciendo una interacción reversible. Además, la fisisorción no es específica, es decir, las moléculas adsorbidas son inespecíficas a la hora de unirse a la superficie, pudiéndola ocupar en su totalidad. De igual forma, en términos termodinámicos, aunque un poco más imprecisa, puede identificarse una fisisorción por el calor liberado dado que éste, normalmente, será muy bajo. Sin embargo, para este último criterio los valores de calor desprendidos son bastante variables, siendo según Bansal and Goyal (2005) [44], entre  $10\text{-}20 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

La quimisorción, por el contrario, es una adsorción con interacciones fuertes del tipo enlace químico donde se producen intercambios de electrones, siendo, además, de carácter irreversible. La reacción del adsorbato con el sustrato es específica, siendo sólo ciertos lugares de la superficie aptos para la adsorción. Además, el calor de adsorción es generalmente más alto que en la fisisorción, siendo superior en la mayoría de las ocasiones a  $40\text{-}400 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

De forma resumida, la diferencia entre ambos procesos puede plasmarse en la siguiente Tabla 6:

**Tabla 6. Diferencias entre fisisorción y quimisorción [45]**

<b>Propiedad</b>	<b>Adsorción física</b>	<b>Adsorción química</b>
Tipo de fuerzas de unión	Van der Waals	Similar a un enlace químico
Calor de adsorción	10-40 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	20-400 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
Cambio químico del adsorbato	No	Formación de un compuesto superficial
Reversibilidad	Totalmente reversible	Proceso irreversible
Energía de activación	Muy baja, cercana a cero	Alta, similar a una reacción química
Efecto de la temperatura	Negativo	En algunos rangos de temperatura, positivo
Especificidad adsorbato-adsorbente	Muy baja	Alta
Formación de multicapa	Sí, normalmente en adsorción en fase gas	No

En este TFM se ha centrado el estudio de la adsorción con carbón activo debido a sus grandes propiedades adsorbentes, siendo ampliamente utilizado en el sector del tratamiento de aguas debido a su capacidad de eliminar olores, color y una gran variedad de componentes tanto orgánicos como inorgánicos. Es un material carbonoso con un elevado nivel de porosidad y alta superficie específica cuyas formas más típicas son como pellets, en polvo, granular o en fibras; aunque hay otras geometrías diseñadas para procesos más concretos. Además, la clasificación más típica se basa en el tamaño de poro, pues según la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) se establecen 3 tipos: microporosos (<2 nm), mesoporosos (2-50 nm) y macroporosos (>50 nm).

La composición de los carbones activos en sus diferentes formas consta de cerca de un 85-95% de carbono junto con una mezcla de diferentes elementos como O, H, S o N, los cuales varían en función de la materia prima utilizada en la síntesis. Además, la mayoría de los carbones activos presentan valores de superficie específica de entre 800-1500  $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$

El proceso de síntesis del carbón activo consta de dos etapas: primero pasa por una carbonización a temperaturas algo más bajas de 800°C en una atmósfera inerte y, posteriormente, se activa el producto carbonizado mediante el uso de un agente activador. La materia prima puede ser cualquier material basado en el carbono, sin embargo, las propiedades del producto final dependerán tanto de la materia prima utilizada como de las condiciones del proceso de fabricación. En la primera etapa de carbonización, los elementos que no son carbono (oxígeno, nitrógeno, hidrógeno...) se eliminan en forma de especies gaseosas volátiles (aunque siempre queda una pequeña fracción), dejando tras de

sí un residuo carbonoso (char) con un alto nivel de entrecruzamiento, lo cual deja lleno de intersticios al material. Son esta gran cantidad de intersticios la que da pie a la formación de poros más adelante, durante la activación, la cual se lleva a cabo normalmente en una atmósfera de aire,  $\text{CO}_2$  o vapor caliente a temperaturas de entre 950 y 1000 °C, tras la cual se consigue un material con una estructura interna de altísima porosidad, lo que supone una gran superficie específica, haciéndolo ideal para los procesos de adsorción.

Como se introdujo anteriormente, las formas geométricas más típicas en las que se sintetiza el carbón activo granular era como polvo (PAC, Powdered Activated Carbon), GAC (Granular Activated Carbon) o en forma de fibras (ACF, Activated Carbon Fibers). Cada geometría posee sus ventajas y desventajas, y está preparada para un determinado tipo de aplicaciones. Por ejemplo, el PAC permite adsorciones muy rápidas, pero es de difícil manejo, además de causar una alta caída de presión en sistemas de lecho fijo siendo también de difícil regeneración. El GAC, es muy resistente a la abrasión y soporta condiciones de operación más severas que el PAC, mantiene además muy buenas propiedades adsorbentes y es de fácil regeneración, sin embargo, su coste es más elevado. Las ACF son de las geometrías más caras por su compleja síntesis, sin embargo, presentan una gran adaptabilidad a la forma de cualquier equipo de adsorción además de causar una caída de presión baja.

Para la adsorción de componentes orgánicos en el agua, la funcionalidad que se buscaba en el carbón activo en el presente TFM, hay que tener en cuenta ciertas consideraciones teóricas. Las más importantes son la polaridad de los componentes orgánicos a adsorber, las dimensiones de la molécula orgánica y, por supuesto, el tamaño de poro del carbón activo, pues las moléculas más grandes que el tamaño de poro no podrían adsorberse.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL, MATERIALES Y MÉTODOS ANALÍTICOS

La parte experimental consta de tres partes: ensayos de adsorción con carbón activo, ensayos de ultrafiltración y nanofiltración. Además, se incluye la caracterización tanto del efluente secundario como del agua tratada en cada uno de los tratamientos. En los siguientes apartados se incluye el desarrollo de la cada una de las partes.

### 8.1. Adsorción con carbón activo. Ensayos Jar-test

Los ensayos de adsorción con carbón activo se llevaron a cabo con un equipo Jar-Test de la marca VELP Scientifica, modelo JLT 6 (Figura 8), con el objetivo de evaluar la adsorción de las diferentes moléculas orgánicas (medidas como DQO) presentes en el agua de estudio.



**Figura 8. Equipo de Jar-Test de la marca VELP Scientifica modelo JLT 6**

Se tomó un volumen de agua de efluente secundario de estudio de 300 mL, y se añadieron diferentes concentraciones de carbón activo granular de dos tipos (codificados como C001 y C002). Con ello, se estudió el efecto de las diferentes concentraciones de carbón activo sobre la calidad del efluente, siendo éstas de 50, 200, 1000, 5000, 10000 y 30000 ppm. Se seleccionó un rango amplio de concentraciones para el estudio. Sin embargo, la velocidad de agitación (160 rpm) y el tiempo de contacto para cada ensayo (2 horas), se establecieron en base a los datos proporcionados por el ITE (Instituto Tecnológico de la Energía). Dicho grupo formaba parte de esta investigación junto con el ISIRYM. De cada uno de los ensayos se extrajeron dos muestras, una al cabo de una hora, y otra a las dos horas. Dichas muestras se reservaron para una posterior caracterización tras filtrado con un filtro de 0,45 micras de la marca Labbox.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Las masas de carbón activo preparadas para el ensayo se recogen a continuación en la Tabla 7.

**Tabla 7. Concentraciones y masa de carbón activo empleada. Del C001 y C002.**

<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Masa de carbón activo (gr)</b>
30000	9,000
10000	3,000
5000	1,500
1000	0,300
200	0,060
50	0,015

## 8.2. Ensayos de ultrafiltración

En este apartado se busca comparar las características del agua del efluente secundario obtenida mediante el uso de membranas orgánicas. En los siguientes apartados se detallará la metodología y los equipos empleados.

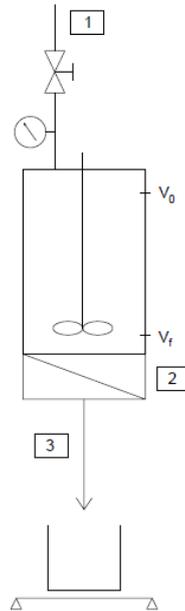
Los ensayos de UF se realizaron en un módulo de membranas de la marca Millipore de 300 mL (Figura 9) con capacidad para trabajar sólo en discontinuo. Las membranas ensayadas fueron de la marca Orelis, de polietersulfona (PES), y tanto de 5 kDa como de 100 kDa, con un área de  $40 \text{ cm}^2$ . Las condiciones de ensayo fueron de 3,7 bar de presión transmembranal, conseguido mediante un flujo de aire a presión, y 200 rpm de agitación para todos los ensayos.



**Figura 9. Módulo de membranas Millipore de 300 mL**

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

El esquema del montaje de módulo de UF se recoge en la Figura 10:



LEYENDA					
	Manómetro		Vaso colector de permeado	1	Entrada de aire
	Válvula de regulación		Balanza electrónica	2	Membrana plana
	Agitador magnético		Módulo Orellis	3	Corriente de permeado

Figura 10. Esquema del montaje del módulo de UF de Millipore

El procedimiento, análogo en todos los casos, consistía, en primer lugar, en pasar durante 1 hora agua osmotizada para compactar la membrana (nº 2) hasta conseguir una densidad de flujo de permeado estacionario (corriente de permeado, nº 3). Para no introducir un gradiente brusco de presión que pudiera dañar la membrana, la presión se aumentó desde el inicio de la compactación y de forma gradual hasta alcanzar los 3,7 bar en 6 minutos. Dicha presión se regulaba con la ayuda de una válvula a la entrada de aire a presión al módulo (nº 1), cuyo valor máximo de presión es de 4 bar, aunque por posibles variaciones o imprecisiones al estar en el límite, se tomó un valor ligeramente inferior. Tras la compactación, se hizo pasar la muestra del agua de EDAR durante 1 hora, recogiendo el permeado resultante del ensayo para una posterior caracterización físico-química, ensayando con un  $V_0 = 300 \text{ mL}$  hasta un  $V_f = 30 \text{ mL}$ .

El proceso de medida de densidad de flujo de permeado consistía en evaluar el incremento de masa de agua recogida en un vaso de precipitados, cuyo peso era monitorizado por una balanza electrónica

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

de la marca Kern (Figura 11) en intervalos de tiempo de 1 minuto. Con el incremento de masa obtenido en un intervalo de tiempo constante de 0,017 horas, la conversión de masa a volumen a través de la relación de densidad (considerada la misma que la del agua, de  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) y el área de membrana de  $0,4 \text{ m}^2$ , se pudieron obtener los valores de densidad de flujo del permeado ( $J_p$ ) siguiendo la Eq. 1.



**Figura 11. Balanza electrónica de la marca Kern**

### 8.3. Ensayos de nanofiltración

Los ensayos de NF se realizaron en una planta de laboratorio de membranas (Figura 12) cuyo esquema se muestra el de la Figura 12. Los ensayos de nanofiltración se realizaron con la membrana orgánicas NF270 (entre 300-400 Da de cut-off) de la casa comercial Dow Filmtec, hechas de poliamida aromática.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

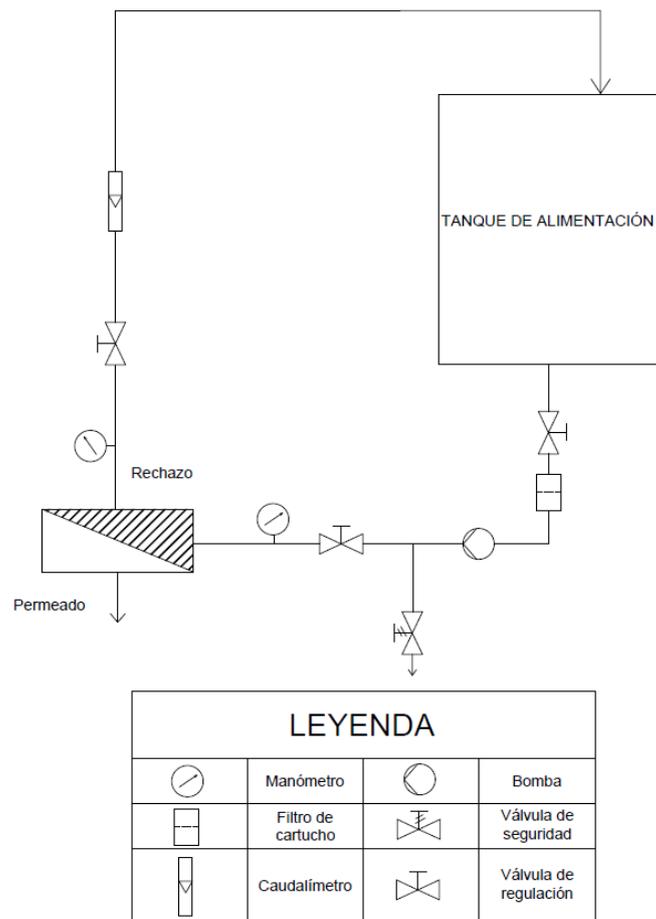


Figura 12. Esquema de la planta piloto de NF utilizada en los ensayos

Seguidamente, se describe el funcionamiento de la planta de NF de la Figura 12:

El tanque de alimentación, de capacidad para 60 L, dispone de una válvula de paso, que permite el flujo de alimento a un filtro que protege a la bomba y a las membranas de cualquier elemento sólido. La bomba, regulable mediante un panel de control con un variador de frecuencia, condiciona el caudal de paso para ajustarlo de forma más exacta al deseado. Le sigue una válvula de seguridad para que, en caso de sobrepresión, ésta se abra y deje salir parte del contenido de la conducción. Seguidamente se encuentra una válvula de regulación que, con su apertura o cierre manual, permite regular la presión del sistema a costa de variar también el caudal. Debido a la característica de esta válvula, hay que encontrar un equilibrio de caudal-presión deseados regulando a la vez tanto el variador de frecuencia de la bomba, como el grado de apertura de la válvula. La presión del sistema es medida gracias a dos manómetros, uno situado antes de la entrada a la membrana, y otro situado en la conducción correspondiente al rechazo, siendo la media de los valores de ambos instrumentos la presión real del sistema o también denominada presión transmembranal (PTM). El caudalímetro se sitúa en la conducción de rechazo. Finalmente, el rechazo se recircula al tanque de alimentación, mientras que el

permeado se recoge para posteriores análisis. Por ello, en este caso y al igual que con la UF, se trabajó también en modo de volumen variable.

A continuación, se detalla el procedimiento experimental seguido:

a) Eliminación de disolución conservante de la membrana

En primera instancia se ha de eliminar la disolución conservante que tiene la membrana que llega de fábrica. Para ello, se hizo pasar agua osmotizada sin presión y con un caudal cercano a los  $400 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  sin recirculación de rechazo ni permeado. La forma de comprobar que se había eliminado la disolución conservante era mediante una medida de la conductividad, tanto en la corriente de permeado como en la de rechazo. En ambos casos debían poseer una conductividad igual a la del agua osmotizada.

b) Compactación de la membrana

En estos ensayos se tuvo que realizar una compactación previa de la membrana con agua osmotizada a 15 bar de presión (una presión mayor que la de trabajo) durante 1 hora y a un caudal de  $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , recirculando tanto rechazo como permeado. Esta etapa es necesaria al tratarse de una membrana orgánica. De esta forma se evitan variaciones de la densidad de flujo de permeado debidas a la compactación de la membrana.

c) Evaluación de la permeabilidad inicial al agua osmotizada

Posteriormente, se llevó a cabo una recogida de datos de la densidad de flujo de permeado a tres presiones transmembranales diferentes: 4, 8 y 12 bar. El ensayo se realizó con agua osmotizada a un caudal de  $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , manteniendo en funcionamiento la planta durante 30 min a cada presión para estabilizar el valor de la densidad de flujo de permeado.

El valor del coeficiente de la permeabilidad hidráulico de la membrana se obtuvo realizando una interpolación lineal con los tres puntos recogidos (densidad de flujo de permeado vs. presión), donde el valor de la pendiente corresponde con el coeficiente de la permeabilidad de la membrana tal y como recoge la Eq. 2.

d) Ensayo con agua del efluente secundario

En el ensayo con las membranas de NF se realizó a concentración, es decir, recirculando el rechazo al tanque inicial y extrayendo el permeado. Se utilizó como disolución alimento el agua procedente del tratamiento secundario, a una presión transmembranal de 8 bar y caudal de  $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  hasta alcanzar un factor de reducción volumétrico de 6,6, midiendo la densidad de flujo de permeado cada 5 litros de permeado extraído. Finalmente, ese permeado se reservó para posteriores análisis.

e) Aclarado con agua osmotizada

Tras el ensayo indicado en el apartado d), se llevó a cabo el aclarado de la membrana con agua osmotizada con el fin de eliminar el ensuciamiento reversible que pudiera haberse producido. Se trabajó sin presión y con un caudal de  $400 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ .

f) Evaluación de la permeabilidad final al agua osmotizada

Con el fin de comprobar el grado de recuperación de la membrana tras el aclarado con agua osmotizada (e), se repitió en ensayo de permeabilidad al agua osmotizada. Al igual que antes se determinaron los valores de la densidad de flujo de permeado a las tres PTM anteriormente mencionadas para poder obtener el valor de la permeabilidad por medio de un ajuste lineal de puntos y así poder comparar con el valor de la permeabilidad inicial obtenido.

g) Limpieza química de la membrana

En caso de que las discrepancias entre la permeabilidad final e inicial superaran el 10% se llevaría a cabo una limpieza química de la membrana introduciendo en el tanque de alimentación una disolución de NaOH a pH 10,5. Las condiciones serían un caudal de corriente rechazo de  $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  y operar sin presión durante unos 30 minutos. Teniendo que posteriormente reevaluar el coeficiente de permeabilidad hidráulica para asegurarse que dicho proceso hubiera limpiado correctamente la membrana.

#### 8.4. Materiales y métodos analíticos

Para llevar a cabo la parte experimental del presente TFM, también se han empleado diferentes equipos, kits de reacción y otros elementos auxiliares para el análisis y caracterización de las diferentes muestras. Estas muestras, tanto las provenientes del efluente secundario, como las obtenidas en los ensayos de adsorción y ensayos con membranas (permeados), fueron sometidas a las técnicas de análisis fisicoquímicas que se detallan a continuación.

- Carbohidratos (método ANTRONA)
- Proteínas (método micro BCA)
- DQO (kits de reacción de Merck)
- pH (medidor de pH)
- Conductividad (conductímetro)
- Turbidez (turbidímetro)

##### **Análisis de carbohidratos – Método de la ANTRONA**

Este método es del tipo colorimétrico, donde la antrona (9,10-Dihidro-9-oxoantraceno) en presencia de ácido sulfúrico concentrado reacciona dando lugar a un derivado del furano de color verdoso cuyo máximo de absorción son 625 nm. Se trata de una reacción que cumple con la Ley de Beer y Lambert, que establece una relación entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de esta, siempre que se trabaje en el rango entre 10 y  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de, en este caso, glucosa.

La sensibilidad del método es de unos  $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de glucosa, teniendo también una desviación estándar de  $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Es importante destacar que, para evaluar los carbohidratos solubles presentes, han de filtrarse las muestras previamente a  $0,45 \mu\text{m}$ .

El método se explica a continuación:

- a) Preparar disolución de antrona al 0,2% en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado (96%).
- b) Dejar reposar la disolución en total oscuridad, pues se degradaría el reactivo, durante 2 horas
- c) Tras las dos horas, en viales de vidrio, tomar 1 mL de muestra a analizar y 2 mL de la disolución de antrona. Realizar también un blanco con agua osmotizada, 1 mL de agua y 2 mL de antrona, de igual forma. Después, cerrar los viales.
- d) Agitar en vórtex durante 10 segundos cada muestra y el blanco.
- e) Dejar reaccionar en un baño de agua a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 14 minutos.
- f) Enfriar viales en recipiente con agua y hielo durante 5 minutos.  
Finalmente, medir la absorbancia de la muestra a una longitud de onda de  $\lambda = 625 \text{ nm}$  en el espectrofotómetro, en el presente TFM el modelo DR6000 de la marca Hach (
- g) **Figura 13**), haciendo uso de la recta de calibrado previamente introducida en el equipo.



