



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE UNA INDUSTRIA TEXTIL (70 m³/d) PARA LA ELIMINACIÓN DE FIBRAS Y REUTILIZACIÓN DEL AGUA

AUTOR: JUAN CARLOS SEPÚLVEDA PAREJA

TUTORA: BEATRIZ ELENA CUARTAS URIBE

COTUTORES: JOSÉ ANTONIO MENDOZA ROCA
CARLOS CARBONELL ALCAINA

Curso Académico: 2018-19

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias a mi tutora Beatriz Elena Cuartas Uribe y a mis cotutores: José Antonio Mendoza Roca y Carlos Carbonell Alcaina. Gracias al esfuerzo de los tres, se ha realizado este trabajo con éxito. Quiero hacer una mención especial a Carlos, ya que durante la fase experimental, su ayuda ha sido fundamental para comprender mejor los protocolos de actuación que se siguen en un laboratorio. Además, su ayuda ha resultado de gran importancia para encontrar soluciones a los contratiempos que iban surgiendo durante el desarrollo de los ensayos experimentales.

Quiero agradecer también a todos los profesores que he tenido en estos 4 años de grado. Todos, durante este tiempo, me han transmitido no solo sus conocimientos en diferentes campos, sino también muchos valores que intentaré aplicar en mi vida de ahora en adelante.

También quiero dar gracias a todos los compañeros con los que he compartido este tiempo en la universidad, y en especial a Alba, Alejandro, Álvaro, Carlos, Ester, Guillermo, Laura y Raúl. De todos ellos he aprendido muchísimas cosas, y sobre todo he logrado una amistad que espero dure muchísimo tiempo.

Por último, quiero dar las gracias a mi familia, que desde pequeño me hicieron sentirme muy interesado por el mundo de la ciencia y la tecnología. Sin su apoyo en todos estos años, llegar hasta donde estoy habría sido imposible.

RESUMEN

La industria textil es una de las más importantes del mundo. Este sector utiliza grandes cantidades de agua en las diferentes etapas productivas de sus procesos, que después no pueden devolverse al medioambiente por su contenido en elementos contaminantes.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se realiza el tratamiento de las aguas residuales provenientes de una empresa del sector textil para que puedan ser reutilizadas posteriormente. Para ello, se han estudiado dos técnicas, con el fin de implementarlas en un único diseño: la filtración con materiales filtrantes y la filtración con membranas de nanofiltración.

En primer lugar, se han realizado ensayos de laboratorio. En ellos se ha estudiado el comportamiento del agua residual al filtrarla utilizando diferentes rellenos filtrantes. Para ello, se han determinado los parámetros más adecuados para estudiar el rendimiento del proceso, como los sólidos en suspensión totales, la turbidez, el color o la DQO. De esta forma, se ha podido escoger el material filtrante óptimo teniendo en cuenta los rendimientos de eliminación de dichos parámetros.

Después, el agua obtenida tras la filtración anterior, se ha utilizado como alimento en una planta piloto de membranas de nanofiltración para seleccionar las condiciones de operación apropiadas para maximizar la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual textil.

Tras finalizar la fase experimental, los resultados obtenidos han sido utilizados para diseñar una planta industrial que implemente ambas tecnologías, capaz de tratar un caudal de 70 m³/d.

Palabras clave: Industria textil, aguas residuales, tecnologías de filtración, materiales filtrantes, membranas, nanofiltración.

RESUM

La indústria tèxtil és una de les més importants del món. Aquest sector utilitza grans quantitats d'aigua en les diferents etapes productives dels seus processos, que després no poden retornar-se al medi ambient pel seu contingut en elements contaminants.

En el present Treball de Fi de Grau es realitza el tractament de les aigües residuals provinents d'una empresa del sector tèxtil perquè puguin ser reutilitzades posteriorment. Per a això, s'han estudiat dues tècniques, amb la finalitat d'implementar-les en un únic disseny: la filtració amb materials filtrants, i la filtració amb membranes de nanofiltració.

En primer lloc, s'han realitzat assajos de laboratori. En ells, s'ha estudiat el comportament de l'aigua residual en filtrar-la utilitzant diferents farciments filtrants. Per a això, s'han determinat els paràmetres més adequats per a estudiar el rendiment del procés, com els sòlids en suspensió totals, la turbiditat, el color o la DQO utilitzant tècniques analítiques. D'aquesta forma, s'ha pogut triar el material filtrant òptim tenint en compte els rendiments en l'eliminació de d'aquests paràmetres.

Després, l'aigua obtinguda després de la filtració anterior, s'ha utilitzat com aliment en una planta pilot de membranes de nanofiltració per a seleccionar les condicions d'operació apropiades per a maximitzar l'eliminació de contaminants presents en l'aigua residual tèxtil.

Després de finalitzar la fase experimental, els resultats obtinguts han sigut utilitzats per a dissenyar una planta industrial que implemente les dues tecnologies, i capaç de tractar un cabal de 70 m³/d.

Paraules clau: Indústria tèxtil, aigües residuals, tecnologies de filtració, materials filtrants, membranes, nanofiltració.

ABSTRACT

Textile industry is one of the most important in the world. This sector uses large quantities of water in the different phases of their productive processes, that later can not return to the environment because of its content in pollutant elements.

In this End-of-degree Project, wastewater from a textile company is treated so that it can be reused later. To this end, two techniques have been studied, in order to implement them in a single design: filtration with filter materials, and filtration with nanofiltration membranes.

Firstly, laboratory trials have been made to study wastewater behaviour when filtering it with different filter fillers. In order to do this, the most appropriate parameters have been identified to study the performance of the process, like total suspended solids, turbidity, colour or COD. By doing so, the optimal filter material has been chosen according to the efficiency in the elimination of these parameters.