**Figura 13. Espectrofotómetro DR6000 de HACH**

Como se ha mencionado, es necesario elaborar una recta de calibrado para poder evaluar las muestras. Para ello se emplea el compuesto D-Glucosa monohidrato, para lo que se escogerán varias concentraciones entre  $0$  y  $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . El proceso de elaboración de dicha recta es el siguiente:

1. Preparar disolución de antrona al 0,2% en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado (96%), igual que antes.
2. Dejar reposar la disolución en total oscuridad durante 2 horas.
3. Elaborar una disolución madre, pesando  $0,01$  gramos de D-Glucosa monohidrato y enrasando a  $100 \text{ mL}$  en un matraz aforado con agua ultrapura. De esa disolución, se extraen  $9 \text{ mL}$ , los cuales corresponden a la muestra 1.
4. El resto de las muestras se elaboran a partir de la disolución madre siguiendo las proporciones de la siguiente Tabla 8.

**Tabla 8. Diluciones para elaboración de recta de calibrado de antrona**

Nº Muestra	$C_{\text{D-Glucosa}}(\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1})$	$V_{\text{D-Glucosa}}(\text{mL})$	$V_{\text{H}_2\text{O}}(\text{mL})$	$V_{\text{TOTAL}}(\text{mL})$
1	0,1	9	0	9
2	0,075	6,75 de nº 1	2,25	9
3	0,05	6 de nº 2	3	9
4	0,025	4,5 de nº 3	4,5	9
5	0,02	7,2 de nº 4	1,8	9
6	0,01	4,5 de nº 5	4,5	9
7	0,005	4,5 de nº 6	4,5	9
8	0	0	9	9

- Seguir el mismo proceso desde c) hasta g). Cuando se mida la absorbancia en el último paso, el blanco será la muestra más diluida de las preparadas, es decir, la muestra nº 8 o bien una muestra de agua ultrapura. Para cada muestra, restar el valor de la absorbancia del blanco para obtener el valor real.
- Con los 8 puntos obtenidos, elaborar la recta de calibrado e introducirla en el software del espectrofotómetro.

#### **Análisis de proteínas – Método micro BCA**

El método Micro Biocinchoninic Acid (Micro BCA), se emplea para la detección de proteínas con una concentración inferior a 20 ppm. Al igual que el método antrona anteriormente explicado, éste es un método colorimétrico que hace uso de la capacidad de absorber la luz de la muestra para evaluar su concentración. Este método se basa en dos reacciones que suceden de forma consecutiva:

- Primero, los enlaces peptídicos de la proteína reducen los iones  $\text{Cu}^{2+}$  a  $\text{Cu}^+$  en una reacción donde la temperatura es un factor determinante. La cantidad de iones de cobre reducidos es proporcional a la concentración de proteínas presentes en la muestra.
- Tras esto, dos moléculas de ácido bicinonínico (BCA) forman un complejo con las moléculas de  $\text{Cu}^+$  reducido, adquiriendo la muestra un característico color morado. Es este complejo el que tiene una gran capacidad de absorción de luz a 562 nm el cual, junto a la preparación de una recta de calibrado previa, permite determinar la concentración de proteínas presente en la muestra.

En este método participan 3 reactivos diferentes: A, B y C (Figura 14), que en conjunto forman el llamado “working reagent” (WR) de color verde intenso. En función de la cantidad de muestras se prepara más o menos WR, sin embargo, la proporción de cada reactivo es siempre la misma:

- Reactivo A: el “Assay Buffer”, que actúa como seno del WR pues posee propiedades reguladoras (tampón). La proporción en el WR es del 50%.
- Reactivo B: contiene la disolución de BCA. La proporción es del 48%.
- Reactivo C: contiene una disolución con los iones de  $\text{Cu}^{2+}$ . La proporción es del 2%.



**Figura 14. Reactivos A, B y C (azul) para el método micro BCA**

Al igual que sucedía con los carbohidratos, para poder evaluar la parte soluble de la muestra, han de prefiltrarse a  $0,45 \mu\text{m}$ .

La metodología a seguir es la siguiente:

- a) Se prepara el WR suficiente para utilizar  $0,5 \text{ mL}$  por cada muestra a analizar.
- b) En tubos Eppendorf se añaden los  $0,5 \text{ mL}$  de WR y otros  $0,5 \text{ mL}$  de la muestra. Adicionalmente se prepara un blanco, donde se agregan  $0,5 \text{ mL}$  de agua osmotizada y  $0,5 \text{ mL}$  de WR. Seguidamente se agita cada Eppendorf en un vórtex durante 10 segundos.
- c) Todos los Eppendorf son sumergidos en un baño de agua a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 1 hora.
- d) Al cabo de 1 hora se enfrían las muestras en otro baño de agua con hielo durante 5 minutos aproximadamente.
- e) Finalmente, se mide la absorbancia a  $562 \text{ nm}$  de cada muestra y del blanco. El resultado obtenido es directamente un valor de concentración de proteínas puesto que previamente se ha tenido que elaborar e introducir una recta de calibrado en el espectrofotómetro, paso que se detallará a continuación.

Para la elaboración de la recta de calibrado se han de preparar una serie de patrones a partir de una disolución madre de  $2000 \text{ ppm}$  proporcionada por el fabricante. Con esta disolución de proteínas BSA (Bovine Serum Albumin) se elaboran un total de 4 patrones de  $20$ ,  $10$ ,  $5$  y  $2 \text{ ppm}$ , los cuales siguen el mismo proceso detallado anteriormente (pasos de a) hasta e)).

## Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Con los valores de absorbancia de cada patrón se elabora una recta de 4 puntos, donde la ordenada del origen es cero, obteniendo así la recta de calibrado que se introduce en el software del espectrofotómetro.

### Análisis de la DQO

Para llevar a cabo estos análisis se procede a utilizar las cubetas de reactivos de la marca Merck (Figura 15), las cuales se ajustan a la DIN ISO 15705, con dos rangos de trabajo: de 4-40 ppm y de 10-150 ppm para aquellas muestras que se salieran del rango.



Figura 15. Cubetas del kit de reactivos de DQO de la marca Merck

El proceso es simple, pues consta de unas cubetas con el reactivo el cual hay que ponerlo en suspensión previamente mediante un balanceo. Seguidamente, han de agregarse 3 mL de la muestra a uno de los viales con el reactivo. Al mezclarse, la disolución se calienta y ha de agitarse vigorosamente unos segundos para asegurarse de un buen mezclado. A continuación, se depositan en un termorreactor, en el presente TFM un TR300 de Merck (Figura 16), a  $148 \text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas. Pasado ese tiempo se extrae y se deja enfriar al aire 10 minutos y, después, se vuelve a agitar y se deja reposar otros 30 min. Pasado ese tiempo, se mide la DQO con un fotómetro, en este caso, un NOVA 30 de la marca Merck (Figura 17).

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



Figura 16. Termorreactor TR 300 de Merck

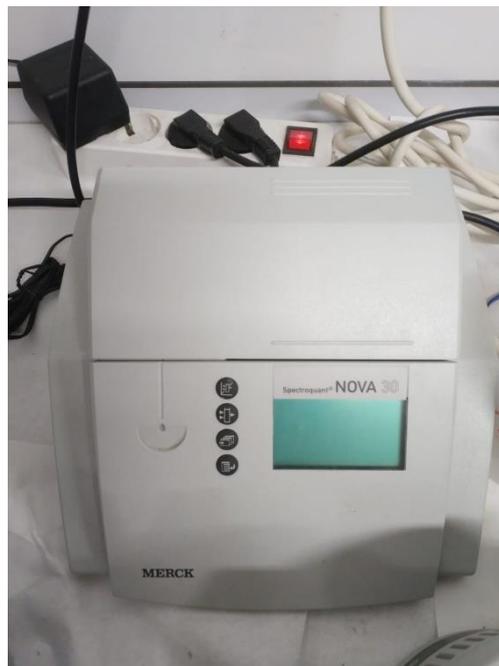


Figura 17. Fotómetro NOVA 30 de Merck

En el proceso de reacción participa una disolución sulfúrica de dicromato potásico que oxida la muestra de agua junto a sulfato de plata que actúa como catalizador del proceso. Tras esto los cloruros son enmascarados con sulfato de mercurio. Finalmente, lo que se detecta en el fotómetro son los iones  $\text{Cr}^{3+}$ , ya que existe una equivalencia de 1 mol de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  por cada 1,5 mol de  $\text{O}_2$  (DQO).

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

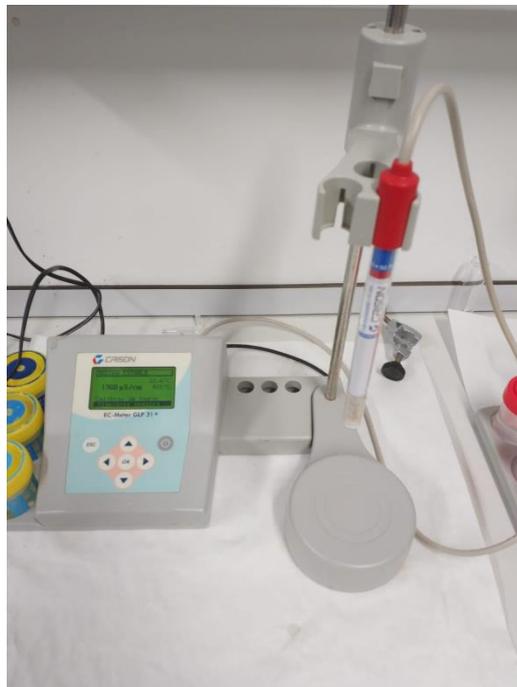
### Otros equipos empleados

La medida del pH se empleó un medidor de pH, el pH-Meter GLP 21+ de Crison (Figura 18)



**Figura 18. Medidor de pH GLP 21+ de Crison**

La conductividad se midió con un conductímetro EC-Meter GLP 31+ de Crison (Figura 19)



**Figura 19. Conductímetro GLP 31+ de Crison**

La turbidez se midió con un turbidímetro de la marca Dinko (Figura 20).

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



Figura 20. Turbidímetro de Dinko

## 9. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 9.1. Caracterización del efluente secundario

Para poder evaluar el efecto de los diferentes tratamientos en la calidad del agua, se llevó a cabo una caracterización físico-química previa de las muestras de agua provenientes del efluente secundario de una EDAR y empleadas en los ensayos de adsorción, UF y NF. De esta forma se tiene una base de parámetros de referencia con los que posteriormente se podrá comparar.

Los parámetros analizados fueron el pH, conductividad, turbidez, DQO y la concentración de carbohidratos y proteínas en la muestra, todo ello siguiendo la metodología detallada en el punto 8.4 de este documento.

A continuación, en la Tabla 9 se recogen los resultados de la caracterización de la muestra analizada.

**Tabla 9. Caracterización del efluente secundario para ensayos de adsorción y UF**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b>Valor</b>
DQO (ppm)	31,0
pH	7,68
Conductividad ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2,17
Turbidez (NTU)	0,038
Proteínas (ppm)	10,060
Carbohidratos (ppm)	2,560

Cabe destacar que, para los ensayos de NF, se parte de un agua de efluente secundario de la misma EDAR, aunque debido a algún cambio en las características del agua de entrada, los parámetros del agua inicial variaron ligeramente (Tabla 10):

**Tabla 10. Caracterización del efluente secundario para ensayos de NF**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b>Valor</b>
DQO (ppm)	30,4
pH	7,18
Conductividad ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	1,55
Turbidez (NTU)	0,038
Proteínas (ppm)	14,560
Carbohidratos (ppm)	6,495

Si se comparan la Tabla 9 y Tabla 10, los valores son muy similares en la DQO, pH o turbidez. Sin embargo, en cuestión de conductividad, el agua de trabajo para los ensayos de NF (Tabla 10) es cerca de un 25% menor, un factor a tener en cuenta en este ensayo.

## 9.2. Ensayos de adsorción con carbón activo

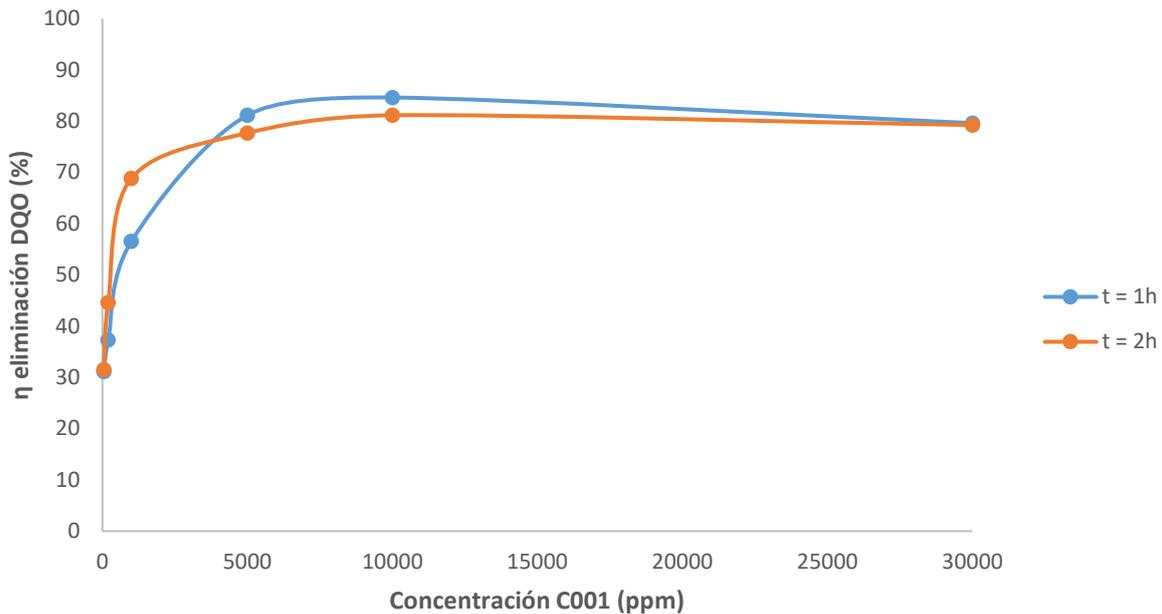
El objetivo fundamental de estos ensayos era evaluar la efectividad del carbón activo en la eliminación de materia orgánica, medida como DQO, así como en la eliminación de proteínas y carbohidratos, de forma que sirviera de pretratamiento al proceso de NF. Para ello, partiendo de la muestra de agua (caracterizada en la Tabla 9), se evaluaron los mismos parámetros tras una y dos horas de contacto con el carbón en el ensayo de adsorción. Los resultados se recogen en la Tabla 11, Tabla 12 y Figura 21 para el carbón C001; y Tabla 13, Tabla 14 y Figura 24 para el carbón C002.

**Tabla 11. Caracterización del agua tras ensayo adsorción al cabo de una hora (GAC C001)**

<b>Carbón activo C001 t=1h</b>						
	<b>50ppm</b>	<b>200ppm</b>	<b>1000ppm</b>	<b>5000ppm</b>	<b>10000ppm</b>	<b>30000ppm</b>
DQO (ppm)	17,9	16,3	11,3	4,9	<4	5,3
pH	8,15	8,23	8,32	8,56	8,87	8,72
Conductividad (mS·cm <sup>-1</sup> )	2,060	2,000	2,000	2,000	1,948	1,568
Turbidez (NTU)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Proteínas (ppm)	-	-	3,030	1,610	1,340	1,190
Carbohidratos (ppm)	-	-	3,010	2,510	2,100	1,450

**Tabla 12. Caracterización del agua tras un ensayo adsorción al cabo de 2 horas (GAC C001)**

<b>Carbón activo C001 t=2 h</b>						
	<b>50 ppm</b>	<b>200 ppm</b>	<b>1000 ppm</b>	<b>5000 ppm</b>	<b>10000 ppm</b>	<b>30000 ppm</b>
DQO (ppm)	17,8	14,4	8,1	5,8	4,9	5,4
pH	8,26	8,3	8,33	8,51	8,73	8,96
Conductividad (mS·cm <sup>-1</sup> )	2,010	2,060	2,020	2,040	1,996	1,594
Turbidez (NTU)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Proteínas (ppm)	-	-	1,500	1,430	1,430	1,170
Carbohidratos (ppm)	-	-	3,140	2,540	1,780	1,000



**Figura 21. Rendimiento de eliminación de la DQO con la concentración de C001 para t=1 h y t= 2 h**

Para el caso del carbón C001, se aprecia claramente el efecto de la concentración de carbón activo sobre el rendimiento de eliminación de la DQO tal y como se ve en la Figura 21. Así, se observa que la concentración de la DQO va disminuyendo hasta alcanzar un valor de 5 ppm para 5000 ppm de carbón. El incremento de las concentraciones por encima de 5000 ppm de carbón no mejoró el resultado. Esto supone un rendimiento aproximado de eliminación de la DQO del 80%. Por otro lado, se puede decir que, en general, el tiempo de ensayo no resultó ser un parámetro influyente.

En cuanto a las proteínas (Figura 22) y carbohidratos (Figura 23) se aprecia también una reducción considerable, alcanzando rendimientos de eliminación de proteínas del 90% con 5000 ppm de carbón activo, independientemente del tiempo de contacto. Para el caso de los carbohidratos, hizo falta una concentración de 30000 ppm de carbón activo y mayor tiempo de contacto (2h) para reducir hasta 1 ppm la concentración de carbohidratos presente, lo que supone una reducción de un 61%. Sin embargo, es innecesario llegar a tales concentraciones, pues 3 ppm es ya un valor bajo.

De forma general se aprecia que el resto de los parámetros apenas se vieron influenciados por el uso del carbón activo. El más destacable es la reducción de conductividad, un descenso tan sólo apreciable al alcanzar 30000 ppm de carbón activo, donde se alcanza una reducción del 26,5%, aunque trabajando con concentraciones óptimas, se reduce tan sólo un 6% con 5000 ppm.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

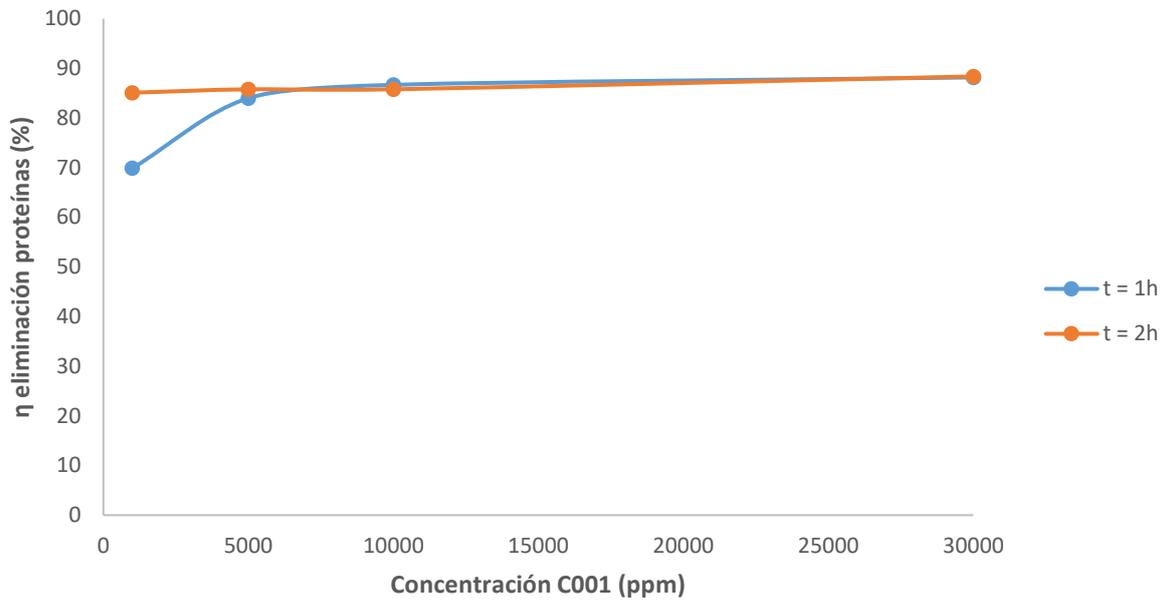


Figura 22. Rendimiento de eliminación de proteínas con la concentración de C001 para t=1h y t=2h

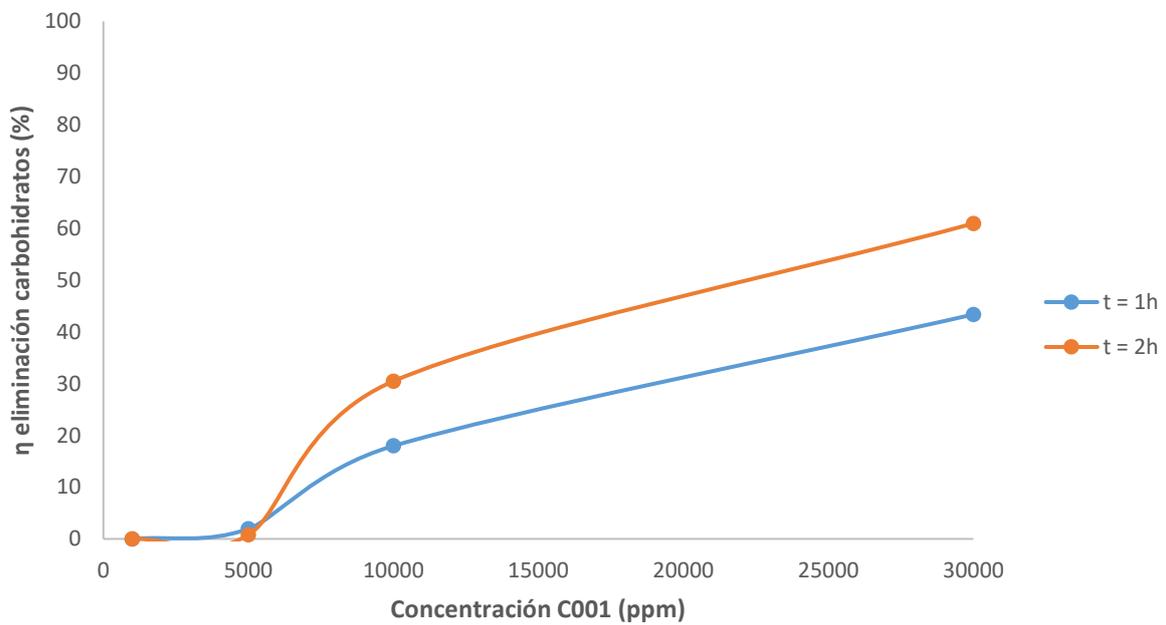


Figura 23. Rendimiento de eliminación de carbohidratos con la concentración de C001 para t=1h y t=2h

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

**Tabla 13. Caracterización del agua tras ensayo Jar-Test al cabo de una hora (GAC C002)**

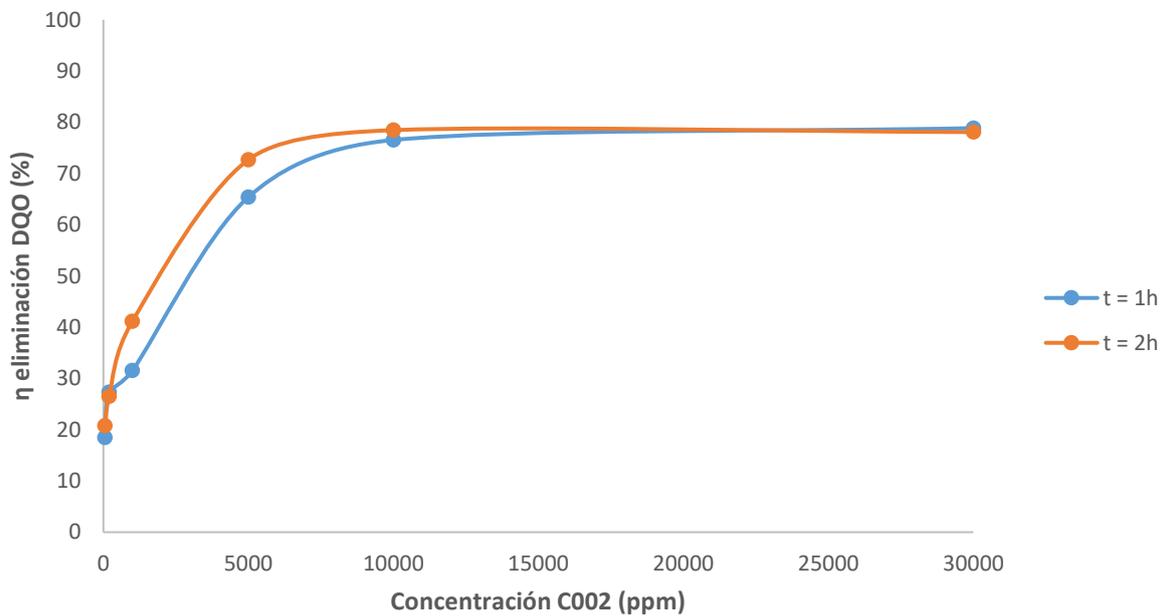
<b>Carbón activo C002 t=1 h</b>						
	<b>50 ppm</b>	<b>200 ppm</b>	<b>1000 ppm</b>	<b>5000 ppm</b>	<b>10000 ppm</b>	<b>30000 ppm</b>
DQO (ppm)	21,2	18,9	17,8	9	6,1	5,5
pH	8,12	8,2	8,13	8,21	8,25	8,36
Conductividad (mS·cm <sup>-1</sup> )	2,08	1,98	2,02	2,06	2,01	1,96
Turbidez (NTU)	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039
Proteínas (ppm)	-	-	6,870	3,320	1,440	1,890
Carbohidratos (ppm)	-	-	2,930	3,020	2,070	1,710

**Tabla 14. Caracterización del agua tras un ensayo Jar-Test al cabo de 2 horas (GAC C002)**

<b>Carbón activo C002 t=2h</b>						
	<b>50 ppm</b>	<b>200 ppm</b>	<b>1000 ppm</b>	<b>5000 ppm</b>	<b>10000 ppm</b>	<b>30000 ppm</b>
DQO (ppm)	20,6	19,1	15,3	7,1	5,6	5,7
pH	8,13	8,25	8,25	8,33	8,35	8,37
Conductividad (mS·cm <sup>-1</sup> )	2	2,01	2,03	2	2,01	1,98
Turbidez (NTU)	0,039	0,029	0,029	0,039	0,039	0,029
Proteínas (ppm)	-	-	5,900	1,890	1,260	1,050
Carbohidratos (ppm)	-	-	3,530	2,060	2,430	1,140

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



**Figura 24. Rendimiento de eliminación de la DQO con la concentración de C002 para t=1 h y t= 2 h**

Similar a como pasaba con el C001, el C002 también reduce muy eficazmente la DQO, pero con dos diferencias significativas. Así, para alcanzar el 80% de eliminación para la DQO se requirió mayor concentración de carbón (10000 ppm). Respecto al tiempo de contacto, no se observaron diferencias significativas. Estos resultados muestran que dicho carbón es menos efectivo pues sería necesario gastar aproximadamente el doble de carbón para obtener el mismo rendimiento que con C001.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

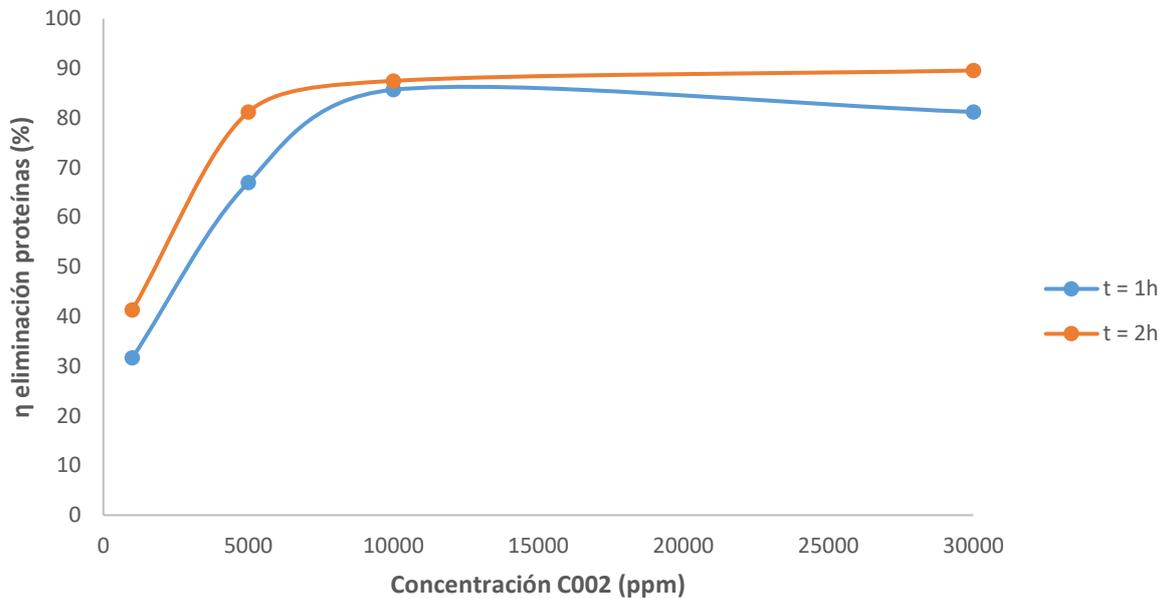


Figura 25. Rendimiento de eliminación de proteínas con la concentración de C002 para t=1h y t=2h

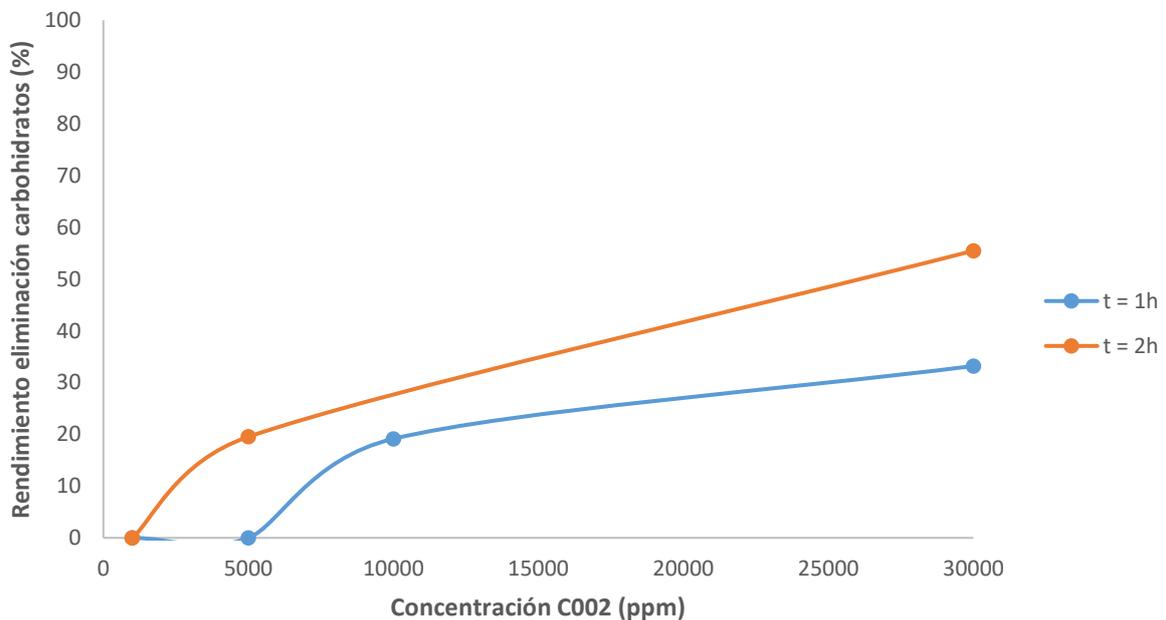


Figura 26. Rendimiento de eliminación de carbohidratos con la concentración de C002 para t=1h y t=2h

Para el caso de las proteínas (Figura 25) y carbohidratos (Figura 26), el carbón C002 también presenta una eficacia algo más baja, ya que el 90% de eliminación se conseguía a las 10000 ppm de carbón en el caso de las proteínas. Para los carbohidratos, el máximo rendimiento de eliminación, un 55%, se alcanza con 30000 ppm y a las 2 horas.

Tampoco se aprecia la influencia del carbón activo en el resto de los parámetros, incluso en la conductividad, donde empleando 30000 ppm de carbón C002 y 2 horas de ensayo, apenas varió dicho parámetro.

De forma general, en ambas experiencias se ha observado que los rendimientos de adsorción de proteínas son superiores que los de carbohidratos. El tamaño medio de las proteínas puede ser muy variable (20-20000 kDa), aunque suelen oscilar en los efluentes de aguas residuales en torno a 150 kDa (Westgate, 2009 [46]) En el caso de los carbohidratos, donde la unidad base es la glucosa (180 Da), se pueden encontrar polisacáridos muy grandes como el glucógeno (unos 11000 kDa). Es decir, las proteínas, de media, suelen ser más grandes que los carbohidratos por lo que teóricamente la adsorción en los poros del carbón activo debería ser mayor a menor tamaño de molécula. Sin embargo, dado que la concentración de proteínas es cuatro veces superior a la de los carbohidratos, podría entenderse que es más probable que se adsorban éstas, obteniéndose mayores rendimientos. Otra razón atribuible a la variabilidad ente adsorción de proteínas y carbohidratos es la técnica analítica empleada. Esto se debe a que el análisis de proteínas, que se realiza mediante el método de micro BCA, es capaz de detectar concentraciones de proteínas muy bajas; mientras que el de detección de carbohidratos no y, por tanto, la variabilidad e imprecisión en la concentración de los mismos es mayor al trabajar con concentraciones tan bajas, como es el caso.

De esta experiencia puede recogerse que el uso de carbón activo en un proceso de reutilización del agua residual es muy efectivo, siempre que lo que se busque sea reducir la cantidad de elementos orgánicos como proteínas o carbohidratos y la DQO. Además, de los dos carbones ensayados, se aprecia claramente que el mejor es el C001, ya que requiere concentraciones menores para alcanzar el mismo grado de eliminación.

Sin embargo, pese a la eficiencia de este carbón activo en términos de eliminación de DQO, proteínas y carbohidratos, el coste del proceso sería inviable. La razón es que se necesitan 5000 ppm ( $5 \text{ gr}\cdot\text{L}^{-1}$ ) para alcanzar los rendimientos máximos de eliminación. Si se considera el volumen de agua a tratar ( $2560 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ), se obtiene una necesidad ingente de carbón activo ( $12800 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ), lo que hace inviable introducir una etapa de adsorción con carbón en la instalación.

### 9.3. Ensayos de ultrafiltración

En este apartado se recogen los resultados obtenidos en los ensayos de UF. Se incluye la evolución de la densidad de flujo de permeado, con el fin de observar si hay ensuciamiento de la membrana y la caracterización del permeado obtenido.

A continuación, en la Figura 27 y Figura 28, se muestra la evolución de la densidad de flujo de membrana para las membranas de 5 kDa y 100 kDa, respectivamente (Figura 28).

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

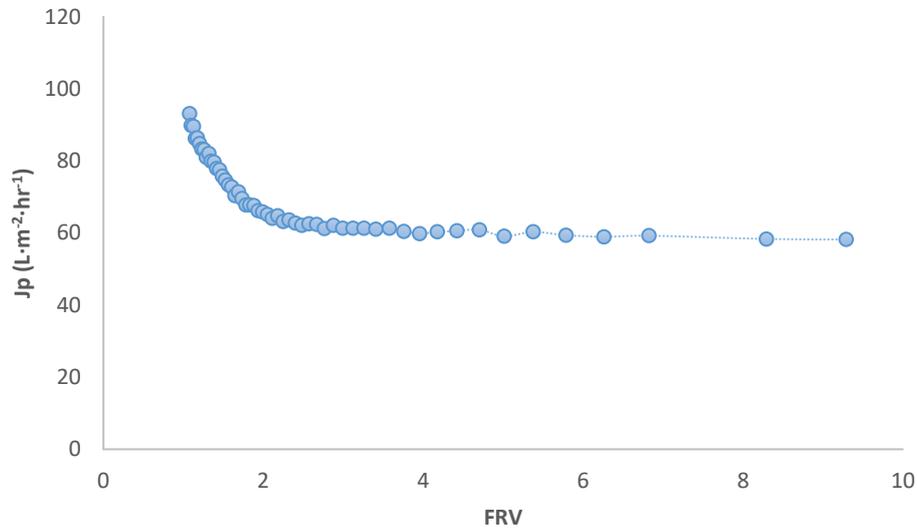


Figura 27. Evolución de la densidad de flujo de permeado para la membrana 5 kDa UF (3,7 bar y 200 rpm)

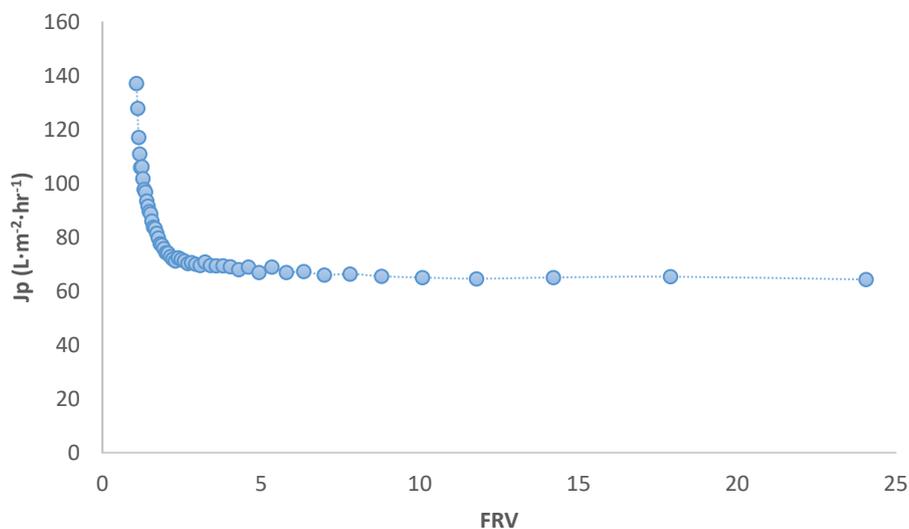


Figura 28. Evolución de la densidad de flujo de permeado para la membrana 100 kDa UF (3,7 bar y 200 rpm)

Como era de esperar, en ambos casos (Figura 27 y Figura 28) se produce una caída de la densidad de flujo de permeado, la cual se debe principalmente al incremento de FRV, el cual iba aumentando en función del tiempo. Al trabajar en modo concentración, la materia orgánica y otras sustancias solubles se van concentrando con el tiempo. Esta acumulación provoca que poco a poco se vaya ensuciando la membrana al ir taponando los poros de la misma, lo que disminuye la cantidad de fluido que puede pasar a través de la misma. Sin embargo, cabe comentar que tras una disminución más acusada al

principio (primeros 10 minutos) progresivamente se estabiliza la densidad de flujo de permeado hasta llegar a un valor estacionario al cabo de una hora obteniéndose una densidad de flujo de permeado alrededor de  $60 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}$  para ambas membranas. Es importante destacar que esta caída inicial no es tan acusada como cabría esperar de un ensayo que trabaja a concentración variable [47][29]. Esto puede ser atribuido a la reducida carga tanto orgánica como de sólidos en el agua ensayada para los FRV alcanzados. Al y, por tanto, también lo es el ensuciamiento de la membrana, incluso al alcanzar un valor de FRV de 9,3 para la membrana de 5 kDa y de casi 25 para la de 100 kDa, como es el caso. La similitud en los valores de la densidad de flujo de permeado obtenido con ambas membranas, a pesar de la diferencia de tamaño de poro, puede ser atribuido a que la membrana de mayor tamaño, tiene más tendencia a un ensuciamiento interno por bloqueo de poro (debido a que los coloides o solutos presentes en el agua tuvieran un tamaño similar al del poro) en comparación con la de menor tamaño (5 kDa), permitiendo que una mayor cantidad de fluido pase a través de la misma y, por tanto, se alcance un mayor valor de  $J_p$ . Los autores Fababuj et al. [29], en su trabajo realizado con dos membranas de UF de diferente cut-off, obtuvieron resultados similares con respecto a la tendencia del  $J_p$ , donde una membrana de 30 kDa resultó tener valores de densidad de flujo de permeado mayores que una de 100 kDa al alcanzar el estacionario.