Afterwards, the water obtained after the previous filtration has been used as feed in a nanofiltration membranes pilot plant to select the conditions of operation to maximize the removal of contaminants in textile wastewater.

After finishing the experimental phase, the results obtained have been used to design an industrial plant that implements both technologies, and capable of treating a flow of 70 m³/d.

Key words: Textile industry, wastewater, filtration technologies, filter materials, membranes, nanofiltration.

DOCUMENTO 1:

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETIVO.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
2.1. Justificación técnica.....	2
2.2. Justificación académica.....	3
3. MARCO NORMATIVO APLICADO.....	4
3.1. Legislación europea.....	4
3.2. Legislación española.....	4
3.3. Legislación de la Comunidad Valenciana.....	5
4. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	6
4.1. Introducción al sector textil.....	6
4.2. Procesos utilizados en la industria textil.....	7
4.3. Características del agua en la industria textil.....	9
4.4. Alternativas de tratamiento del agua residual generada.....	12
4.4.1. Filtración con materiales filtrantes.....	12
4.4.2. Filtración con membranas.....	13
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	15
5.1. Pretratamiento del agua residual.....	15
5.2. Consideraciones sobre los lechos filtrantes.....	16
5.2.1. Gravilla.....	17
5.2.2. Hueso de aceituna.....	17
5.2.3. Arena.....	18
5.2.4. Ensayo de porosidad.....	18
5.3. Caracterización del agua residual tras el pretratamiento.....	19
5.4. Acondicionamiento del agua a la salida del pretratamiento.....	25
5.5. Descripción del equipo de filtración con membranas.....	25
5.6. Fases del proceso de nanofiltración con membranas.....	28
6. RESULTADOS OBTENIDOS.....	32
6.1. Cálculos previos al pretratamiento.....	32
6.2. Resultados del pretratamiento.....	35

6.3. Resultados del acondicionamiento del agua residual.....	43
6.4. Resultados del tratamiento en la planta de membranas de NF.....	48
7. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA	57
8. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.....	58
8.1. Diseño de la etapa de filtración en profundidad	58
8.2. Diseño de la etapa de NF.....	60
8.2.1. Consideraciones sobre la etapa de NF.....	62
8.3. Diseño de los tanques de almacenamiento y de mezcla	62
8.4. Diseño y selección del resto de elementos de la planta	65
8.5. Descripción del proceso seguido en la planta.....	69
9. ESTUDIO ECONÓMICO.....	71
10. CONCLUSIONES	75
11. BIBLIOGRAFÍA.....	76
12. ANEXOS	79
12.1. Resumen de las fichas de seguridad de los compuestos utilizados	79
12.2. Resumen de las simulaciones con el software WAVE.....	86

1. OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo de final de grado es el diseño de una instalación industrial para tratar los efluentes líquidos provenientes de una industria del sector textil centrada en el acabado de pantalones vaqueros, y poder reutilizarlos, reduciendo su impacto medioambiental.

Para conseguir esto, se realizarán en primer lugar ensayos de laboratorio que comprenderán dos procesos físicos: por un lado la filtración convencional empleando diferentes materiales filtrantes y por otro, un proceso de membranas, específicamente de nanofiltración.

En los ensayos de filtración convencional se estudiarán varios medios filtrantes, como gravilla, hueso de aceituna y arena, con el fin de determinar cuál de todos ellos, proporciona un efluente con los porcentajes de eliminación mayores en términos de sólidos en suspensión y DQO

Respecto a los ensayos de membrana, se estudiarán diferentes condiciones de operación con el fin de determinar las condiciones óptimas que contribuyan a obtener un agua producto de calidad adecuada para ser reutilizada nuevamente en el proceso. Así como valorar la tendencia al ensuciamiento de la membrana seleccionada y un protocolo de limpieza si fuera necesario.

Tras los ensayos de laboratorio, el agua obtenida se caracterizará respecto a los componentes de interés para comprobar que cumple con los requisitos necesarios de reutilización impuestos tanto desde las necesidades de calidad del agua de la propia empresa, como de la legislación de reutilización (RD 1620/2007).

Finalmente, estas experiencias permitirán obtener valores de los diferentes parámetros de diseño para la instalación industrial. Finalmente, se llevará a cabo el proyecto de la instalación, mediante la elaboración de planos, de un presupuesto y de todos los cálculos necesarios.

2. JUSTIFICACIÓN.

2.1. Justificación técnica.

El agua es uno de los recursos más abundantes en la Tierra. Ocupa un 71% de la superficie terrestre, y está formada en un 97.4% por el agua salada de los océanos, siendo el 2.6% restante el formado por el agua helada de los polos, las aguas subterráneas y las masas de agua dulce disponibles en la corteza terrestre (ríos, lagos...).

Además, el agua es un recurso imprescindible para la vida: los seres vivos estamos compuestos en torno a un 70% por agua, y cada persona en el planeta gasta de media 700 m³ de agua al año: desde los 100 m³ en países en vías de desarrollo hasta los 2000 m³ en países como EE. UU [1]. Para la raza humana es también un motor de la sociedad: se destina una gran cantidad de agua tanto a actividades industriales, como agrícolas, como domésticas. En concreto, se calcula que un 19% de las extracciones anuales de agua se destinan a las actividades industriales [2].

Si bien las actividades industriales no reciben la mayor proporción de agua extraída anualmente, la presión que ejercen sobre los recursos hídricos es la más importante, pues el agua utilizada en la industria acaba convertida en aguas residuales, y su vertido tiene unas consecuencias medioambientales negativas para el mundo.