Los resultados han mostrado una reducción de la densidad de flujo de permeado cercana al 36% en el caso de la membrana de 5 kDa (tomando como medida inicial el punto máximo y la final, el estacionario), y del 53% en el caso de la membrana de 100 kDa.

Por otro lado, se recogen a continuación los resultados de la caracterización de los permeados obtenidos tras los ensayos de UF. En concreto, en la Tabla 15 y Tabla 16, para las membranas de 100 kDa y 5 kDa, respectivamente.

**Tabla 15. Caracterización del permeado para la membrana de 100 kDa**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b>Valor</b>
DQO (ppm)	17,4
pH	8,1
Conductividad ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2,070
Turbidez (NTU)	0,028
Proteínas (ppm)	8,04
Carbohidratos (ppm)	2,10

**Tabla 16. Caracterización del permeado para la membrana orgánica de 5 kDa**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b>Valor</b>
DQO (ppm)	19,3
pH	8,01
Conductividad ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	2,140
Turbidez (NTU)	0,028
Proteínas (ppm)	8,52
Carbohidratos (ppm)	2,88

Como puede apreciarse, respecto al agua de efluente secundario inicial (Tabla 9) se consiguió una disminución de la DQO del 44% con la membrana de 100 kDa y del 38% para el caso de la de 5 kDa. Ambas reducciones son considerables teniendo en cuenta el valor de la DQO de partida (31 ppm) y el FRV alcanzado.

Respecto al contenido de proteínas, se observa una reducción muy similar en ambas membranas, con valores de proteínas en el permeado muy similares, en torno a 8-8,5 ppm. Esto supone una reducción aproximada del 15% en el contenido de proteínas en ambos casos. En relación con los carbohidratos, el valor de carbohidratos no varió con respecto al agua de partida.

Por ende, si bien el proceso de UF mejora en cierta medida las características del agua tratada, el descenso de la densidad de flujo se puede considerar bajo pese a los altos FRV alcanzados (9,3 y 25 para las membranas de 5 kDa y 100 kDa, respectivamente), lo que implica que no se produce un ensuciamiento severo de la membrana, haciendo viable la aplicación directa de un proceso de NF, y evitando así los costes asociados a la construcción y operación de una etapa de UF.

Dado que el proceso de UF mejoró las características del agua tratada, y dado que el descenso de la densidad de flujo de permeado fue relativamente bajo para los de FRV alcanzados, se decidió tratar el agua directamente con un proceso de NF.

#### 9.4. Ensayo de nanofiltración

El ensayo de nanofiltración se propone con el objetivo de obtener un agua de mejor calidad y observar el ensuciamiento de esta membrana. A continuación, las Figura 29, Figura 30 y Figura 31 muestran los gráficos resultantes de los ensayos de nanofiltración.

La Figura 29 muestra el valor de la permeabilidad hidráulica inicial de la membrana NF270,  $12,799 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ , y una réplica de la misma a modo de comprobación, con un valor de  $13,25 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ , lo que hace un valor medio de  $13,025 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ , típico de las membranas de NF. Además, como se

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

puede observar, el ajuste lineal para las tres presiones ensayadas fue elevado obteniendo un coeficiente de regresión lineal cercano al 100% en ambos casos.

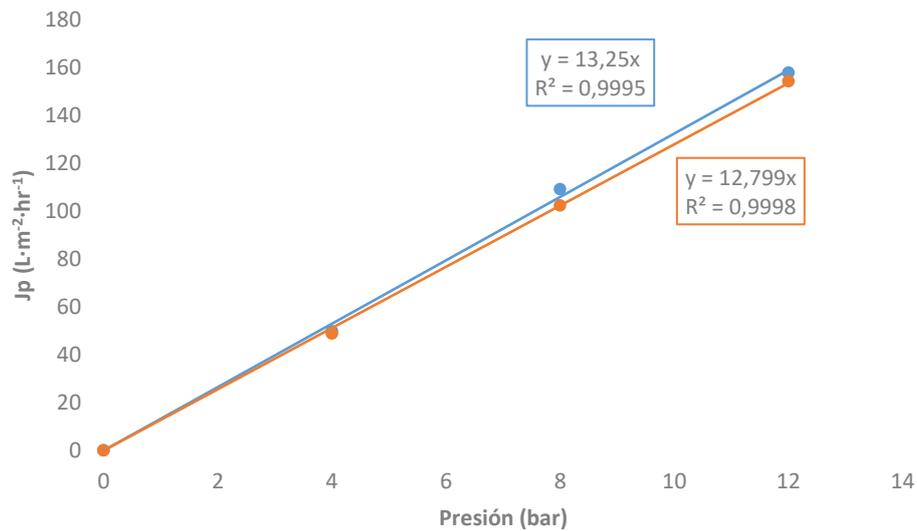


Figura 29. Permeabilidad hidráulica inicial de la membrana NF270 por duplicado.

Seguidamente, en la Figura 30 se observa la variación de la densidad de flujo de permeado con el FRV, empleando como corriente alimento efluente secundario. En dicha gráfica puede observarse un ligero descenso de la densidad de flujo de permeado provocado por el incremento en la concentración del alimento, siendo el último valor del FRV de 6,6 (siguiendo Eq. 4). Sin embargo, pese al elevado valor del FRV alcanzado, la densidad de flujo de permeado se redujo sólo un 10,5%, y alcanzó un valor final en torno a los  $85 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

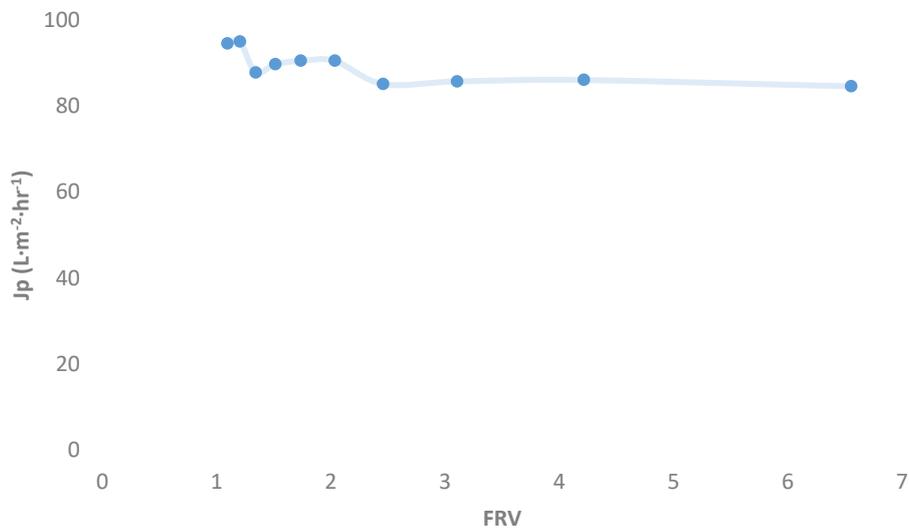


Figura 30. Variación de  $J_p$  con FRV para NF270 (8 bar y  $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ).

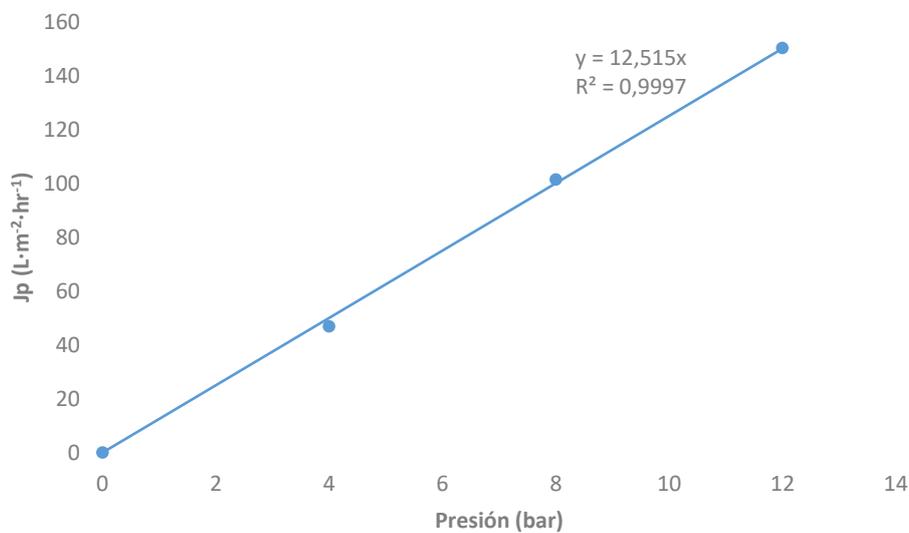


Figura 31. Permeabilidad hidráulica final de la membrana NF270

Tras el ensayo con el agua residual, se le realizó a la membrana un aclarado con agua osmotizada y se repitió de nuevo el ensayo de permeabilidad al agua (Apdo. 8.3.c), tal como se muestra en la Figura 31. El nuevo valor de la permeabilidad de la membrana fue  $12,515 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1}$ , un valor ligeramente inferior a la inicial. Esta reducción de la permeabilidad es de apenas un 3,9%, pese a trabajar con un FRV elevado, lo cual indicó que el ensuciamiento fue reducido y además de tipo reversible.

A continuación, en la Tabla 17 se muestran los resultados de la caracterización del permeado obtenido.

**Tabla 17. Caracterización del permeado de la membrana NF270**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b>Valor</b>
DQO (ppm)	4,7
pH	7,5
Conductividad ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	1,161
Turbidez (NTU)	0,076
Proteínas (ppm)	1,920
Carbohidratos (ppm)	3,860

Si se compara la caracterización de la corriente de permeado con respecto a los valores obtenidos en la caracterización del agua inicial del efluente secundario de la EDAR (Tabla 10), se observa una notable mejora en la calidad del agua. Por un lado, la DQO del agua disminuyó en un 75,3%, un valor ligeramente inferior al rendimiento de eliminación que se conseguía en el proceso de adsorción (80%), y un valor superior al conseguido con la UF (38-44%). De igual forma pasa con las proteínas y carbohidratos, donde los rendimientos de eliminación conseguidos fueron del 86,8% y 40,6%, respectivamente.

Los rendimientos de eliminación para cada uno de los parámetros analizados después de cada tratamiento se recogen a modo de resumen en la Tabla 18:

**Tabla 18. Tabla resumen de rendimientos de eliminación de las diferentes técnicas ensayadas**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b><math>\eta_{\text{eliminación}} (\%)</math></b>		
	<b>ADSORCIÓN (C001, 5000 ppm)</b>	<b>UF</b>	<b>NF</b>
DQO (ppm)	80,0	44,0 (100 kDa) 38,0 (5 kDa)	75,3
Proteínas (ppm)	90,0	20,0 (100 kDa) 15,3 (5 kDa)	86,7
Carbohidratos (ppm)	0,78	18,0 (100 kDa) Nulo (5 kDa)	40,6
Conductividad ( $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	6	4,6 (100 kDa) 1,4 (5 kDa)	25,0

Tal y como se puede observar, tanto la adsorción como la NF son los tratamientos más eficaces. Sin embargo, queda descartada la adsorción por las necesidades de carbón activo para alcanzar dichos rendimientos.

A la luz de estos resultados se confirma la gran aplicabilidad del proceso de nanofiltración como método para el tratamiento de efluentes secundarios procedentes de EDARUs con fines de reutilización. Además, la propia técnica es capaz por si sola de mejorar mucho la calidad del agua, sin necesidad de ninguno de los pretratamientos estudiados en este trabajo.

Además, en vista de los parámetros del permeado obtenido tras el proceso de NF (Tabla 17) se pueden identificar aquellos sectores industriales en los que podría reaprovecharse esta corriente, tal como se muestra en la Tabla 3. Puede observarse que el agua producto obtenida cumple con los requisitos para su reutilización en la industria cerámica, torres de refrigeración y sistemas de calderas, donde los valores de DQO, conductividad y pH se ajustan a los mínimos exigidos. Sin embargo, hay otros sectores (curtidos y textil) donde no se puede emplear para reutilización ya que la conductividad no alcanza los criterios establecidos, a pesar de que la DQO y el pH cumplen (Tabla 3).

Así mismo el agua de permeado obtenida podría también utilizarse para riego agrícola, pues cumple con los criterios de reutilización según el Reglamento Europeo 2020/741 (E. Coli, DBO<sub>5</sub>, SS totales y turbidez). Respecto la legislación estatal (RD 1620/2007), el permeado cumple con todos los parámetros establecidos (sólidos en suspensión, patógenos, turbidez, conductividad) a falta del parámetro RAS (Relación de Adsorción de Sodio) dado que no se analizaron los iones sodio, calcio y magnesio. Sin embargo, teniendo en cuenta el bajo valor de conductividad probablemente cumpliría también este parámetro.

## 9.5. Conclusiones de la parte experimental

- La caracterización del agua residual (efluente secundario) mostró una calidad elevada pero que debería ser mejorada para su reutilización en algunos procesos industriales según la bibliografía y legislación consultada.
- Los ensayos de adsorción realizados con dos tipos de carbón activo granular (C001 y C002) mejoraron las características del agua tratada, pero a costa de emplear elevadas concentraciones de carbón activo, lo que supone elevados costes que son inviables económicamente. No se encontraron diferencias significativas entre los dos tipos de carbón activo ensayados siendo ligeramente mejor el C001, cuyo rendimiento de eliminación fue cercano al 80% para la DQO empleando una concentración de 5000 ppm y tanto para  $t=1\text{h}$  como  $t=2\text{h}$  de ensayo.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

- Los ensayos de UF permitieron mejorar la calidad del agua en todos los parámetros analizados excepto en la conductividad, como cabía esperar. La variación de la densidad de flujo de permeado de las membranas fue similar a pesar de los diferentes FRV alcanzados. Para los máximos FRVs ensayados, de 25 y 9,3 para las membranas de 100 y 5 kDa, se alcanzaron valores de  $60 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  y  $65 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , respectivamente.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de adsorción y UF mostraron que el agua residual puede ser directamente tratada con membranas de NF.
- Mediante los ensayos de NF se consiguió mejorar las características del agua tratada, incluida la conductividad. Para un FRV de 6,6 la conductividad media del permeado conseguida fue de  $1161 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y, en el caso de la DQO de 4,7 ppm. Además, cabe comentar que, pese a alcanzar un FRV de 6,6 la disminución de la densidad de flujo de permeado fue de sólo un 10,5%, confirmándose la presencia de un ensuciamiento leve de la membrana y, de tipo reversible, tal y como muestran los resultados obtenidos.
- Las características del permeado de la NF obtenidas permiten que dicha corriente pueda ser reutilizada en procesos industriales tales como la industria cerámica, en torres de refrigeración y en calderas, además de poder utilizarse para riego agrícola

## 10. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE MEMBRANAS

En lo referente al diseño de la instalación, se plantea un sistema de NF a nivel industrial. Para ello, se dimensiona en el presente apartado la planta de NF y el resto de los elementos que integra la instalación en su conjunto, tales como los tanques de almacenamiento y mezcla, depósitos, etc. Para la determinación del número de membranas y etapas en el proceso de NF se ha tomado como referencia el resultado obtenido por el software WAVE de la casa Dupont. En la Figura 32 se muestra el diagrama de bloques de la instalación diseñada.



Figura 32. Esquema planta NF diseñada

### 10.1. Diseño de la etapa de NF

Los parámetros de diseño de la instalación son el caudal de permeado a producir de  $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  y una conversión del 75%.

A partir de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos experimentales (CA, UF y NF), se ha podido comprobar que el proceso de NF es viable a la hora de obtener una corriente de permeado con una calidad más que suficiente para su reutilización en diferentes sectores. El escalado industrial, supone ciertos cambios necesarios, como el uso de una membrana de mayor tamaño por la diferencia de caudal a tratar, así como una serie de ajustes como la densidad de flujo de permeado de diseño, que dependerá de la nueva membrana, o el tipo de configuración y número de membrana.

Para el escalado industrial se plantea el uso de una membrana de mayor superficie de membrana a la empleada a nivel de laboratorio, con  $37 \text{ m}^2$  de superficie activa de membrana y una densidad de flujo de diseño de  $20 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hr}^{-1}$  tal y como se indica en la ficha técnica [48]. Algunas de las características de esta membrana se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19. Parámetros de la membrana NF270-400/34i**

<b>Parámetro (uds)</b>	<b>Valor</b>
Área ( $\text{m}^2$ )	37
Diámetro (in.)	8
Tª máxima de operación ( $^{\circ}\text{C}$ )	45
Máxima presión de operación (bar)	41
Rango de pH	1-12
Tolerancia al cloro (ppm)	< 0,1

A nivel teórico puede estimarse el número de membranas que se van a necesitar, el número de tubos de presión y el número de membranas por tubo. Para ello, ha de escogerse una densidad de flujo de diseño que sea compatible con la “Guía de diseño” con los que se rige la casa comercial DOW-Filmtec y la conversión de cada elemento de membrana.

Conocido el caudal de diseño, en este caso el caudal producto o permeado ( $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  ó  $80000 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ ) y la densidad de flujo de permeado de diseño extraído de los valores que se proporcionan en la “Guía de diseño” para elementos de 8 pulgadas (de diámetro) [49], se determina el número de membranas necesario aproximado, ya que no se está teniendo ni la conversión por elemento, ni la configuración piramidal, obteniéndose un área total:

$$A_{\text{total}} = \frac{80000 \frac{\text{L}}{\text{h}}}{20 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}} = 4000 \text{ m}^2$$

Y donde cada elemento de membrana individual tiene un área de  $37 \text{ m}^2$ , haciendo un total de membranas:

$$n^{\circ}_{\text{membranas}} = \frac{4000 \text{ m}^2}{37 \text{ m}^2} = 108,11 \rightarrow 109 \text{ membranas}$$

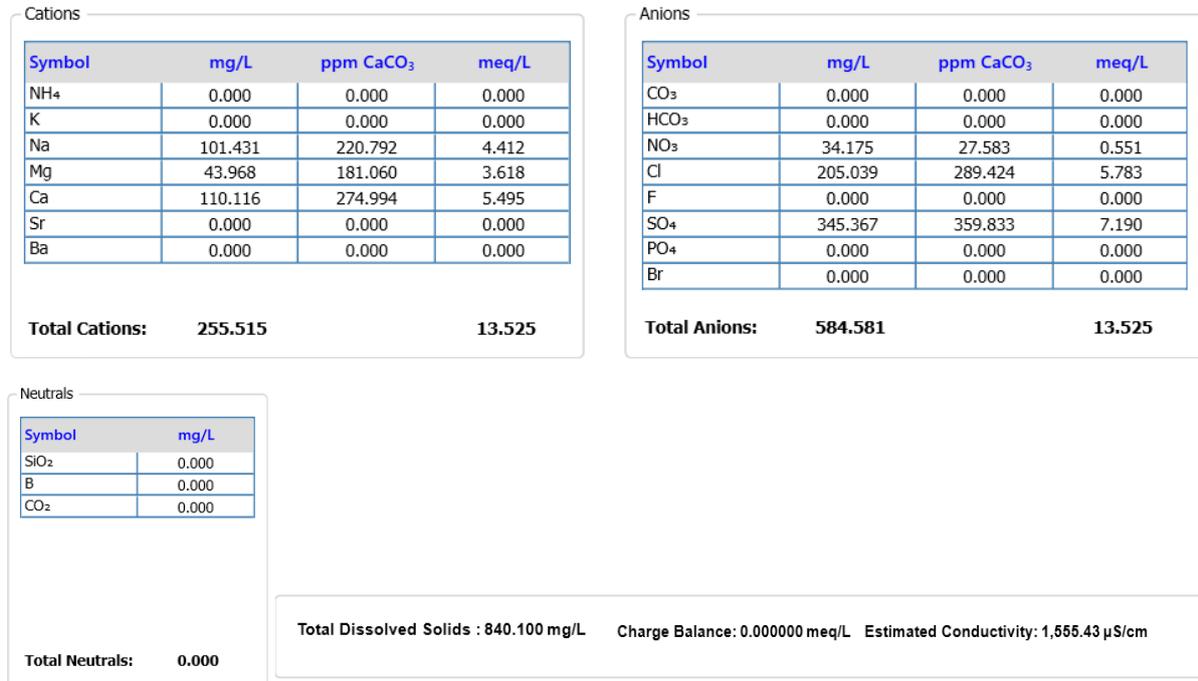
Por tanto, si se requieren un total de 109 membranas, y se diseña en base a una agrupación de 8 membranas por tubo de presión, se obtendrían:

$$N^{\circ} \text{ tubos de presión} = \frac{109}{8} = 13,625 \rightarrow 14 \text{ tubos de presión}$$

Este resultado se compara con el obtenido con el “software” de diseño empleado WAVE (Water Application Value Engine) de la empresa DuPont, de libre acceso. Para realizar la simulación se debe tener en cuenta la cantidad de agua producto que se quiere obtener (caudal de permeado), el porcentaje de recuperación o conversión de la instalación, porcentaje de recuperación por elemento de membrana, características físico-químicas del agua a tratar (conductividad, pH, turbidez, etc.).