Debido a esto, surge la necesidad por parte de la sociedad de reducir el consumo de agua utilizada. En el contexto actual, en muchas empresas se busca un compromiso entre la producción industrial y el respeto al medioambiente. Para lograr esto, se pueden hacer cambios en los procesos productivos: desde la reutilización del agua usada en las diferentes etapas industriales, hasta el tratamiento completo de las mismas antes de ser vertidas al medio.

Centrándose en el sector textil, nos encontramos ante una industria que utiliza el agua como medio principal para la eliminación de tinturas y otros aditivos de sus productos ya terminados. Así, los efluentes que salen de una industria textil son altamente contaminantes por dos motivos: en primer lugar, por las impurezas de las fibras utilizadas. En segundo lugar, por las sustancias químicas utilizadas en los procesos [3]. La dificultad radica en que, debido a la presencia de varios procesos diferentes, se acaban generando varias corrientes contaminadas que se mezclan, dificultando la tarea de descontaminación.

Este trabajo busca combinar una técnica que se utiliza con frecuencia, como la filtración convencional con materiales filtrantes, con la utilización de métodos de filtración no convencionales, como el tratamiento con membranas de nanofiltración. Así, el objetivo es explorar nuevas combinaciones que, aplicadas a la industria textil, permitan generar un proceso sencillo, fácil de trasladar a escala industrial, y con el que poder tratar con éxito la mayoría de los efluentes derivados de este sector.

2.2. Justificación académica.

Dentro del contexto académico, la realización de este trabajo supone afianzar todos aquellos conocimientos que se han ido aprendiendo y reforzando a medida que se iba cursando el *Grado en Ingeniería Química*.

Así, para el correcto desarrollo de este trabajo de fin de grado se han utilizado competencias adquiridas en diferentes asignaturas. Por ejemplo, la capacidad para elaborar un presupuesto de explotación, aprendida en la asignatura de *Proyectos de Ingeniería Química*. Este trabajo también sirve para certificar los conocimientos relativos al desarrollo de planos gráficos, tanto de diseños en planta como de diagramas de flujo, aprendidos tanto en la asignatura anterior como en la asignatura de *Procesos Industriales en Ingeniería Química*. Además, dado que la base de este trabajo es principalmente experimental, es una buena forma de poner en valor todas las competencias logradas durante las diferentes asignaturas de *Experimentación en Ingeniería Química*, desde la forma de trabajar en un laboratorio, hasta la forma de realizar el tratamiento de los datos obtenidos.

Finalmente, cabe destacar que la realización del trabajo de fin de grado requiere de todas aquellas competencias transversales que se han ido adquiriendo durante el grado, tales como el conocimiento de los problemas contemporáneos, el análisis y resolución de problemas de forma autónoma o la planificación y gestión del tiempo, valores sin los que no se podría haber terminado con éxito este trabajo.

3. MARCO NORMATIVO APLICADO.

Como ya se ha avanzado en los puntos anteriores, es necesario realizar un esfuerzo conjunto por todos los sectores de la sociedad para solucionar los retos que supone la correcta gestión de los recursos hídricos.

Así, mientras que por un lado las empresas han tomado medidas para mejorar sus procesos y disminuir el impacto medioambiental que ejercen, desde los estados también se ha desarrollado un marco jurídico con el objetivo de regular todos los aspectos relacionados con el uso del agua. Así, se tienen varios ejemplos, como: identificación de las actividades industriales que deben gestionar las aguas residuales que generan, establecimiento de los límites que los vertidos de la industria no debes sobrepasar para ser considerados seguros, mecanismos para sancionar a las empresas que no cumplan con la legislación, etc.

A continuación, se recogen algunas de las medidas más importantes dirigidas en esta dirección, diferenciando entre la legislación europea, la española y la relativa a la Comunidad Valenciana [4, 5, 6].

3.1. Legislación europea.

- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).

3.2. Legislación española.

- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Resolución de 25 de mayo de 1998, de la Secretaría de Estado de Aguas y Costas, por la que se declaran las «zonas sensibles» en las cuencas hidrográficas intercomunitarias.
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Resolución de 1º de julio de 2006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias.

- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Orden ARM/1312/2009, de 20 de mayo, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado público hidráulico y de los vertidos al mismo.
- Resolución de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias.
- Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.

3.3. Legislación de la Comunidad Valenciana.

- Ley 2/1992, de 26 de marzo, del Gobierno Valenciano, de saneamiento de las aguas residuales de la Comunidad Valenciana.
- Decreto 9/1993, de 25 de enero, del Gobierno Valenciano, por el que aprueba el Reglamento sobre Financiación de la Explotación de las Instalaciones de Saneamiento y Depuración.
- Orden de 1 de abril de 1993 del Conseller de Obras Públiques, Urbanisme i Transports, por la que se establecen las relaciones entre la Conselleria y la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana, para la realización de sistemas públicos de saneamiento y depuración.
- Orden de 9 de noviembre de 1999, del conseller de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes, por la que se establecen las relaciones entre la Conselleria y la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana, para la realización de obras de infraestructuras de abastecimiento de agua.
- Decreto 111/2017 de 28 de julio, del Consell, de modificación del Decreto 170/1992 de 16 de octubre, del Consell, por el que se aprueba el Estatuto de la Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana.

4. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

4.1. Introducción al sector textil.

La industria textil, es aquella encargada de transformar una materia prima, de origen animal (lana, lino...), vegetal (como el algodón) o sintético (como el poliéster), en bienes de consumo como telas, prendas de ropa, calzado, etc.

En un principio, esta industria producía bienes manufacturados, tejidos normalmente a mano, y utilizando lana como principal materia prima. No obstante, a partir de la Revolución Industrial, el sector textil se convierte en una de las industrias que más se desarrolla. Durante esta etapa, se producen varios cambios importantes. Por un lado, la materia prima más utilizada pasa a ser el algodón, importado desde Norteamérica, Egipto y la India [7]. Por otro lado, surgen avances tecnológicos, como los telares mecánicos, que permiten pasar de la producción en pequeña escala a una producción a gran escala, en fábricas, capaz de abastecer la demanda cada vez más creciente de la población.

El desarrollo tecnológico a su vez ha comportado un aumento en el consumo de agua por parte de la industria textil, aunque este varía dependiendo del producto final obtenido. Así, en la Figura 1 encontramos el gasto en agua necesario para fabricar diferentes prendas del sector textil.



Figura 1. Infografía sobre el gasto de agua en la fabricación de diferentes bienes del sector textil [8].

En la actualidad, el sector textil en el mundo está experimentando un gran aumento en la facturación, de aproximadamente el 100%, en los últimos 15 años [9]. Este aumento se debe a varios factores: la creación de nuevos mercados en países en desarrollo, la recuperación económica de los mercados ya existentes, el uso de Internet como gran herramienta logística y la disminución de los costes de producción.

Dentro del ámbito europeo, España ha aumentado su facturación respecto a años anteriores, logrando convertirse en el tercer mayor exportador de Europa [10], aunque en comparación, Europa todavía se encuentra lejos de las cifras de China y Bangladesh, que vuelven a ser los países con mayor facturación debido a sus bajos costes.

Haciendo hincapié en las regiones de España, Cataluña es la región con mayor producción, además de representar el mayor mercado español. La Comunidad Valenciana, por su parte, destaca por ser la región con mayor número de empresas establecidas [11], siendo además la quinta región más exportadora del país [12].

4.2. Procesos utilizados en la industria textil.

Observando en el punto anterior las tendencias de crecimiento en el sector textil, junto con los datos de consumo de agua aportados, surge la necesidad de realizar una revisión del proceso productivo seguido en la industria, haciendo hincapié en el proceso utilizado para la fabricación de pantalones vaqueros, subsector sobre el cual se fundamenta la necesidad de este trabajo.

Para ello, en primer lugar, hay que introducir el concepto de denim. El denim es un tejido plano, compuesto por una mezcla de hilos crudos e hilos teñidos estructurados de forma perpendicular [13]. Este tejido, obtenido a partir del algodón, se hizo muy popular gracias a su comodidad y resistencia. Por tanto, el proceso para la obtención de prendas vaqueras se divide en dos grandes bloques: una transformación desde el algodón hasta el denim propiamente dicho, y después un proceso que convierte el denim en las prendas vaqueras.

En una primera fase, el algodón se transforma en fibras, para lo cual se somete a un proceso de limpieza para eliminar todas las impurezas que contiene este. Después, mediante un proceso de cardado se sueltan las fibras del algodón para facilitar su posterior hilado. Por último, entrelazando las fibras sueltas de algodón, se generan los hilos de algodón, que a su vez serán tejidos de forma perpendicular entre sí para fabricar los tejidos.

Una vez se tiene ya el tejido, comienza la fase de encolado. En esta etapa, se añaden una mezcla de agentes químicos denominados encolantes, como el alcohol de polivinilo o la carboximetilcelulosa, con el objetivo de aumentar la fuerza, resistencia y elasticidad del tejido, y disminuir la generación de electricidad estática [14]. Esta etapa tiene una desventaja, y es que, para poder tintar el tejido, es necesario eliminar estas sustancias después de aplicar sus efectos en el tejido. Para esto es necesario una fase de desencolado, en la que utilizando agua caliente se eliminan estas sustancias. Esto da como resultado una corriente de agua residual con los restos del agente encolante, así como de algunos aditivos y enzimas [15].

A continuación, se llega a una etapa de limpieza, en la cual se vuelve a lavar el tejido, pero esta vez para eliminar impurezas naturales en el tejido, como grasas, proteínas o aceites. Para conseguir esto se añadirán varios compuestos químicos al agua: agentes alcalinos como el hidróxido sódico (NaOH), emulsionantes como los ácidos grasos o sustancias tensoactivas. Todas estas sustancias, junto con los elementos que arrastran, pasan al agua, generando una nueva corriente de agua residual. [15]

La siguiente fase es el blanqueo químico de los tejidos, para lo cual se utilizan diferentes sustancias blanqueantes como por ejemplo el peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Las sustancias blanqueantes utilizadas se recogen con agua para dar lugar a otra corriente de agua residual [15].

En la siguiente etapa, llamada mercerización, se utiliza una disolución de agua e hidróxido sódico (NaOH) con el objetivo de dar un acabado lustroso al tejido. Como resultado, se obtiene una corriente de agua residual con un pH muy elevado [15].

Tras todas estas etapas, el producto ya está listo para someterse al tintado. En esta etapa se utilizan tintes, que son sustancias capaces de añadir color a un material de forma que este no pueda ser fácilmente alterado mediante el lavado o exposición al calor, la luz, etc. Muchos tintes suelen ser compuestos orgánicos, y su origen puede ser tanto natural como sintético [16]. Uno de los tintes más utilizados en la industria de las prendas vaqueras es el “añil” o azul índigo, cuyo componente químico constituyente es la indigotina. Este compuesto puede obtenerse tanto de varias plantas como sintetizado. La estructura molecular del índigo puede observarse en la Figura 2.