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

En el caso concreto de la conductividad, ésta se ajustó con la concentración de los iones más típicos de un agua residual urbana ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ) hasta conseguir un balance de cargas neutro tal y como se muestra a continuación en la Figura 33:



**Figura 33. Resumen del contenido iónico del agua de alimento en WAVE**

Durante la simulación en WAVE, es probable que salgan alertas o “warnings” donde se indica que, en base a las referencias de las que dispone WAVE, hay ciertos parámetros que exceden o no alcanzan los valores esperados. Por ello, el presente diseño se realizó teniendo en cuenta los valores límite de diseño del proveedor de membranas; es decir, en minimizar o eliminar la aparición de estas alertas, hasta alcanzar un diseño donde no hubiera ninguna. Una vez conseguido esto, se asumió como válido el diseño de la aplicación WAVE dado que cumplía con los estándares del fabricante de las membranas empleadas en el diseño. A continuación, en la Tabla 20, se recoge el resumen del diseño realizado con el programa WAVE donde se indican los aspectos más importantes, pudiéndose encontrar el informe que genera el programa en el ANEXO.

**Tabla 20. Resultados de la simulación en WAVE. Membrana NF270-400/34i**

<b>Etapas</b>	<b>Nº de tupos de presión</b>	<b>Nº módulos de membranas por tubo de presión</b>	<b>Nº total de membranas</b>	<b><math>Q_{\text{alimento}}</math> (<math>\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>	<b><math>Q_{\text{permeado}}</math> (<math>\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>	<b><math>Q_{\text{concentrado}}</math> (<math>\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}</math>)</b>
1	9	8	72	106,7	61,2	45,5
2	5	8	40	45,5	18,8	26,7

El programa WAVE ha utilizado una estructura piramidal, donde las etapas posteriores reducen el número de tubos de presión respecto a la anterior. La estructura se plantea en un sistema de 2 etapas, con una configuración 9:5 de tubos de presión, con 8 módulos de membrana en cada tubo, lo que hace un total de 112 membranas NF270-400/34i, un valor muy próximo a las 109 membranas que se estiman mediante los cálculos teóricos previos. Además, en base a los cálculos teóricos realizados, el número de tubos planteado por WAVE es mismo que el estimado de forma teórica (14 tubos). Las diferencias se deben principalmente a la conversión por elemento fijada por el fabricante, la cual depende de la calidad del agua a tratar y de la conversión total de la instalación de NF. Esta conversión afecta al caudal máximo de alimento para cada elemento de membrana, y así evitar trabajar con conversiones muy elevadas que puedan provocar la precipitación de sales sobre la membrana o conversiones muy bajas que impida obtener la conversión global de la etapa de NF.

El programa WAVE funciona en base a unos criterios de diseño en donde los flujos tanto de permeado como de concentrado deben estar dentro de un rango (en función de la membrana seleccionada). En base a esto, el programa requiere modificaciones en el número de tubos de presión y de elementos de membranas que van en cada tubo. Es por esto por lo que, si se calcula el número de membranas necesarias sin tener en cuenta la conversión por elemento, los valores difieran del resultado simulado, pues la densidad de flujo que utiliza WAVE no es la misma, estableciendo una serie de limitaciones que deben satisfacerse para evitar la aparición de los “warnings”.

A la hora de realizar el diseño de la instalación, se ha intentado aunar lo que recomienda el fabricante de las membranas y el manual de uso del programa informático WAVE para sistemas de nanofiltración (equivalente a sistemas de ósmosis inversa en el WAVE) [50], así como la información que se tenía acerca del agua a tratar y de los sistemas de membrana por nanofiltración.

## 10.2. Diseño de los tanques de mezcla y depósitos

El dimensionamiento de los tanques se realiza calculando el volumen requerido para almacenar el fluido de las diferentes corrientes que participan en el proceso, manteniendo siempre un margen de seguridad. Los elementos se referencian atendiendo al PLANO 1. Diagrama de flujo del proceso.

- Tanque de recepción (TM1)

Este depósito se diseña a partir del caudal de agua residual a tratar,  $Q_{\text{alimento}}$ , y suponiendo un tiempo de retención de 1 hora dado que el sistema está siempre regulado por sensores de nivel donde hay agua de la depuradora entrando constantemente, además de considerar un factor de seguridad del 20%.

Primero, en base al % de recuperación de la instalación deseado (75%) y del caudal de permeado de diseño ( $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  ó  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), se calcula  $Q_{\text{alimento}}$ :

$$Q_{\text{alimento}} = \frac{Q_{\text{permeado}}}{Y} = \frac{80}{0,75} = 106,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Con este valor, ya se puede calcular el volumen necesario del tanque:

$$V_{\text{tanque}_{\text{recepción}}} = 106,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1 \text{ h} \cdot 1,2 = 128 \text{ m}^3$$

- Depósito de permeado (D1)

El volumen del tanque de permeado se calcula en base al caudal de permeado de diseño,  $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , y un tiempo de residencia de 1 h, dado que el permeado estará en constante distribución hacia el polígono industrial que reutilice el agua, así como un factor de seguridad del 20%:

$$V_{\text{depósito}_{\text{permeado}}} = 80 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1 \text{ h} \cdot 1,2 = 96 \text{ m}^3$$

- Depósito de concentrado (D2)

Respecto al concentrado o rechazo, de un balance simple de materia al sistema de NF se establece que:

$$Q_{\text{concentrado}} = Q_{\text{alimento}} - Q_{\text{permeado}} = 26,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Aplicando un factor de seguridad del 20% y un tiempo de residencia igual 1 hora se obtiene el volumen del tanque de concentrado:

$$V_{\text{tanque}_{\text{concentrado}}} = 26,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1 \text{ h} \cdot 1,2 = 32 \text{ m}^3$$

- Tanque de mezcla para la disolución de limpieza (TM2)

Para la limpieza de membranas se recurre a la guía de Du Pont de limpieza de elementos de 8 pulgadas [51], como es la membrana seleccionada. En esta guía se indica una forma de calcular las necesidades de volumen de disolución de limpieza en base al número de tubos a presión, o *Pressure Vessel* (PV) como se indica en el software WAVE, y a partir del cual se calcula el volumen que tendría el tanque de mezcla de dichas disoluciones. El dimensionamiento radica en calcular el volumen de solución

limpiante necesario para empapar todos los PV. Para ello, se calcula el volumen de cada PV y se multiplica por su número.

Primero se calcula el volumen de un PV ( $V_{1PV}$ ) siguiendo la siguiente Eq. 6 sobre el volumen de un elemento cilíndrico:

$$V_{1PV} = \pi \cdot r^2 \cdot l \quad \text{Eq. 6}$$

Donde  $r$  es el radio y  $l$  es la longitud del PV:

Para elementos de 8 in. (0,203 m.), como es la membrana empleada, su diámetro es el mismo que el del PV. La longitud se calcula de forma proporcional a la guía de diseño, donde para 6 elementos por PV se establece en 20 ft., por tanto, para 8 elementos por PV (el presente diseño) será de 26,7 ft. (0,678 m.):

$$V_{1PV} = \pi \cdot \left(\frac{0,203}{2}\right)^2 \cdot 0,678 = 0,0219 \text{ m}^3 = 21,94 \text{ L}$$

Al tener 14 PV en el presente diseño, resulta en un volumen de:

$$V_{14PV} = 14 \cdot 21,94 = 307,16 \text{ L}$$

Ahora hay que tener en cuenta el volumen de la disolución de limpieza que ocuparía las tuberías que van desde el depósito de almacenamiento hasta el sistema de membranas. Para ello se supone una longitud de tuberías total de 20 m., con un diámetro de 3,5 in. (0,089 m.) y se emplea la misma ecuación de antes para el cálculo de volumen de un elemento cilíndrico (Eq. 6):

$$V_{\text{tuberías}} = \pi \cdot \left(\frac{0,089}{2}\right)^2 \cdot 20 = 0,1244 \text{ m}^3 = 124,42 \text{ L}$$

El volumen del tanque de almacenamiento de la solución limpiante será de:

$$V_{\text{limpieza}} = V_{14PV} + V_{\text{tuberías}} = 431,58 \text{ L}$$

Si se aplica un coeficiente de seguridad de diseño del tanque del 20%, queda:

$$V_{\text{tanque}_{\text{limpieza}}} = 431,58 \text{ L} \cdot 1,2 = 517,9 \text{ L}$$

Los reactivos empleados en el proceso de limpieza son NaOH, Na<sub>4</sub>EDTA y HCl, tal como recomienda la casa comercial que suministra las membranas. Dichos reactivos serán suministrados por los proveedores en función del volumen necesario.

### 10.3. Cálculo del volumen de reactivos para la etapa de limpieza

El fabricante de las membranas DuPont recomienda: en primer lugar, una limpieza básica con una disolución a pH 12 con 0,1%NaOH y 1% Na<sub>4</sub>EDTA; a continuación, si es necesario, una limpieza ácida con HCl 0,2% a pH 1-2. Por tanto, en el caso más desfavorable, se llevarán a cabo dos limpiezas consecutivas.

- **Hidróxido de sodio (NaOH)**

Para el cálculo del volumen de NaOH, se escogerá una disolución inicial de NaOH al 50% de Panreac. Para ello se aplica una regla de dilución simple de la Eq. 7:

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad \text{Eq. 7}$$

Que sustituyendo:

$$V_2 = \frac{0,1\% \cdot 431,58 \text{ L}}{50\%} = 0,863 \text{ L}$$

Suponiendo una limpieza mensual a lo largo de un año, quedaría:

$$V_{\text{Disolución}_{\text{NaOH}}} = 0,863 \cdot 12 = 10,356 \text{ L}$$

- **Na<sub>4</sub>EDTA**

El Na<sub>4</sub>EDTA se encuentra en estado sólido. Sabiendo que se necesita una disolución 1% como indica el fabricante, se calcula la masa de Na<sub>4</sub>EDTA necesario en base a la definición de %p/v:

$$m_{\text{Na}_4\text{EDTA}} = \frac{1 \text{ gr Na}_4\text{EDTA}}{100 \text{ mL disol}} \cdot 1000 \frac{\text{mL}}{\text{L}} \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{gr}} \cdot 431,58 \text{ L} = 4,316 \text{ kg}$$

Si se escoge el proveedor Panreac que proporciona Na<sub>4</sub>EDTA al 98% de riqueza se obtiene una cantidad real necesaria de reactivo de:

$$m_{\text{Na}_4\text{EDTA}_{\text{REAL}}} = \frac{4,316}{0,98} = 4,40 \text{ kg}$$

Si además se considera que se realiza cada mes una limpieza durante los 12 meses, en un año se necesitaría:

$$m_{\text{Na}_4\text{EDTA}_{\text{TOTAL}}} = 4,40 \cdot 12 = 52,8 \text{ kg}$$

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

- **Ácido clorhídrico (HCl)**

Se necesita una disolución 0,2% de HCl, para lo que se escoge como reactivo de partida HCl en disolución al 10% de la casa Panreac. Para el cálculo del volumen se recurre a la Eq. 7:

$$V_2 = \frac{0,2\% \cdot 431,58 \text{ L}}{10\%} = 8,63 \text{ L}$$

Suponiendo una limpieza cada mes, en un año se el volumen sería:

$$V_{\text{Disolución}_{\text{HCl}}} = 8,63 \cdot 12 = 103,56 \text{ L}$$

A continuación, en la Tabla 21, se recogen los volúmenes teóricos necesarios y los volúmenes de los tanques seleccionados, así como sus dimensiones y materiales:

**Tabla 21. Volumen nominal de los tanques de almacenamiento y resumen de sus características**

Tipo de tanque	Volumen teórico (L)	Volumen real (L)	Altura (m)	Longitud (m)	Anchura (m)	Diámetro (m)	Material
Recepción	128000	150000	2,29	-	-	9,14	Acero
Permeado	96000	100000	1,52	-	-	9,14	Acero
Concentrado	32000	32000	2.6	-	-	3,95	PE
Limpieza	517,9	550	1,2	1,2	0,6	-	MDPE

Todos los tanques se han seleccionado de la empresa Tanks Direct a excepción del depósito de concentrado, que es de la empresa Bluewater Tanks. Se ha buscado que fueran estables químicamente y duraderos, además de ajustarse lo máximo posible al tamaño de tanque teórico para evitar sobredimensionamiento y que ocupara más espacio del necesario.

#### 10.4. Selección de elementos de la planta

##### - Válvulas

Para las válvulas se recurre a la casa comercial *Volt*, donde se selecciona la válvula de bola de tres vías BV5095 (Figura 34), hecha en acero inoxidable para prevenir problemas de corrosión al circular NaOH por el sistema y capaz de soportar hasta 69 bar de presión, un valor más que suficiente respecto al que se maneja en la instalación diseñada.



Figura 34. Válvula BV5095 de la casa VOLT

Se seleccionan a continuación las válvulas reguladoras, mayoritarias en la instalación, que permitan un control del caudal circulante en todo momento, para lo que se escogen las BV5089 de VOLT (Figura 35).



Figura 35. Válvula BV5089 de VOLT

Finalmente, se escoge una válvula reductora de presión como mecanismo de seguridad en caso de que la presión en el sistema excediera el límite establecido. Ésta es la PR4305 de la casa comercial VOLT (Figura 36), tarada a 16 bar y que cumple los requerimientos de caudal.



Figura 36. Válvula reductora de presión PR4305 de VOLT

- **Bombas de circulación**

Para la elección de bombas se recurre a la casa comercial *Grundfos*, que permite una búsqueda personalizada en base a los requerimientos del sistema. Así, se selecciona la bomba centrífuga SE1.80.80.15.4.50D.B especializada en sistemas de tratamiento de aguas residuales, capaz de impulsar caudales de hasta  $123 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , un valor perfecto ya que es superior al que se requiere, pero no demasiado, ajustándose perfectamente al presente diseño evitando tener una bomba excesivamente potente que implique una inversión económica innecesaria. Además, posee una capacidad más que suficiente para elevar la presión hasta 6 bar. A continuación, se adjunta una imagen de la bomba seleccionada para toda la instalación en la Figura 37:



Figura 37. Bomba centrífuga SE1.80.80.15.4.50D.B de Grundfos

- **Bombas dosificadoras**

Para la dosificación de los reactivos químicos (NaOH y HCl) en estado líquido se emplean bombas eléctricas de la casa comercial Denios (Figura 38), de alta resistencia y estabilidad química.



**Figura 38. Bomba dosificadora de la casa comercial Denios**

- **Agitador**

Se instala un agitador vertical de turbina de la casa comercial Traxco para llevar a cabo la mezcla en los tanques (Figura 39):



**Figura 39. Agitador vertical de la casa comercial Traxco**

- **Sensor pH**

El sensor de pH escogido, el PCE-PH 22-ICA, pertenece a la casa comercial PCE con un rango de detección de pH entre 0 y 14, así como un límite de temperaturas muy elevado, de 80 °C. La Figura 40 muestra una imagen del mismo:

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



Figura 40. Sensor de pH de la casa comercial PCE

- **Sensor nivel**

El sensor de nivel escogido pertenece a la casa comercial WIKA, y consiste en un sensor de nivel por presión, el LS-10-7479388 de acero inoxidable. Se muestra a continuación en la Figura 41:



Figura 41. Sensor de nivel LS-10-7479388 de WIKA

- **Conductímetro**

El sensor de conductividad escogido es el PCE-SM11 de la casa comercial PCE, con compensación automática de temperatura. Se muestra en la Figura 42:



Figura 42. Conductímetro PCE-SM11 de la casa comercial PCE

- **Manómetro**

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Los manómetros escogidos para la instalación son de la casa comercial WIKA, los manómetros con muelle tubular 232.30 de acero inoxidable, con capacidad de medir hasta 10 bar de presión. Se muestra a continuación en la Figura 43:



**Figura 43. Manómetro WIKA para presiones de hasta 10 bar**

- **Caudalímetro**

Los caudalímetros seleccionados para la instalación diseñada son los de la casa comercial IFM, del modelo SI5000 capaces de soportar presiones de hasta 30 bar, más que suficiente para la instalación diseñada, electrónicos y hechos en acero inoxidable para evitar problemas de corrosión. Se muestra a continuación en la Figura 44:



**Figura 44. Caudalímetro electrónico SI500 de IFM**

- **Sensor temperatura**

Los sensores de temperatura seleccionados son de la casa comercial PCE, concretamente el modelo WTR 280 con un rango de medición de entre -50 y 200 °C, más que suficiente para la instalación diseñada. Se muestra a continuación en la Figura 45:



**Figura 45. Sensor de temperatura WTR 280 de la marca PCE**

- **Filtro de cartucho**

Para los requerimientos de caudal se escoge el filtro Dim-Spun014 de polipropileno de la casa comercial DimWater Engineering (Figura 46) de  $10 \mu\text{m}$ . Sus dimensiones son  $1,016 \times 63 \times 28 \text{ mm}$ . y es capaz de filtrar hasta  $8 \text{ m}^3/\text{h}$  por unidad y con presiones máximas de uso de 6 bar, propiedades suficientes para la instalación diseñada dado que se instalarán 14 en una misma carcasa para tratar todo el caudal de entrada al sistema de membranas.



**Figura 46. Filtro Dim-Spun014 de la casa comercial DimWater Engineering**

La carcasa seleccionada es del grupo Dimasa (Figura 47), cuyas dimensiones pueden llegar hasta 20 metros de longitud y 4 metros de diámetro, pudiendo ajustarse a las necesidades del sistema:



Figura 47. Carcasa de filtros de cartucho del grupo Dimasa

#### 10.5. Cálculos complementarios: gestión del concentrado

De forma adicional, para la instalación diseñada se plantea la posibilidad de mezclar el concentrado obtenido junto con el resto del efluente de la EDARU no tratado, de forma que se puedan evitar los costes asociados a su gestión por parte de un gestor externo. Esta decisión se toma en base a que del rechazo producido se desconocen los parámetros microbiológicos (E. Coli, Legionella spp. o nematodos intestinales) exigidos por la normativa vigente acerca del uso de aguas en el sector agrícola (Reglamento Europeo 2020/741).