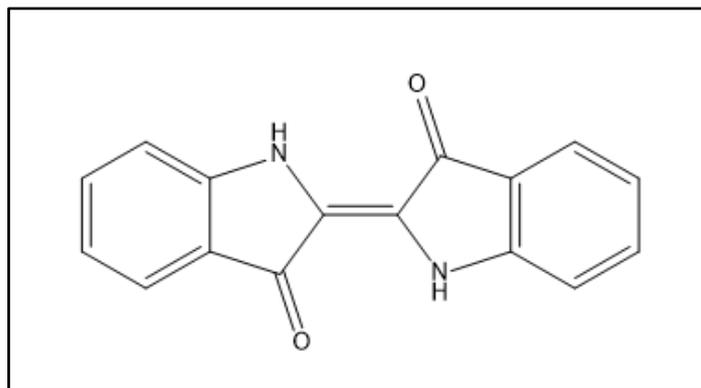


Figura 2. Estructura molecular del azul índigo.

El problema para aplicar el colorante es que este debe estar en una disolución para que pueda ser por la superficie. Además, para facilitar la fijación, se añaden otras sustancias entre las que hay compuestos derivados del azufre [17]. Esto da como resultado una corriente de agua con un pH muy elevado, grandes concentraciones del colorante y la presencia de otros compuestos químicos [15].

Para terminar con los procesos de transformación del algodón al tejido, se hace una etapa de acabado, donde se vuelve a lavar el tejido para eliminar restos de fibras que hayan podido quedar sueltos, así como para darle un acabado lustroso a los tejidos. Así, se genera una corriente de agua residual que además contiene una alta concentración de sólidos en suspensión [15].

Una vez ya se tiene el tejido en su estado final, se cortan las piezas según unos patrones determinados, para dar forma a la prenda vaquera. Se cortan y se cosen, y a continuación se realiza una etapa de lavado en el que se añaden piedras de un determinado tamaño para modificar el aspecto final del pantalón [17].

4.3. Características del agua en la industria textil.

Como ya se ha comentado anteriormente, durante el proceso general para obtener el tejido utilizado en las prendas vaqueras se genera un gran volumen de agua residual. Este se reparte en varios efluentes, con diferentes propiedades cada uno de ellos. Por eso, al final se obtiene una corriente con una gran cantidad de sustancias que contaminan de una forma u otra el medioambiente. Estos son los contaminantes más notables que encontramos en el agua residual de salida [18]:

- **Color:**

La gran mayoría de efectos en el color vienen dados por el agua residual generada durante el proceso del tintado, y en el lavado posterior a este. Este agua es del color del colorante utilizado. El efecto del color es principalmente estético, aunque representa uno de los principales problemas de la industria textil. Esto se debe a que el agua residual tiene altas concentraciones del colorante, y este tipo de compuestos tiene una alta resistencia a la degradación de la luz o de agentes oxidantes.

- **Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Sólidos en Suspensión Totales (SST):**

La presencia de sólidos en el agua está formada principalmente por fragmentos de fibras o restos de partículas coloidales arrastradas durante las diferentes etapas del proceso. Por un lado, tienen un efecto estético en el agua, dando color y sensación de suciedad en el agua, resultando en una disminución en la calidad de la misma. Por otro lado, una alta concentración de SDT y SST puede ser dañina para los seres vivos, impidiendo la reutilización del agua en ámbitos como la agricultura.

- **DBO₅ y DQO:**

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son dos parámetros relacionados con la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual. Son dos parámetros que, relacionados entre sí indican la biodegradabilidad de un agua. Un valor elevado de DBO₅ y de DQO resulta en una elevada contaminación en el agua residual obtenida, que puede acabar siendo tóxica para el medioambiente y para los seres vivos. Por tanto, resulta primordial reducir los niveles de estos dos parámetros.

- **Metales tóxicos:**

La presencia de metales tóxicos en el agua se puede deber a la presencia de los mismos como impurezas derivadas de los productos aplicados al agua. También pueden aparecer si los colorantes utilizados tienen complejos metálicos. La sustancia que más suele encontrarse en estos casos es el Cromo. Como su nombre indica, estas sustancias son tóxicas para el ser humano, las plantas y la vida acuática en general, por lo que se deben eliminar del efluente de agua residual final.

- **Otros compuestos:**

Durante algunas etapas del proceso, se utilizan compuestos tanto derivados del azufre como del cloro. Estos compuestos, en caso de no ser eliminados, pueden reaccionar con el oxígeno del agua, reduciendo su concentración. También se pueden dar reacciones que den lugar a productos tóxicos, por lo que estas sustancias también deben reducirse. Además, la presencia de aceites y grasas separados de la materia prima pueden ser perjudiciales para los equipos utilizados en caso de tratar el agua residual, por lo que tienen una alta prioridad para ser eliminados.

En resumen, las aguas residuales resultantes de los procesos industriales para la obtención de prendas vaqueras tienen unas propiedades incompatibles con la salud de los seres vivos y del medioambiente. En concreto, en la Tabla 1 se han recogido rangos de valores de los parámetros más importantes que suelen tener las aguas residuales a la salida de los procesos de esta industria.

Tabla 1. Características promedio del agua residual de salida de procesos del sector textil [18, 19].

Parámetro	Valor
pH	6 – 10
DQO (mg O ₂ /L)	150 – 12000
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	80 – 6000
Color (Patrón Pt-Co)	50 – 2500
SDT (mg/L)	2900 – 3100
SST (mg/L)	15 – 8000
Temperatura (°C)	35 – 45
[Cl] (mg/L)	1000 – 6000
[SO ₄ ²⁻] (mg/L)	600 – 1000
Aceites y grasas (mg/L)	10 – 30
[Cr] (mg/L)	1 – 4

Observando los datos de la Tabla 1, queda claro que las aguas residuales que se obtienen a la salida de los procesos industriales del sector textil lo hacen en unas condiciones en las cuales no pueden devolverse a la naturaleza sin un tratamiento previo que elimine estos parámetros o al menos los reduzca por debajo de niveles considerados no peligrosos.

No obstante, también cabe destacar que las características de los efluentes del sector textil pueden variar de una empresa a otra, e incluso dentro de una misma empresa. Esto ocurre debido a una combinación de diferentes factores: el tipo de fibras utilizados, las técnicas utilizadas en cada fase del proceso, los compuestos químicos y sustancias auxiliares usados en cada etapa y el artículo a fabricar. Además, las variaciones que se dan de carácter social (cambios en las modas y variación de los gustos según las estaciones) afectan a los factores anteriores, dificultando el establecimiento de una tendencia común en esta industria [19].

El agua a estudiar, proveniente de una empresa de acabado de pantalones vaqueros, sigue la misma tendencia expuesta en el párrafo anterior, por lo que surge la necesidad de estudiar diferentes vías para tratarla y poder reutilizarla en unas condiciones similares a las que tenía en su estado inicial. En el siguiente apartado se detallarán algunos posibles métodos.

4.4. Alternativas de tratamiento del agua residual generada.

A la hora de escoger un proceso para tratar los efluentes de agua residual generados, se debe buscar aquel que optimice una serie de factores entre los que se encuentran los costes de instalación y energéticos, la eficiencia en la eliminación de contaminantes o la necesidad de añadir sustancias auxiliares, entre otros.

Uno de los tratamientos más utilizados es el proceso de fangos activos. Este proceso biológico consiste en el uso de microorganismos en un reactor, capaces de degradar la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Este proceso es denominado aerobio, es decir, que se realiza en presencia de oxígeno. Tras la degradación de la materia orgánica se genera un fango, que en una etapa posterior es separado de la corriente de agua limpia, y recirculado de nuevo al biorreactor, o bien llevado a gestión. [20].

El problema de este método es que la efectividad de este método para eliminar el colorante del agua es muy reducida, lo cual lleva a que, a la salida del proceso, el efluente sigue teniendo el color característico del colorante utilizado [21]. Por esto, se hace necesario explorar otros procesos de tratamiento de agua que puedan evitar este problema.

En el presente Trabajo Final de Grado se ha optado por realizar un tratamiento de dos etapas al agua residual, en primer lugar, un pretratamiento de filtración utilizando materiales filtrantes, y después un tratamiento con membranas de filtración tangencial.

4.4.1. Filtración con materiales filtrantes.

La filtración con materiales filtrantes es un tratamiento de filtración convencional. El principio en el que se basa es el siguiente: el paso de una mezcla sólido-líquido a través de una columna que contiene un sólido (filtro) que retiene las partículas y deja pasar los líquidos (filtrado) [22]. De esta forma, las partículas cuyo tamaño sea mayor al tamaño de los huecos generados en el lecho quedan retenidas en el sistema. A este tipo de filtración, que será la utilizada en la parte experimental de este trabajo, se le denomina "filtración en profundidad".

Así, las partículas del agua residual a tratar se van reteniendo a medida que pasan por el lecho filtrante. Este fenómeno va provocando la obstrucción continua de los huecos generados por el material filtrante. Así, en caso de mantener una presión constante, el caudal de agua filtrada se irá reduciendo, hasta hacer necesario parar el proceso para o bien cambiar el material filtrante, o bien devolverlo a sus condiciones iniciales con un lavado o un método similar.

Existen varios parámetros que se deben caracterizar a la hora de desarrollar una columna de relleno, como la altura de lecho filtrante, o el sentido que sigue la corriente de agua. Pero sin duda, el parámetro más importante es el material filtrante utilizado. Este se escoge a partir de varios factores, destacando entre algunos la granulometría (el tamaño promedio de partícula del lecho) o las

características del agua a tratar. Así, entre los principales materiales filtrantes utilizados se encuentran la arena, el carbón activo activado o la grava de sílex [23].

Las ventajas principales de utilizar este procedimiento son el bajo coste de implementación de un sistema de filtración con material filtrante y el buen rendimiento de eliminación de sólidos en suspensión que tienen en comparación con otros procesos. Por otro lado, la principal desventaja es que, a menos que se instale un sistema de lavado del lecho filtrante, o más de una columna, este debe ser cambiado cuando esté totalmente obstruido, lo que implica que la filtración es discontinua. Además, en ocasiones es necesario añadir productos químicos para conseguir un rendimiento de eliminación alto. Por último, en lo que respecta a este Trabajo Fin de Grado, el sentido de la corriente de agua es de abajo hacia arriba, lo cual implica que algunas partículas puedan elevarse debido a un empuje ascensional y provocar caminos preferentes en el material filtrante, lo cual conlleva una reducción del rendimiento del sistema.

4.4.2. Filtración con membranas.

Los procesos más frecuentemente utilizados en tecnología de membranas se basan en aplicar una diferencia de presiones a la corriente de agua a tratar, consiguiendo separar la corriente de entrada en dos efluentes: el permeado, que contiene solo aquellas partículas capaces de atravesar los poros de la membrana; y el concentrado o rechazo, en el cual quedan todos los sólidos incapaces de atravesar la membrana [24]. Un ejemplo gráfico de este funcionamiento se puede observar en la Figura 3.

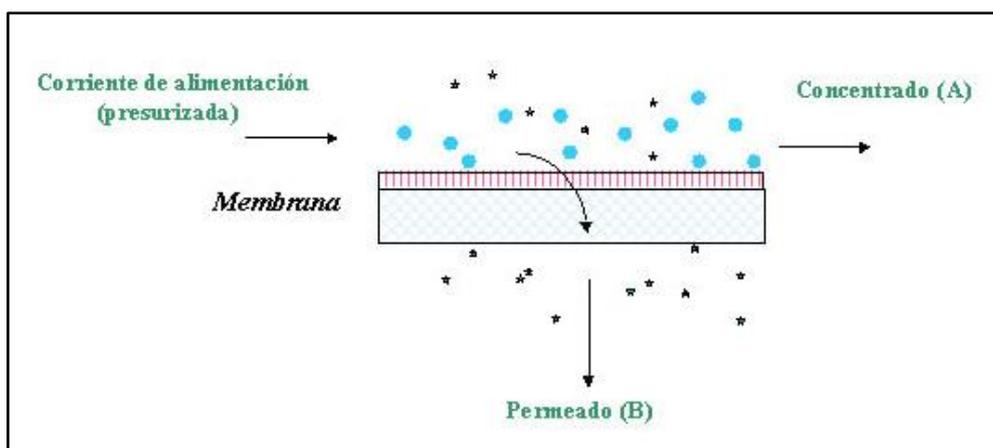


Figura 3. Principio de funcionamiento de un sistema de separación por membranas [24].

Como puede verse en la Figura 3, la filtración con membranas se realiza de forma tangencial (a diferencia de utilizando lechos filtrantes, donde es perpendicular), circulando la corriente de alimentación paralela a la superficie activa de la membrana. Este cambio en el sentido de la corriente resulta positivo, ya que permite que sobre la superficie de la membrana se aumente el espesor de la capa de polarización por concentración, pudiendo operar durante más tiempo y con más eficiencia

[26]. Otra diferencia es que, mientras que los lechos filtrantes están enfocados a la eliminación de partículas en suspensión presentes en un agua residual, las membranas son también capaces de eliminar sólidos disueltos que pueda haber en la corriente de entrada.

Esto resulta interesante ya que, en el proceso textil analizado, uno de los contaminantes principales que hay es el colorante disuelto en el agua en altas concentraciones. Por lo tanto, resulta imprescindible tratar la corriente de agua residual con membranas para conseguir un efluente de salida libre de color.

No obstante, no todos los tipos de membrana son aptos para el tratamiento que se va a diseñar en este trabajo. Existen 4 tipos de procesos de membrana gobernados por la diferencia de presión, de acuerdo con su clasificación según el tamaño de las partículas que retienen. Estas son las membranas de microfiltración (MF), de ultrafiltración (UF), de nanofiltración (NF) y de ósmosis inversa (OI). A continuación, se adjunta un esquema (ver Figura 4) donde, de forma resumida puede observarse el rango de sustancias que cada membrana es capaz de retener.

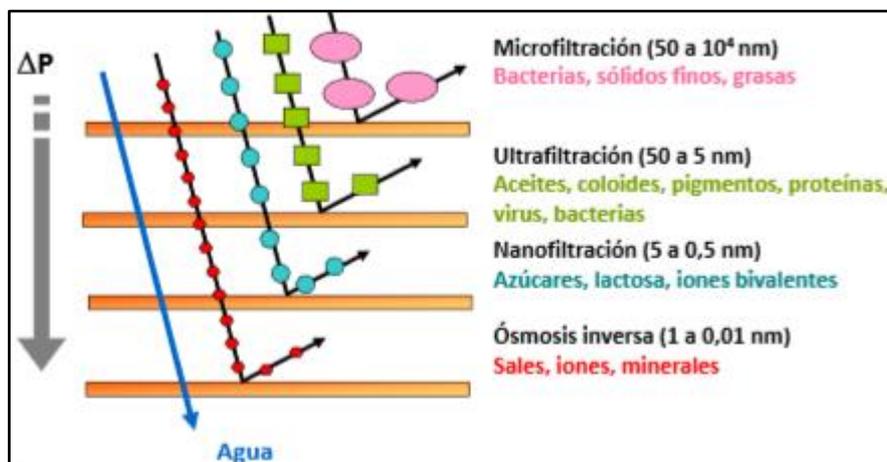


Figura 4. Resumen del tamaño y del tipo de partículas retenidas por los diferentes tipos de membranas [25].

De acuerdo con la Figura 4, los tipos de membrana que más interesan para el diseño de una planta de tratamiento de agua proveniente del sector textil serían las membranas de ultrafiltración, nanofiltración o bien las de ósmosis inversa, ya que por su tamaño de poro (de 50 a 5 nm para las membranas de UF, de 5 a 0.5 nm en el caso de la NF, y de 1 a 0.01 nm en el caso de la OI, proceso este último en el que la membrana se considera densa, permitirían obtener un permeado libre de colorantes, además de eliminar preferentemente sales polivalentes.

La ventaja de utilizar los sistemas de filtración por membrana son muchas. Tienen un gran rendimiento de eliminación de las sustancias contaminantes presentes en el agua, y a diferencia de los materiales filtrantes, no necesitan la adición de productos químicos para conseguirlo. Además, son muy económicas y no requieren de una gran instalación para poder ser utilizadas.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

En este apartado, se describirá en primer lugar el proceso de pretratamiento realizado al agua residual utilizando diferentes materiales filtrantes, con el objetivo de seleccionar aquel que sea el más adecuado a la hora de acondicionar el agua para facilitar su tratamiento posterior.