Para comprobar si dicha solución es posible se muestran a continuación los balances de materia realizador para determinar las características de la corriente resultante y evaluar dicha posibilidad. Para ello, se tendrán en cuenta los límites de los parámetros establecidos por la normativa europea vigente 91/271/CEE (traspuesta en España en RD 509/1996, RD 11/1995 y RD 2116/1998) acerca de los parámetros de DQO,  $\text{DBO}_5$  y SST, recogidos en la siguiente Tabla 22:

Tabla 22. Límites de vertido según la Directiva 91/271/CEE

Parámetro	Valor
DQO (ppm)	125
$\text{DBO}_5$ (ppm)	25
SST (ppm)	35

Se analizará a continuación por partes:

➤ **Balance de caudales**

Sabiendo que la EDAR tiene 40000 habitantes equivalentes:

$$Q_{EDAR} = 40000 \text{ HE} * 0,25 \frac{\text{m}^3}{\text{HE} \cdot \text{d}} = 10000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Donde el efluente secundario que se genera resulta en:

$$Q_{Efl} = Q_{EDAR} - Q_{\text{concentrado}} - Q_{\text{permeado}} = 7440 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Y por tanto, el caudal que saldría de la mezcla del efluente y el concentrado es de:

$$Q_{\text{mezcla}} = Q_{Efl} + Q_{\text{concentrado}} = 8080 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

➤ **Sólidos en suspensión totales (SST)**

Se parte del valor experimental de la turbidez en la corriente del efluente de la EDARU para obtener el equivalente en ppm de SST. Esta equivalencia es de 1 ppm de SST por cada 3 NTU [52], por tanto:

$$SST_{efl} = \frac{0,038}{3} = 0,013 \text{ ppm}$$

Haciendo un balance con la corriente de concentrado con la que se mezclaría, y sabiendo que los SST en el concentrado son prácticamente de cero, queda:

$$Q_{\text{concentrado}} \cdot SST_{\text{concentrado}} + Q_{efl} \cdot SST_{efl} = Q_{\text{mezcla}} \cdot SST_{\text{mezcla}}$$

$$SST_{\text{mezcla}} = \frac{Q_{efl} \cdot SST_{efl}}{Q_{\text{mezcla}}} = 0,012 \text{ ppm}$$

Es decir, los SST cumplen con la legislación vigente.

➤ **DQO y DBO<sub>5</sub>**

La DQO<sub>efl</sub> es de 30,4 ppm, como se indica en la Tabla 10, y la del permeado DQO<sub>permeado</sub> es de 4,7 ppm, como se indica en la Tabla 17. Además, el caudal a tratar es la suma del caudal de concentrado y de permeado, de  $106,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Primero se calcula la DQO del concentrado como:

$$Q_{\text{tratar}} \cdot DQO_{efl} = Q_{\text{permeado}} \cdot DQO_{\text{permeado}} + Q_{\text{concentrado}} \cdot DQO_{\text{concentrado}}$$

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

$$DQO_{\text{concentrado}} = 107,404 \text{ ppm}$$

Por tanto, el valor de la corriente de mezcla:

$$Q_{\text{mezcla}} \cdot DQO_{\text{mezcla}} = Q_{\text{efl}} \cdot DQO_{\text{efl}} + Q_{\text{concentrado}} \cdot DQO_{\text{concentrado}}$$

$$DQO_{\text{mezcla}} = 36,507 \text{ ppm}$$

Es decir, que la corriente resultante también cumple los requisitos de DQO.

En cuanto a la  $DBO_5$  se establece una relación típica  $DQO/DBO_5$  de 2,5, por tanto:

$$DBO_{5\text{mezcla}} = \frac{DQO_{\text{mezcla}}}{2,5} = 14,603 \text{ ppm}$$

Es decir, también se cumple el requisito de  $DBO_5$  de vertido.

Por tanto, a la vista de los cálculos realizados y, teniendo en cuenta la legislación, se acepta como válida la propuesta de gestionar el rechazo mediante la mezcla con el efluente de salida de la EDARU.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 11. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DISEÑADA

El funcionamiento de la planta comienza con la entrada del efluente secundario a un tanque de mezcla (TM1) de  $128 \text{ m}^3$  con el fin de homogeneizar la entrada a los módulos de nanofiltración. Esta mezcla se consigue gracias a un agitador eléctrico (agitador vertical de Traxco, Figura 39), y donde los valores de nivel (superior e inferior) son evaluados mediante las sondas LS-10-7479388 (Figura 41) para mantener siempre un nivel de efluente adecuado. Además, gracias al control de conductividad, temperatura y pH, mediante sus sondas correspondientes (Figura 42, Figura 45 y Figura 40, respectivamente) se asegura que la corriente que vaya a entrar al sistema de membranas presenta unas características homogéneas.

Seguidamente el efluente secundario pasa por un sistema de filtración provisto con 14 cartuchos de 10 micras (Figura 46) contenidos en una carcasa metálica (Figura 47) para tratar todo el caudal entrante y proteger así la bomba y el sistema de membranas de cualquier sólido que pueda dañarlas. Se instalará otro sistema de filtración en paralelo para evitar que pare la planta en caso de mantenimiento de los mismos.

Mediante el uso de una bomba centrífuga (Figura 37), se impulsa el efluente al circuito, controlando siempre la presión de las conducciones mediante manómetros tras cada bomba para asegurarse un funcionamiento correcto y adecuado dentro de los valores de presión establecidos. En caso de que hubiera algún exceso de presión, se dispone de una válvula de seguridad para derivar el fluido de vuelta al depósito de alimentación (TM1).

El proceso de NF piramidal consta de 2 etapas: la primera cuenta con 9 tubos de presión dispuestos en paralelo y que reciben el efluente secundario. Cada tubo de presión contiene 8 membranas NF270-400/34i de configuración de arrollamiento en espiral y dispuestas en serie. La corriente alimento se separa en dos corrientes, una de permeado, que se almacena en el depósito (D1), y otra de concentrado que sirve de alimento para la segunda etapa de NF. La segunda etapa está formada por un grupo de 5 tubos de presión con 8 membranas cada uno, y, al igual que en la etapa 1, genera otras dos corrientes, una nueva de permeado que se deriva al mismo depósito de la etapa anterior (D1), y otra de concentrado o rechazo que se recoge en otro depósito diferente (D2).

La planta diseñada cuenta también con un sistema de limpieza química de las membranas, en la que la disolución de limpieza se introduce por la corriente alimento. Para realizar el protocolo de limpieza se cuenta con un tanque mezcla (TM2) agitado (Figura 39) de 550 L para la preparación de las disoluciones a partir de los depósitos con los reactivos aportados por los proveedores. El tanque mezcla cuenta con medidores de pH y de conductividad, así como controles de nivel superior e inferior, todos estos elementos de seguridad ayudan a garantizar que la limpieza realizada se lleva a cabo correctamente. El protocolo de limpieza consiste en, preparar una solución básica enfocada a la eliminación del ensuciamiento orgánico de las membranas (mayoritario) elaborada por la mezcla de NaOH (0,1%) y  $\text{Na}_4\text{EDTA}$  (1%). Tras la limpieza con la disolución básica, se hace un aclarado con permeado, a continuación, se prepara la disolución ácida de HCl (0,2%) enfocada a eliminar la suciedad inorgánica que pudiera depositarse en las membranas. La preparación de ambas disoluciones de limpieza se lleva a cabo en el tanque de mezcla (TM2) donde se introduce la proporción adecuada de

## Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

agua de permeado (desde D1, gracias a una bomba centrífuga) y de los reactivos químicos. Para el caso del  $\text{Na}_4\text{EDTA}$ , al proveerse dicho reactivo en estado sólido, se empleará una tolva y balanza para asegurarse de introducir la cantidad adecuada y se llevará al tanque mezcla TM2. En última instancia, ambas soluciones de limpieza se recogen en dos depósitos situados en la corriente de permeado (D3) y en la corriente de concentrado (D4), los cuales serán vaciados y gestionados por un gestor cualificado.

La frecuencia de la limpieza dependerá del ensuciamiento de las membranas, donde tal y como se indica en las guías de limpieza del fabricante (DuPont), se realizará una limpieza cuando haya una caída de la densidad de flujo de permeado del 10% o una caída de presión (diferencia de presión entre alimento y concentrado) de entre el 10 y 15%. Por seguridad, los tanques donde se almacenan los productos químicos cuentan con un cubeto de seguridad para, en caso de derrame, tener confinados estos productos químicos y minimizar la descarga de estos al suelo y minimizar los problemas de contaminación.

Finalmente, el permeado se llevará a la red industrial para su reutilización a nivel industrial. El concentrado o rechazo, sin embargo, no podrá ser reutilizado para riego dado que no cumple con los requerimientos de reutilización establecidos en el Reglamento Europeo 2020/741, y en el RD 1620/2007. Concretamente, el RD 1620/2007 establece que la conductividad no debe superar los  $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$  (rechazo generado tendría un valor de  $3537,71 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) y, el parámetro RAS, relación de adsorción de sodio, debe ser inferior a  $6 \text{ meq}/\text{L}$  (en este caso no ha sido posible cuantificar dicho parámetro). Igualmente, no se ha realizado un análisis microbiológico de dicha corriente.

Por tanto, la opción más viable es la mezcla de la corriente de concentrado con el efluente de salida de la EDARU, el cual cumple con la directiva 91/271. De esta forma, se consigue evitar los gastos derivados de su gestión por un gestor externo.

## 12. ESTUDIO ECONÓMICO

Para realizar el estudio económico se evaluará anualmente el coste en euros por  $\text{m}^3$  de agua tratada. Se considerará en los cálculos de un tiempo de operación de 24 horas al día y 360 días al año.

Los costes asociados a la operación de la instalación pueden clasificarse en tres tipos:

- Energía
- Personal
- Reactivos
- Mantenimiento

### 12.1. Energía

La energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema de bombeo y los equipos de la planta se toma de la red eléctrica. Los equipos que consumen energía son el sistema de bombeo de la planta y los motores agitadores de los tanques de mezcla, cuyos consumos anuales se recogen en la Tabla 23.

El caso de las bombas dosificadoras utilizadas para la limpieza, se considerará un uso mensual durante 1 hora (12 horas totales), aunque puede variar en función de las necesidades de limpieza de la planta.

Para calcular el coste variable se tendrá en cuenta el precio del kWh en base a la tarifa "Plan 3.0" de Iberdrola, para potencias contratadas superiores a 15 KW, dado que la instalación diseñada requiere una potencia de 19,14 kW tal y como se indica en la Tabla 23. En la misma Tabla 23, se recoge también el consumo variable anual de energía:

Tabla 23. Consumo energético anual de la instalación diseñada

Descripción	Cantidad	Potencia necesaria (kW/ud)	Tiempo funcionamiento (h/año)	Consumo energético (kWh/año)
Bombas circulación	2	1,5	8640	25920
Bomba limpieza	1	1,5	12	18
Bomba dosificadora	2	0,5	12	12
Agitador	1	0,37	8640	3196,8
Agitador limpieza	1	0,37	12	4,44

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

Sistema de membranas de NF	1	12,9	8640	111456
TOTAL CONSUMO ENERGÉTICO VARIABLE ANUAL				140607,24

La tarifa contratada posee los siguientes costes, reflejados en la Tabla 24:

**Tabla 24. Resumen de la tarifa "Plan 3.0" de Iberdrola para consumos superiores a 15 kW**

Descripción	Término de potencia (fijo) (€/kW año)	Término de energía (consumo variable) (€/kWh)
Punta	53,676529	0,147359
Llano	32,561376	0,124868
Valle	23,162438	0,090470

Dicho consumo se distribuye a lo largo de las 24 h de cada día del año, que se ha considerado con la siguiente distribución horaria:

- Horas punta: 7 h (de 6:00-9:00, 20:00-22:00, 14:00-16:00) → 29,17% del día
- Horas valle: 6 h (de 24:00-6:00) → 25% del día
- Horas llano: el resto, 11 h → 45,83% del día

Dado que la tarifa contratada diferencia el coste tanto fijo como variable en función de la distribución horaria (Tabla 24), estos costes se calcularán en vista de los porcentajes anteriores y finalmente obtener el coste total de la energía según la tarifa seleccionada:

- Parte fija

$$C_{fijo_{punta}} = 19,14 \text{ kW} \cdot 0,2917 \cdot 53,6765 \left( \frac{\text{€}}{\text{kW año}} \right) = 299,68 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$C_{fijo_{llano}} = 19,14 \text{ kW} \cdot 0,4583 \cdot 32,5613 \left( \frac{\text{€}}{\text{kW año}} \right) = 285,62 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$C_{fijo_{valle}} = 19,14 \text{ kW} \cdot 0,25 \cdot 23,1624 \left( \frac{\text{€}}{\text{kW año}} \right) = 110,83 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Donde el coste anual de la parte fija resulta en:

$$C_{fijo} = C_{fijo_{punta}} + C_{fijo_{llano}} + C_{fijo_{valle}} = 696,13 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

- Parte variable

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

En la Tabla 23 se obtenía un consumo anual de 166504,28 kWh/año, que aplicando las tarifas horarias se obtiene que:

$$C_{var_{punta}} = 140607,24 \text{ kW} \cdot 0,2917 \cdot 0,1473 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = 6041,53 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$C_{var_{llano}} = 140607,24 \text{ kW} \cdot 0,4583 \cdot 0,1248 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = 8042,15 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

$$C_{var_{valle}} = 140607,24 \text{ kW} \cdot 0,25 \cdot 0,090470 \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) = 3180,18 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Donde el coste variable anual resulta en:

$$C_{variable} = C_{var_{punta}} + C_{var_{llano}} + C_{var_{valle}} = 17263,86 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

El coste total asociado al consumo energético de la instalación asciende a 17959,99 €. Dicho valor se obtiene como la suma del coste fijo y coste variable.

## 12.2. Personal

Para el apartado de personal se ha considerado la presencia de un ingeniero químico titulado como soporte y gestor, con un total de 20 horas semanales; y 2 ingenieros técnicos de soporte para el control diario de la planta con jornadas de 40 horas semanales. El desglose de estos costes se recoge en la Tabla 25:

**Tabla 25. Coste de personal asociado a la operación de la instalación diseñada**

Unidad	Descripción	Coste (€/h)	Cantidad (h/año)	Importe (€/año)
h	Técnico	21,37	2080	44449,6
h	Ingeniero químico	26,7	1040	27768
<b>TOTAL</b>				<b>72217,6</b>

## 12.3. Productos químicos

En el grupo de reactivos se tendrán en cuenta los gastos de  $\text{Na}_4\text{EDTA}$ ,  $\text{NaOH}$  y  $\text{HCl}$  empleados en la limpieza tal y como se recoge en la Tabla 26. Las cantidades serán calculadas para un total de 12 limpiezas anuales aproximadamente, dado que inicialmente se desconoce el número de limpiezas que habrá que hacerse.

**Tabla 26. Coste de reactivos de la instalación diseñada**

Unidad	Descripción	Coste (€/u)	Cantidad (u)	Importe (€/año)
u	Disolución NaOH puro 50% de 5L	25,26	3	75,78
u	Na <sub>4</sub> EDTA en polvo 98% de 1 kg	64,94	60	3896,4
u	Disolución de HCl 10% de 1L	23,63	120	2835,6
<b>TOTAL</b>				<b>6807,78</b>

#### 12.4. Mantenimiento

En este apartado se incluirán los gastos correspondientes a la reposición de las membranas en caso de daño/rotura, el cambio de filtros de seguridad, un coste fijo de mantenimiento anual de los equipos y un coste fijo asociado a la gestión de los residuos de limpieza de las membranas por un gestor capacitado:

**Tabla 27. Costes asociados al mantenimiento de la instalación diseñada**

Unidad	Descripción	Coste (€/u)	Cantidad (u)	Importe (€/año)
u	Reposición membranas	800	20	16000
u	Reposición filtros	7,92	28	221,76
u	Mantenimiento equipos	8000	1	8000
U	Gestión de residuos derivados de los procesos de limpieza de las membranas	10000	1	10000
<b>TOTAL</b>				<b>34221,76</b>

#### 12.5. Resumen de los gastos por partida

A modo resumen se recoge en la Tabla 28 el coste de cada bloque (personal, energía, reactivos y mantenimiento) y el total destinado al funcionamiento de la planta:

**Tabla 28. Resumen estudio económico**

	<b>Importe (€/año)</b>
Energía	17959,99
Personal	72217,60
Reactivos	6807,78
Mantenimiento	34221,76
<b>TOTAL</b>	<b>131207,13</b>

Conociendo el coste total de la planta, se procede a calcular el caudal de agua tratada a lo largo de todo un año:

$$Q_{\text{anual}} = 106,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 8640 \frac{\text{h}}{\text{año}} = 921888 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Finalmente, puede calcularse el coste en euros por  $\text{m}^3$  de agua tratada como:

$$\text{Coste del } \text{m}^3 = \frac{131207,13 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{921888 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = 0,142 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

Es decir, que cada  $\text{m}^3$  de agua tratada por la planta diseñada cuesta alrededor de 14 céntimos de euro.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

### 13. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados en el presente TFM, se indican a continuación las principales conclusiones obtenidas referentes tanto a la parte experimental como a la parte del diseño de la instalación. Cabe indicar que, si bien se incluyen conclusiones de la parte experimental, éstas se encuentran detalladas en el apartado 9.5.

- A partir de los ensayos realizados en el laboratorio ha sido posible constatar la efectividad de los procesos de las membranas de ultrafiltración y de adsorción con carbón activo a la hora de mejorar la calidad del agua de un efluente secundario de EDARU. Sin embargo, es el proceso de nanofiltración, el que más destaca por su eficacia y eficiencia.
- Las elevadas concentraciones de carbón activo requeridas para el proceso de adsorción hacen que dicho proceso sea inviable económicamente.
- Los ensayos de ultrafiltración a concentración variable mostraron un bajo ensuciamiento de la membrana incluso a factores de concentración de volumen de 9,3 y 25 para las membranas de 5 kDa y 100 kDa ensayadas. Dichos resultados mostraron que el efluente secundario podía ser tratado directamente con un proceso de nanofiltración.
- Los resultados del ensayo de nanofiltración indicaron la elevada eficacia del proceso con elevados rendimientos de eliminación de DQO, proteínas, carbohidratos y conductividad, así como un bajo ensuciamiento incluso a un factor de reducción de volumen de 6,6.
- Las características del permeado obtenido en el proceso de nanofiltración permiten su reutilización en la industria cerámica, y en sistemas de torres de refrigeración y calderas.
- El rechazo resultante del proceso de membranas se mezclará con el efluente de la EDARU para su vertido cumpliendo con Directiva 91/271/CEE en vista del no cumplimiento del Reglamento 2020/741 de reutilización para riego agrícola.
- El proceso de nanofiltración diseñado cuenta con un total de 112 membranas NF270-400/34i de la casa comercial DuPont, con una configuración de arrollamiento en espiral y cuenta con un área de membrana total de  $4144 \text{ m}^2$ .
- A partir del programa de diseño WAVE se confirmó el número de membranas a emplear en la instalación y se estableció un proceso piramidal de dos etapas con 9 tubos de presión de 8 módulos de membranas en la primera, y con 5 tubos de presión de 8 módulos en la segunda.
- El estudio económico realizado a la instalación diseñada considerando los gastos de energía, personal, reactivos químicos y mantenimiento hace que el coste del  $\text{m}^3$  de agua producto sea de  $0,142 \text{ €/m}^3$ .
- El presupuesto de la instalación diseñada asciende a 358.706,75 euros.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Tchobanoglous, J. Darby, K. Bourgeois, J. McArdle, P. Genest, M. Tylla, Ultrafiltration as an advanced tertiary treatment process for municipal wastewater, *Desalination*. 119 (1998) 315–321. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00175-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00175-1).
- [2] S. Bousbih, E. Errais, R. Ben Amar, J. Duplay, M. Trabelsi-Ayadi, F. Darragi, Elaboration and Characterization of New Ceramic Ultrafiltration Membranes from Natural Clay: Application of Treatment of Textile Wastewater BT - Petrogenesis and Exploration of the Earth's Interior, in: D.M. Doronzo, E. Schingaro, J.S. Armstrong-Altrin, B. Zoheir (Eds.), Springer International Publishing, Cham, 2019: pp. 195–198.
- [3] C. Yang, W. Xu, Y. Nan, Y. Wang, Y. Hu, C. Gao, X. Chen, Fabrication and characterization of a high performance polyimide ultrafiltration membrane for dye removal, *J. Colloid Interface Sci.* 562 (2020) 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.11.075>.
- [4] M. Berradi, R. Hsissou, M. Khudhair, T. Lakdioui, A. Bekhta, M. El Gouri, M. Rafik, A. El Bachiri, A. El Harfi, Ultrafiltration of wastewater-models loaded with indigo blue by membranes composed of organic polymers at different percentages: Comparative study, *Moroccan J. Chem.* 7 (2019) 230–235.
- [5] J.M. Gozávez-Zafrilla, D. Sanz-Escribano, J. Lora-García, M.C. León Hidalgo, Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry, *Desalination*. 222 (2008) 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.173>.
- [6] C. Lubello, R. Gori, A.M. De Bernardinis, G. Simonelli, Ultrafiltration as tertiary treatment for industrial reuse, *Water Sci. Technol. Water Supply*. 3 (2003) 161–168. <https://doi.org/10.2166/ws.2003.0058>.
- [7] M. Racar, D. Dolar, A. Špehar, K. Košutić, Application of UF/NF/RO membranes for treatment and reuse of rendering plant wastewater, *Process Saf. Environ. Prot.* 105 (2017) 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.015>.
- [8] L.H. Andrade, F.D.S. Mendes, J.C. Espindola, M.C.S. Amaral, Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor, *Sep. Purif. Technol.* 126 (2014) 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.056>.
- [9] F. Malekian, M. Farhadian, M. Sohrabi, A. Razmjou, Application of nanofiltration as a tertiary treatment in a polyester production industry for wastewater reuse, *Desalin. Water Treat.* 57 (2016) 7175–7181. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1019363>.
- [10] N. Ben Amar, N. Kechaou, J. Palmeri, A. Deratani, A. Sghaier, Comparison of tertiary treatment by nanofiltration and reverse osmosis for water reuse in denim textile industry, *J. Hazard. Mater.* 170 (2009) 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.130>.
- [11] R.M.C. Viegas, E. Mesquita, M. Campinas, M.J. Rosa, Pilot studies and cost analysis of hybrid powdered activated carbon/ceramic microfiltration for controlling pharmaceutical compounds and organic matter in water reclamation, *Water (Switzerland)*. 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/w12010033>.
- [12] M. Zhu, X. Yin, W. Chen, Z. Yi, H. Tian, Removal of sulphate from mine waters by electrocoagulation/rice straw activated carbon adsorption coupling in a batch system: Optimization of process via response surface methodology, *J. Water Reuse Desalin.* 9 (2019)

- 163–172. <https://doi.org/10.2166/wrd.2018.054>.
- [13] S.S. Mohan, K.N. Sheena, Dairy Waste Water Treatment Using Coconut Shell Activated Carbon and Laterite as Low Cost Adsorbents, (2019) 306–309.
- [14] R. Guillosoy, J. Le Roux, R. Mailler, E. Vulliet, C. Morlay, F. Nauleau, J. Gasperi, V. Rocher, Organic micropollutants in a large wastewater treatment plant: What are the benefits of an advanced treatment by activated carbon adsorption in comparison to conventional treatment?, *Chemosphere*. 218 (2019) 1050–1060. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.182>.
- [15] Objetivos de Desarrollo Sostenible, Sustain. Dev. (n.d.). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/> (accessed April 20, 2020).
- [16] U. Europea, Comunicación de la Comisión al Parlamento europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones - Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular, 2015.
- [17] Ministerio de Sanidad y Consumo, Anexo I-R.D. 1620/2007, Boe. (2003) 45. [http://www.msssi.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/rd\\_140\\_2003.pdf](http://www.msssi.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/rd_140_2003.pdf).
- [18] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Guía para la aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas, 2003. [http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/guia\\_rd\\_1620\\_2007\\_\\_tcm7-178027.pdf%5Cnhttp://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/bathing/srwe2full.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/guia_rd_1620_2007__tcm7-178027.pdf%5Cnhttp://www.who.int/water_sanitation_health/bathing/srwe2full.pdf).
- [19] F.I. Hai, K. Yamamoto, C.-H. Lee, Membrane biological reactors: theory, modeling, design, management and applications to wastewater reuse, Iwa Publishing, 2018.
- [20] J. Crook, D. Ammerman, D. Okun, R. Matthews, Guidelines for water reuse, Guidel. Water Reuse. (2012).
- [21] Comisión Europea, Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua, D. Of. La Unión Eur. 2019 (2018) 2–32. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:e8951067-627c-11e8-ab9c-01aa75ed71a1.0024.02/DOC\\_2&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:e8951067-627c-11e8-ab9c-01aa75ed71a1.0024.02/DOC_2&format=PDF).
- [22] A. Rozzi, F. Malpei, L. Bonomo, R. Bianchi, Textile wastewater reuse in northern Italy (COMO), *Water Sci. Technol.* 39 (1999) 121–128. <https://search.proquest.com/docview/1943348123?accountid=28445>.
- [23] É. Hansen, M.A. Siqueira Rodrigues, P.M. de Aquim, Characterization of aqueous streams in a petrochemical industry: A study for the reuse of industrial effluents, *J. Water Process Eng.* 27 (2019) 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.018>.
- [24] R. Saravanane, V. V. Ranade, V.M. Bhandari, A. Seshagiri Rao, Urban Wastewater Treatment for Recycling and Reuse in Industrial Applications: Indian Scenario, Elsevier Ltd., 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099968-5.00007-6>.
- [25] P.C.S. Mancuso, H.F. dos Santos, Reúso de água, Editora Manole Ltda, 2003.
- [26] R. Moliner-Salvador, A. Deratani, J. Palmeri, E. Sánchez, Use of nanofiltration membrane technology for ceramic industry wastewater treatment, *Bol. La Soc. Esp. Ceram. y Vidr.* 51 (2012) 103–110. <https://doi.org/10.3989/cyv.152012>.

- [27] G.C. Badea, Diseño de una EDAR para el tratamiento de aguas residuales de la industria cerámica para su reutilización en una planta de fabricación de polvo atomizado, (2018) 175.
- [28] B. Sarkar, P. Chakrabarti, A. Vijaykumar, V. Kale, Wastewater treatment in dairy industries - possibility of reuse, Desalination. 195 (2006) 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.015>.
- [29] M. Fababuj-Roger, J.A. Mendoza-Roca, M. V. Galiana-Aleixandre, A. Bes-Piá, B. Cuartas-Uribe, A. Iborra-Clar, Reuse of tannery wastewaters by combination of ultrafiltration and reverse osmosis after a conventional physical-chemical treatment, Desalination. 204 (2007) 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.032>.
- [30] D. Rico, J. Melgarejo, Desalación y reutilización de aguas. Situación en la provincia de Alicante., 2006.
- [31] K. Ostad-ali-askari, S. Eslamian, V.P. Singh, N.R. Dalezios, Decreasing the Number of Coliforms of Wastewater Treatment Plants using Sand Filtration Together with Four-Seed Powder Kaveh Ostad-Ali-Askari1\*, Saeid Eslamian2, Vijay P. Singh3, Nicolas R. Dalezios4, Mohsen, Int. J. Res. Stud. Agric. Sci. 5 (2019) 36–40. <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0503005>.
- [32] E.M. Seeger, M. Braeckevelt, N. Reiche, J.A. Müller, M. Kästner, Removal of pathogen indicators from secondary effluent using slow sand filtration: Optimization approaches, Ecol. Eng. 95 (2016) 635–644. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.068>.
- [33] M. Racar, D. Dolar, M. Farkaš, N. Milčić, A. Špehar, K. Košutić, Rendering plant wastewater reclamation by coagulation, sand filtration, and ultrafiltration, Chemosphere. 227 (2019) 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.045>.
- [34] K. Burch, REMOVAL OF ANTIBIOTICS VIA CHLORINATION AND, (2019).
- [35] G. Cerreta, M.A. Roccamante, P. Plaza-Bolaños, I. Oller, A. Aguera, S. Malato, L. Rizzo, Advanced treatment of urban wastewater by UV-C/free chlorine process: Micro-pollutants removal and effect of UV-C radiation on trihalomethanes formation, Water Res. 169 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115220>.
- [36] EPA, Membrane Filtration Guidance Manual, Environ. Prot. (2005).
- [37] J.G. Crespo, K.W. Böddeker, Membrane processes in separation and purification, Springer Science & Business Media, 2013. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KwnoCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=Membrane+Processes+in+Separation+and+Purification+citation&ots=tuZ1G173hj&sig=nX4XP\\_WzqJ02MXiyia6TcF-Os2M#v=onepage&q=Membrane Processes in Separation and Purification citation&f=fal](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=KwnoCAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=Membrane+Processes+in+Separation+and+Purification+citation&ots=tuZ1G173hj&sig=nX4XP_WzqJ02MXiyia6TcF-Os2M#v=onepage&q=Membrane+Processes+in+Separation+and+Purification+citation&f=fal).
- [38] B. Van Der Bruggen, C. Vandecasteele, T. Van Gestel, W. Doyen, R. Leysen, A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production, Environ. Prog. 22 (2003) 46–56. <https://doi.org/10.1002/ep.670220116>.
- [39] J. Mallevalle, P.E. Odendaal, M.R. Wiesner, Water treatment membrane processes, American Water Works Association, 1996.
- [40] H.K. Shon, S. Phuntsho, D.S. Chaudhary, S. Vigneswaran, J. Cho, Nanofiltration for water and wastewater treatment - A mini review, Drink. Water Eng. Sci. 6 (2013) 47–53. <https://doi.org/10.5194/dwes-6-47-2013>.
- [41] C. Guizard, A. Bac, M. Barboiu, N. Hovnanian, Hybrid organic-inorganic membranes with specific

- transport properties: Application in separation and sensors technologies, Sep. Purif. Technol. - SEP PURIF TECHNOL. 25 (2001) 167–180. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(01\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(01)00101-0).
- [42] S. Filtration, Module Configurations & Processes, (n.d.). <https://synderfiltration.com/learning-center/articles/module-configurations-process/> (accessed June 4, 2020).
- [43] M.C.G. Pérez, Análisis comparativo de permeadores en plantas de desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa : Recomendaciones sobre selección de diseños, (n.d.).
- [44] R.C. Bansal, M. Goyal, Activated carbon adsorption, CRC press, 2005.
- [45] M. Králik, Adsorption, chemisorption, and catalysis, Chem. Pap. 68 (2014) 1625–1638. <https://doi.org/10.2478/s11696-014-0624-9>.
- [46] P.J. Westgate, Characterization of Proteins in Effluents from Three Wastewater Treatment Plants that Discharge to the Connecticut River, (2009) 1–56.
- [47] K. Katsoufidou, S.G. Yiantsios, A.J. Karabelas, Experimental study of ultrafiltration membrane fouling by sodium alginate and flux recovery by backwashing, J. Memb. Sci. 300 (2007) 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.05.017>.
- [48] DOW FILMTEC™ Membranes, Product Data Sheet FILMTEC™ NF270-400 / 34i Element Description Ideal for : utility managers and operators dealing with surface and Product Type Typical Properties Element Dimensions Operating and Additional Important Information Product Stewardship Befo, (2019) 3–5.
- [49] DOW FILMTEC™ Membranes, System Design Membrane System Design Guidelines for 8" FilmTec™ Elements Membrane System Design Guidelines, (2020) 1–4.
- [50] DOW FILMTEC™ Membranes, FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. Available from [www.dowwaterandprocess.com](http://www.dowwaterandprocess.com), (2012).
- [51] DOW FILMTEC™ Membranes, Cleaning Procedures for DOW FILMTEC FT30 Elements, Fact Sheet. (2009) 1–7. [http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh\\_060a/0901b8038060a66f.pdf?filepath=liquids..](http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_060a/0901b8038060a66f.pdf?filepath=liquids..)
- [52] iAgua, ¿Que es la NTU?, (n.d.). <https://www.iagua.es/noticias/espana/tecnoconverting/16/06/30/tecnoconverting-responde-que-es-ntu> (accessed July 30, 2020).
- [53] P.Q.S.L. U, Ficha de Datos de Seguridad Según 1907/2006 CE, Art.31 Ácido Clorhídrico 10%, (2010) 2–7.
- [54] P.Q.S.L. U, Ficha de Datos de Seguridad Según Reglamento ( UE ) 830 / 2015 1952 Acido Etilendiaminotetraacético Sal Tetrasódica 4- hidrato, (2017).
- [55] P.Q.S.L. U, Ficha de Datos de Seguridad Según 1907/2006/CE, Art.31 Solución de Hidróxido de Sodio 50%, (2010) 2–7.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# ANEXOS DE LA MEMORIA

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## 15. ANEXO

### 15.1. Fichas de seguridad

En este anexo se recogen los aspectos más importantes de las fichas de seguridad de los reactivos químicos empleados en la instalación de NF diseñada, es decir, del HCl,  $\text{Na}_4\text{EDTA}$  y NaOH. La información aquí recogida ha sido extraída de las FDS del fabricante de los productos seleccionados Panreac Applichem [53–55].

#### - **Ácido Clorhídrico 10%**

Los pictogramas asociados a este producto son los siguientes:



Es un producto capaz de corroer metales (H290) y de producir irritación cutánea (H315), ocular grave (H319) y de las vías respiratorias (H335).

Por ello se establecen una serie de medidas de seguridad individuales mediante el uso de EPIs (P280) como son el uso de gafas de seguridad, guantes de protección (de nitrilo o caucho butílico normalmente), filtros E-P2 en caso de formación de vapores o aerosoles y ropa larga que cubra la piel, todo ello acompañado de higiene adecuada con lavado de manos previo y posterior a su uso.

Otras recomendaciones de prudencia son que en caso de ingestión (P301+P330+P331) se debe enjuagar la boca y no provocar el vómito, si acabara en contacto con los ojos (P305+P351+P338) se debe aclarar con cuidado con agua durante unos minutos y, en caso de malestar, se debe acudir a un médico (P314).

#### - **Solución NaOH puro al 50% p/v**

El pictograma asociado a este producto es el siguiente:



Como el HCl, es un producto con capacidad de corrosión sobre metales (H290) además de ser capaz de producir quemaduras graves en la piel y generar lesiones oculares graves (H314).

Por esta razón se recomienda el uso de protección individual (P280), tanto ocular (uso de antiparras), de las manos (guantes de caucho butílico o nitrilo), del cuerpo (ropa de manga larga) y respiratoria si se supera el límite de exposición utilizando respiradores con certificación.

Asimismo, otros consejos de prudencia al trabajar con esta sustancia son evitar respirar el polvo, humo, gas, niebla o aerosol que pueda derivar del uso del producto (P260), lavarse a conciencia tras el uso (P264), y que en caso de ingestión hay que enjuagarse la boca y no provocar el vómito (P301+P330+P331).

- **Na<sub>4</sub>EDTA sólido (EDTA Sal Tetrasódica 4-hidrato)**

Sus pictogramas asociados son los siguientes:



Implican que es una sustancia nociva en caso de ingestión (H302) y que provoca lesiones oculares graves (H318).

Por ello, los EPIs recomendados para su uso (P280) hacen referencia a la protección respiratoria, si hay polvo; a la protección de las manos con el uso de guantes del material adecuado y a la protección ocular utilizando gafas de seguridad, todo ello complementado con una higiene adecuada (P264) mediante la eliminación de prendas contaminadas con el producto o mediante lavado de manos antes de las pausas y al acabar de trabajar con la sustancia.

Otros consejos de prudencia hacen referencia a no comer, beber ni fumar durante su uso (P270), a que en caso de ingestión (P301+P310+P312+P330) se llame a un centro de atención toxicológica o un médico en caso de encontrarse mal, a que si la sustancia entra en contacto con los ojos (P305+P351+P338) se aclare con agua durante unos minutos con cuidado y que el contenido o el recipiente vacío ha de eliminarse según la directiva europea 94/62/CE o 2008/98/CE (P501).

- **Primeros auxilios**

De forma general los primeros auxilios son aplicables a las sustancias anteriormente descritas. A continuación, se recogen las formas de actuación en caso de que haya que aplicar dichos primeros auxilios:

De forma general, quitarse de inmediato toda prenda contaminada con el producto.

## Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

En caso de inhalación del producto se ha de suministrar aire fresco u oxígeno, así como solicitar ayuda médica. Si la persona no respira, se tendrán que aplicar técnicas de respiración artificial a menos que la persona haya ingerido la sustancia.

Si la sustancia entra en contacto con la piel, lavarse con agua y jabón y si se sufren irritaciones continuas de la piel, se ha de consultar un médico.

En caso de con los ojos se han de limpiar muy bien los ojos abiertos durante varios minutos con abundante agua corriente y consultar/recibir atención médica.

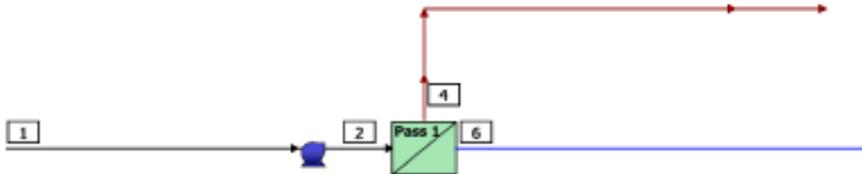
En caso de ingestión se ha de enjuagar la boca con agua y se ha de proporcionar asistencia médica a la persona afectada. En caso de que la persona afectada estuviera inconsciente, no se ha de dar nunca nada por la boca

### 15.2. Informe del diseño con la aplicación informática WAVE

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )



RO Detailed Report  
RO System Flow Diagram



#	Description	Flow (m <sup>3</sup> /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	106.7	840.1	0.0
2	Net Feed to Pass 1	106.7	840.2	3.5
4	Total Concentrate from Pass 1	26.7	2,164	1.3
6	Net Product from RO System	80.0	399.1	0.0

RO System Overview

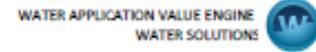
Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	73.0 %
System Flow Rate	(m <sup>3</sup> /h)	Net Feed =	106.7	Net Product =	80.0		

Pass	Pass 1
Stream Name	Stream 1
Water Type	Waste Water (With DuPont UF, SDI <
Number of Elements	112
Total Active Area (m <sup>2</sup> )	4162
Feed Flow per Pass (m <sup>3</sup> /h)	106.7
Feed TDS* (mg/L)	840.2
Feed Pressure (bar)	3.5
Flow Factor	0.83, 0.85
Permeate Flow per Pass (m <sup>3</sup> /h)	80.0
Pass Average flux (LMH)	19.2
Permeate TDS* (mg/L)	399.1
Pass Recovery	73.0 %
Average NDP (bar)	1.9
Specific Energy (kWh/m <sup>3</sup> )	0.16
Temperature (°C)	25.0
pH	7.2 (After Adjustment)
Chemical Dose	-
RO System Recovery	73.0 %
Net RO System Recovery	73.0%

Footnotes:

\*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub> and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )



RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Recirc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Boost Press (bar)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Conc Press (bar)	Press Drop (bar)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Avg Flux (LMH)	Perm Press (bar)	Perm TDS (mg/L)
1	NF270-400/34i	9	8	106.7	0.00	3.2	0.0	45.5	2.3	0.9	61.2	22.9	0.0	358.5
2	NF270-400/34i	3	8	45.5	0.0	2.1	0.0	26.7	1.3	0.7	18.8	12.7	0.0	531.2

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		Total
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K <sup>+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na <sup>+</sup>	101.4	147.3	188.6	67.34	88.82	72.39
Mg <sup>++</sup>	43.97	86.04	130.5	12.71	22.98	15.13
Ca <sup>++</sup>	110.1	201.2	296.5	42.47	66.12	48.03
Sr <sup>++</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba <sup>++</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	34.18	31.85	26.23	35.90	39.81	36.82
F <sup>-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl <sup>-</sup>	205.0	235.0	220.7	182.8	255.2	199.8
Br <sup>-</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	345.4	787.0	1,301	17.27	58.26	26.91
PO <sub>4</sub> <sup>-4</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS*	840.1	1,488	2,164	358.5	531.2	399.1
pH	7.2	7.4	7.6	7.0	7.0	7.0

Footnotes:

\*Total Dissolved Solids includes ions, SiO<sub>2</sub> and B(OH)<sub>3</sub>. It does not include NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>

RO Design Warnings

None

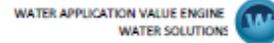
Special Comments

None

RO Flow Table (Element Level) - Pass 1

Stage	Element	Element Name	Recovery (%)	Feed Flow (m <sup>3</sup> /h)	Feed Press (bar)	Feed TDS (mg/L)	Conc Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm Flow (m <sup>3</sup> /h)	Perm Flux (LMH)	Perm TDS (mg/L)
1	1	NF270-400/34i	8.6	11.9	3.2	840.2	10.8	1.01	27.3	299.7
1	2	NF270-400/34i	8.8	10.8	3.0	890.7	9.89	0.95	25.5	317.3
1	3	NF270-400/34i	9.0	9.89	2.8	945.8	8.99	0.89	24.1	335.0

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )



1	4	NF270-400/34i	9.4	8.99	2.7	1,006	8.15	0.85	22.8	352.9
1	5	NF270-400/34i	10.0	8.15	2.6	1,075	7.33	0.81	21.8	370.9
1	6	NF270-400/34i	10.7	7.33	2.5	1,152	6.55	0.78	21.0	389.3
1	7	NF270-400/34i	11.6	6.55	2.4	1,243	5.79	0.76	20.4	408.5
1	8	NF270-400/34i	12.8	5.79	2.3	1,353	5.05	0.74	20.0	428.9
2	1	NF270-400/34i	6.8	9.09	2.1	1,488	8.48	0.61	16.5	462.7
2	2	NF270-400/34i	6.7	8.48	1.9	1,563	7.92	0.56	15.2	484.8
2	3	NF270-400/34i	6.6	7.92	1.8	1,639	7.40	0.52	14.0	507.3
2	4	NF270-400/34i	6.5	7.40	1.7	1,719	6.92	0.48	12.9	529.6
2	5	NF270-400/34i	6.4	6.92	1.6	1,801	6.48	0.44	11.9	551.7
2	6	NF270-400/34i	6.3	6.48	1.5	1,886	6.07	0.41	11.0	573.6
2	7	NF270-400/34i	6.3	6.07	1.5	1,975	5.69	0.38	10.2	595.4
2	8	NF270-400/34i	6.2	5.69	1.4	2,067	5.33	0.35	9.6	617.2

Footnotes:

\*Total Dissolved Solids includes ions,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{B(OH)}_3$ . It does not include  $\text{NH}_3$  and  $\text{CO}_2$ .