Para elegir adecuadamente el material filtrante, se indicarán los parámetros con los cuales se caracterizarán las aguas residuales, describiendo los ensayos para determinar cada parámetro, así como los equipos necesarios para realizar los análisis correctamente.

A continuación, se procederá a la descripción de la planta de nanofiltración utilizada, junto con aquellos equipos utilizados durante los ensayos, finalizando con una descripción de las diferentes fases realizadas durante los trabajos con membranas.

5.1. Pretratamiento del agua residual.

En primer lugar, se ha partido de un montaje que incluía un lecho de relleno, con el objetivo de realizar un pretratamiento al agua y eliminar parte de las partículas que la enturbian y contaminan.

El montaje experimental, consta de un depósito en el cual se encuentra el agua residual a tratar (proporcionada por una empresa textil de Valencia Capital) en agitación. Para los ensayos se ha decidido utilizar un volumen de 5 L. Dicho recipiente cuenta con una salida conectada a una bomba peristáltica regulable que aspira el agua del depósito. La salida de la bomba se une con un manómetro para medir la evolución de la presión durante el ensayo.

Después, el agua residual pasa a la columna de relleno por la parte inferior. Se utilizaron 3 materiales de relleno diferentes en la columna: gravilla, hueso de aceituna triturado, y arena proporcionada por la propia empresa. En la parte inferior de la columna se colocó un imán magnético para mantener en agitación el agua y así mantener constante su concentración a la entrada al lecho de relleno. Tanto en la parte inferior como superior del relleno hay un pequeño filtro de reja (sujeto con una goma de fieltro) para mantener el relleno estable y evitar que descienda por la columna o salga con el agua residual ya tratada.

En la parte superior de la columna se tiene una salida desde la cual se recogen las muestras de agua tras pasar por el lecho filtrante, tomando en concreto 30 alícuotas de 100 mL cada una. Por último, también se cuenta con una balanza digital para medir la masa de agua recogida, y un sistema de adquisición de datos encargado de recoger los datos de la balanza cada 5 segundos.

El montaje se puede observar en la imagen de la Figura 4. En la Figura 5, se muestra una imagen ampliada de la columna de relleno, en donde se puede apreciar mejor el imán magnético (agitador) y del filtro de reja.



Figura 5. Esquema general del proceso de filtración con lecho de relleno. Depósito de alimentación (1), bomba peristáltica (2), manómetro (3), columna de relleno (4), sistema de recogida de muestras (5), balanza digital (6), sistema de adquisición de datos (7).

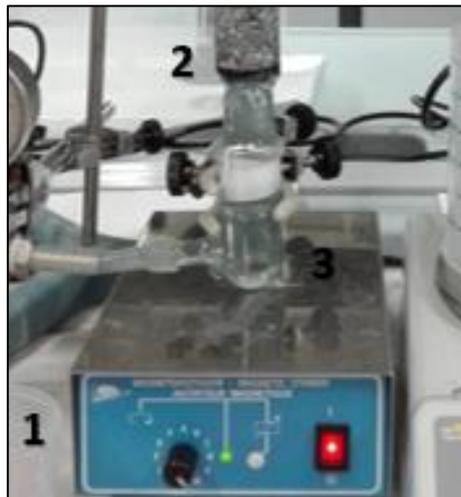


Figura 6. Detalle de la parte inferior de la columna de relleno. Agitador magnético (1), filtro de rejilla (2), imán (3).

5.2. Consideraciones sobre los lechos filtrantes.

Como ya se ha visto en el punto anterior, uno de los elementos más importantes del montaje para el pretratamiento es el material utilizado en el lecho filtrante. Ya fuera la gravilla, el hueso de aceituna o la arena, cada uno de estos materiales ha requerido modificar algunas partes del montaje o añadir nuevas fases en el proceso del pretratamiento.

5.2.1. Gravilla.

A la hora de realizar el pretratamiento utilizando gravilla, se observó que la gravilla tenía muchas partículas de polvo. Esto provocaba, entre otras cosas, una tonalidad marrón claro en el agua, además de que podría haber aumentado la turbidez por encima de los valores esperados. A fin de solucionar esto, se procedió a limpiar la gravilla con agua destilada. Esto se hizo de forma cualitativa, hasta comprobar que el color del agua fuera igual al del agua osmotizada utilizada.

5.2.2. Hueso de aceituna.

El hueso de aceituna triturado, cuyo tamaño promedio de partícula era de 3 mm presentaba bastantes inconvenientes. En primer lugar, la propia naturaleza orgánica del material filtrante añadía el riesgo de que quedaran restos orgánicos en el hueso. Estos componentes orgánicos podrían pasar al agua tratada, resultando en un aumento de la DQO por encima de lo esperado. Para solucionarlo, se realizaron 3 ensayos previos, en los cuales, en vez de pasar el agua residual por el sistema, se utilizó agua osmotizada mezclada con NaOH hasta alcanzar un pH de en torno a 12.5, utilizando en los 3 casos un volumen de 5 litros. Realizando esto, se consiguió reducir la DQO residual del material filtrante hasta valores aceptables. Esta reducción se logró de forma permanente, por lo que en posteriores ensayos ya no sería necesario volver a lavar el hueso con la disolución de NaOH.

En segundo lugar, durante los ensayos previos se comprobó también que, al pasar agua osmotizada mezclada con NaOH, en los instantes iniciales el agua obtenida estaba coloreada con una tonalidad marrón oscuro, muy similar al color del hueso de aceituna. Esto también ocurría cuando se utilizaba agua osmotizada pura. Este color es posiblemente debido a la