#### RO Solubility Warnings

None

#### RO Chemical Adjustments

	Pass 1 Feed	RO 1 <sup>st</sup> Pass Conc
pH	7.2	7.6
Langelier Saturation Index	0.00	0.00
Stiff & Davis Stability Index	0.00	0.00
TDS* (mg/l)	840.1	2,164
Ionic Strength (mola)	0.02	0.06
$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)	0.00	0.00
$\text{CO}_2$ (mg/l)	0.00	0.00
$\text{CO}_3^{2-}$ (mg/L)	0.00	0.00
$\text{CaSO}_4$ (% saturation)	7.4	47.7
$\text{BaSO}_4$ (% saturation)	0.00	0.00
$\text{SrSO}_4$ (% saturation)	0.00	0.00
$\text{CaF}_2$ (% saturation)	0.00	0.00
$\text{SiO}_2$ (% saturation)	0.00	0.00
$\text{Mg(OH)}_2$ (% saturation)	0.00	0.01

Footnotes:

\*Total Dissolved Solids includes ions,  $\text{SiO}_2$  and  $\text{B(OH)}_3$ . It does not include  $\text{NH}_3$  and  $\text{CO}_2$ .

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )



**RO Utility and Chemical Costs**

**Service Water**

	Flow Rate ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Unit Cost ( $\text{€}/\text{m}^3$ )	Hourly Cost ( $\text{€}/\text{h}$ )	Daily Cost ( $\text{€}/\text{d}$ )
Non-Product Feed Water				
Pass 1	26.7	0.1316	3.51	84.20
Total Non-product Feed Water Cost	26.7		3.51	84.20
Waste Water Disposal				
Pass 1	26.7	0.6486	17.29	414.96
Total Waste Water Disposal	26.7		17.29	414.96
Total Service Water Cost				499.16

**Electricity**

Peak Power	(kW)	12.9
Energy	(kWh/d)	308.6
Electricity Unit Cost	( $\text{€}/\text{kWh}$ )	0.0846
Electricity Cost	( $\text{€}/\text{d}$ )	26.1
Specific Energy	( $\text{kWh}/\text{m}^3$ )	0.16

Pump	Flow Rate ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Power (kW)	Energy (kWh/d)	Cost ( $\text{€}/\text{d}$ )
Pass 1				
Feed	106.65	12.86	308.61	26.11
Pass 1 Total Electrical Cost		12.86	308.61	26.11

**Chemical**

Chemical	Unit Cost ( $\text{€}/\text{kg}$ )	Dose ( $\text{mg}/\text{L}$ )	Volume ( $\text{L}/\text{d}$ )	Cost ( $\text{€}/\text{d}$ )
Total Chemical Cost				0.0

Utility and Chemical Cost	( $\text{€}/\text{d}$ )	525.3
Specific Water Cost	( $\text{€}/\text{m}^3$ )	0.274

Information provided is offered in good faith, but without guarantees. Users of such information assume all risk and liability and expressly release DuPont de Nemours Inc. and its subsidiaries, officers and agents from any and all liability. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, users of information set forth herein or generated during use of WAVE are responsible for determining suitability of the information. Neither DuPont nor its subsidiaries assume any liability for results obtained or damages incurred from the use of information provided and TO THE FULLEST EXTENT PERMITTED BY LAW, EXPRESSLY DISCLAIM ALL WARRANTIES, EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Users will not export or re-export any information or technology received from DuPont or its subsidiaries, or the direct products or designs based upon such information or technology in violation of the export-control or customs laws or regulations of any country, including those of the United States of America. DuPont®, DuPont Oval Logo, and all products denoted with ® or ™ are trademarks or registered trademarks of DuPont or its affiliates. Copyright © 2019 DuPont. DOWEX™, DOWEX MONOSPHERE™, DOWEX MARATHON™, DOWEX UPCORE™ are a trademark of The Dow Chemical Company used under license by DuPont.

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# PLANOS

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

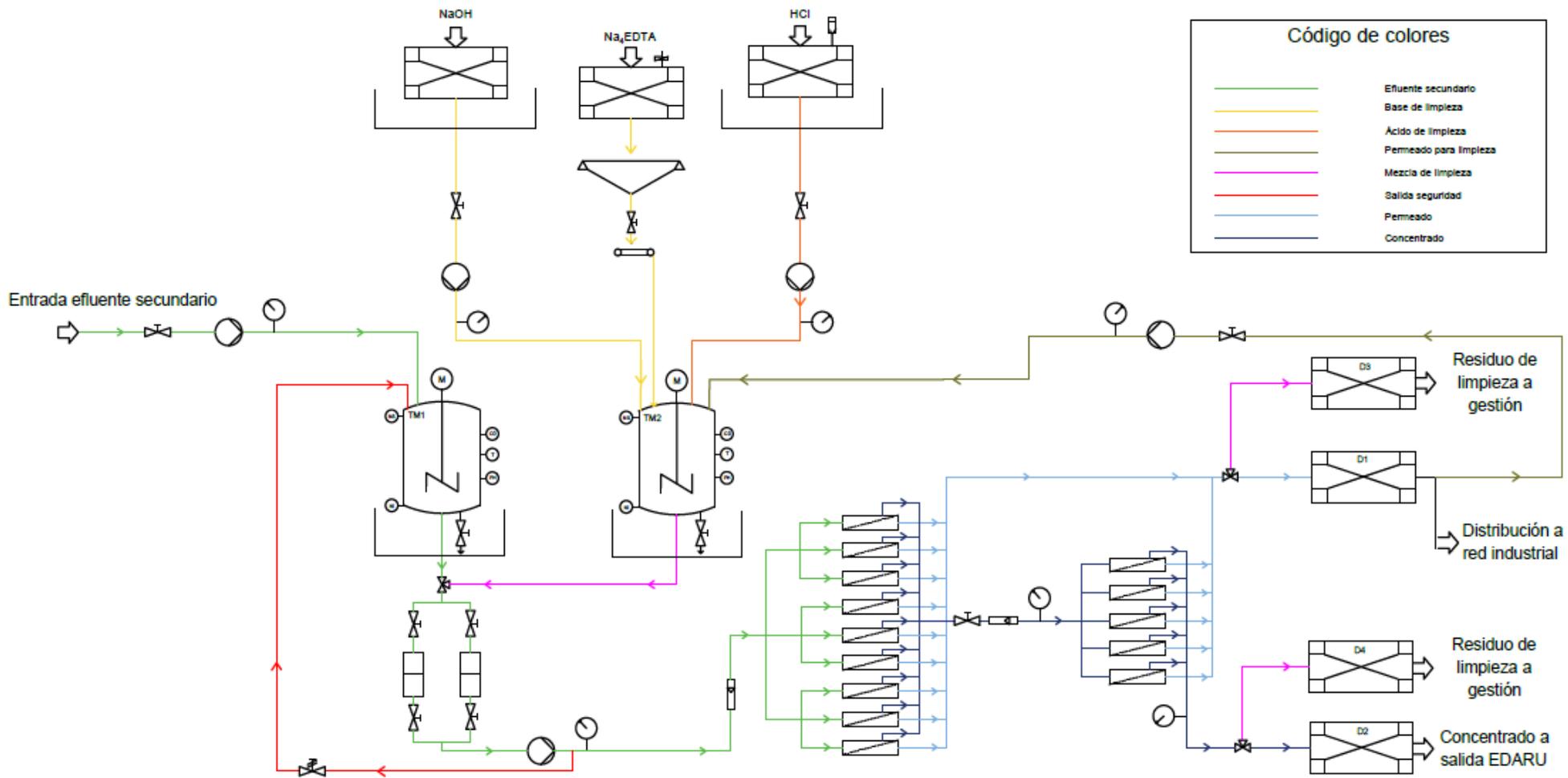
---

## ÍNDICE DE PLANOS

1. Diagrama de flujo de la instalación.....5

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



**LEYENDA**

	Válvula de tres vías		Sensor de nivel superior		Balanza		Depósito		Filtro de polvo
	Válvula de seguridad		Sensor de nivel inferior		Sensor de pH		Filtro de seguridad		Filtro de gases
	Válvula de regulación		Sensor de temperatura		Conductímetro		Tanque de seguridad		Cinta de transporte
	Bomba		Tubo de presión (PV)		Caudalímetro		Tanque de mezcla		Cubeto de seguridad
	Manómetro								

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

# PRESUPUESTO

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

## ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	Presupuesto parcial .....	1
1.1.	Presupuesto de mano de obra .....	1
1.2.	Presupuesto equipos, reactivos e instrumentación .....	1
2.	Presupuesto de inversión de la instalación diseñada.....	5
3.	Presupuesto de ejecución material .....	7
4.	Presupuesto de ejecución por contrata .....	8
5.	Presupuesto base de licitación .....	9

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A 1.	Presupuesto mano de obra .....	1
Tabla A 2.	Presupuesto de equipos .....	2
Tabla A 3.	Presupuesto de reactivos .....	3
Tabla A 4.	Presupuesto de instrumentación .....	4
Tabla A 5.	Presupuesto de inversión - Mano de obra .....	5
Tabla A 6.	Presupuesto de inversión - Equipos y elementos de la instalación .....	5
Tabla A 7.	Presupuesto de ejecución material .....	7
Tabla A 8.	Presupuesto de ejecución por contrata .....	8
Tabla A 9.	Presupuesto base de licitación .....	9

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

---

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

A continuación, se detallará el presupuesto de la instalación que engloba el desarrollo del presente TFM y la construcción de la planta de NF diseñada, partiendo inicialmente de los gastos individuales de mano de obra, equipos y reactivos para, en última instancia y tras aplicar una serie de porcentajes e impuestos, obtener el presupuesto base de licitación del presente trabajo.

## 1. Presupuesto parcial

En este punto se detallan los costes asociados a la mano de obra y a los equipos, reactivos químicos y otros elementos que han sido necesarios para llevar a cabo la elaboración de la parte experimental del presente TFM.

### 1.1. Presupuesto de mano de obra

En este bloque se considerará como mano de obra para la elaboración del TFM el propio alumno, asumiendo el coste horario equivalente al de un ingeniero químico cuyo valor oscila, de media, cerca de 26,7 €/h. Esto se detalla en la siguiente Tabla A 1:

**Tabla A 1. Presupuesto mano de obra**

<b>Código</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Importe (€)</b>
MO01	h	Ingeniero químico	300	26,7	8010
<b>TOTAL</b>					<b>8010</b>

### 1.2. Presupuesto equipos, reactivos e instrumentación

En este apartado se recogerá en Tabla A 2, el coste de los equipos empleados a lo largo del presente TFM, en la Tabla A 3 se recogen los costes asociados a los reactivos empleados y, finalmente, en la Tabla A 4, se encuentran los costes de toda la instrumentación asociada a la elaboración de este trabajo. Es importante puntualizar que el gasto asociado a la planta de NF y el módulo de UF empleado (Tabla A 2) se ha estimado como un alquiler, por ello, el precio indicado es:

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

Tabla A 2. Presupuesto de equipos

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
E01	u	Equipo Jar-Test de Velp Scientifica JLT6	1	1948,10	1948,10
E02	u	Planta de NF	1	5000,00	5000,00
E03	u	Balanza de precisión de Kern	1	798,00	798,00
E04	u	Conductímetro GLP 31+ de Crison	1	114,95	114,95
E05	u	Medidor pH GLP 21+ de Crison	1	708,00	708,00
E06	u	Turbidímetro Dinko	1	895,00	895,00
E07	u	Vórtex agitador de Heidolph	1	426,30	426,30
E08	u	Baño de agua de FALC	1	515,00	515,00
E09	u	Fotómetro NOVA 30 de Merck	1	4346,30	4346,30
E10	u	Espectrofotómetro DR 6000 de Hach	1	9990,00	9990,00
E11	u	Termorreactor TR 300 de Merck	1	940,80	940,80
E12	u	Módulo UF Millipore 300 mL	1	1500,00	1500,00
<b>TOTAL</b>					<b>27182,45</b>

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

**Tabla A 3. Presupuesto de reactivos**

<b>Código</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Importe (€)</b>
R01	u	Reactivos micro BCA	1	422,00	422,00
R02	u	Kit DQO de Merck 10-150 ppm	1	119,00	119,00
R03	u	Antrona 25 g	1	88,20	88,20
R04	u	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98%	1	74,00	74,00
R05	u	NaOH 1 M	1	27,5	27,50
R06	u	Metabisulfito de sodio 97%	1	48,70	48,70
<b>TOTAL</b>					<b>779,4</b>

**Tabla A 4. Presupuesto de instrumentación**

<b>Código</b>	<b>Unidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (€)</b>	<b>Importe (€)</b>
I01	u	Vidrio de reloj (paquete 10 uds)	1	37,00	37,00
I02	u	Cuchara metálica	1	3,75	3,75
I03	u	Vaso precipitados 600 mL vidrio (paquete 10 uds)	1	42,03	42,03
I04	u	Tubos Eppendorf 1,5 mL (bolsa 1000 uds)	1	39,60	39,60
I05	u	Gradilla metálica	1	49,71	49,71
I06	u	Cubetas espectrofotómetro (envase 100 uds)	1	36,51	36,51
I07	u	Filtros de jeringa 0,45 $\mu\text{m}$ (caja 100 uds)	1	51,17	51,17
I08	u	Matraz aforado 100 mL (paquete 2 uds)	1	27,05	27,05
I09	u	Vaso precipitados 50 mL (paquete 10 uds)	1	36,27	36,27
I10	u	Jeringuilla plástico 10 mL (paquete de 100 uds)	1	13,50	13,50
I11	u	Guantes de nitrilo	1	8,23	8,23
<b>TOTAL</b>					<b>344,82</b>

## 2. Presupuesto de inversión de la instalación diseñada

A continuación, se presupuestará la obra de la planta de NF diseñada en el presente TFM desde cero, incluyendo el coste de los equipos y elementos necesarios, así como de la mano de obra para su instalación. Para el cálculo de la mano de obra, se supondrá un período de 3 meses de obra, con 4 semanas mensuales y 40 horas semanales de jornada, haciendo un total de 480 horas. Los tanques D3 y D4 se dimensionan del mismo tamaño que el tanque de mezcla de limpieza. Además, el coste de la carcasa de filtros se ha considerado un precio estimado en vista de los costes de equipos similares. Todo esto se recoge en la Tabla A 5 y Tabla A 6.

**Tabla A 5. Presupuesto de inversión - Mano de obra**

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
MOI01	h	Ingeniero titulado	480	20,47	9825,60
MOI02	h	Jefe de obra	480	14,40	6912,00
MOI03	h	Peón especialista	3360	10,90	36624,00
<b>TOTAL</b>					<b>53361,60</b>

**Tabla A 6. Presupuesto de inversión - Equipos y elementos de la instalación**

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
EE01	u	Tanque mezcla acero galvanizado 150000 L	1	4077,16	4077,16
EE02	u	Depósito permeado acero galvanizado 100000 L	1	3133,73	3133,73
EE03	u	Depósito concentrado 32000 L	1	3678,36	3678,36
EE04	u	Tanque mezcla reactivos 550 L	3	190,89	572,67

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

EE05	u	Válvula Volt BV5095 de tres vías	3	75,45	226,35
EE06	u	Válvula Volt BV5089 de regulación	10	60,63	606,30
EE07	u	Válvula Volt PR4305 reductora de presión	1	1013,53	1013,53
EE08	u	Bomba de circulación de Grundfos	3	4473,00	13419,00
EE09	u	Bomba dosificadora de Denios	2	1076,00	2152,00
EE10	u	Agitador de Traxco	2	275,00	550,00
EE11	u	Medidor pH de PCE	2	135,90	271,80
EE12	u	Sensor de nivel de WIKA	4	405,59	1622,36
EE13	u	Conductímetro de PCE	2	149,90	299,80
EE14	u	Manómetro de 10 bar de WIKA	8	65,56	524,48
EE15	u	Caudalímetro de IFM	1	281,20	281,20
EE16	u	Sensor de temperatura de PCE	2	55,00	110,00
EE17	u	Filtro Dim-Spun014	14	7,92	110,88
EE18	u	Carcasa filtros cartucho de Dimasa	2	10000	20000
EE19	u	Membranas NF 270-400/34i	112	1033,05	115701,60

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ( $Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$ )

EE20	m	Tuberías poliéster reforzado 3''	80	25,20	2016
<b>TOTAL</b>					<b>170367,22</b>

### 3. Presupuesto de ejecución material

En base a los presupuestos calculados en los anteriores puntos 1 y 2, se recoge el presupuesto de ejecución material como la suma de todos ellos, tal y como se recoge en la siguiente Tabla A 7:

**Tabla A 7. Presupuesto de ejecución material**

<b>Descripción</b>	<b>Importe (€)</b>
Presupuesto parcial de mano de obra	8010
Presupuesto parcial de equipos	27182,45
Presupuesto parcial de reactivos	779,4
Presupuesto parcial de instrumentación	344,82
Presupuesto de inversión de mano de obra	53361,60
Presupuesto de inversión de equipos y elementos de la instalación	170367,22
<b>TOTAL</b>	<b>260045,49</b>

#### 4. Presupuesto de ejecución por contrata

Este presupuesto parte del de ejecución material, al cual se le aplica el sobrecoste asociado a los denominados gastos generales (considerado en el presente TFM del 10%) dedicados a cubrir imprevistos y sobrecostos en la obra, así como el beneficio industrial del 4%, como se indica en la siguiente Tabla A 8.

**Tabla A 8. Presupuesto de ejecución por contrata**

<b>Descripción</b>	<b>Importe (€)</b>
Presupuesto de ejecución material	260045,49
Beneficio industrial (4%)	10401,82
Gastos generales (10%)	26004,55
<b>TOTAL</b>	<b>296451,86</b>

## 5. Presupuesto base de licitación

Finalmente, se obtiene el presupuesto base de licitación de la elaboración del diseño e instalación de la planta de NF planteada en el presente TFM tras aplicar los impuestos pertinentes, un 21% del I.V.A., tal y como se recoge en la siguiente Tabla A 9:

**Tabla A 9. Presupuesto base de licitación**

<b>Descripción</b>	<b>Importe (€)</b>
Presupuesto de ejecución por contrata	296451,86
I.V.A. 21%	62254,89
<b>TOTAL</b>	<b>358706,75</b>

Por tanto, el coste total de la elaboración de este TFM y de la construcción de la planta de NF diseñada a lo largo del mismo asciende a TRESCIENTOS CINCUENTA Y OCHO MIL SETECIENTOS SEIS EUROS CON SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS.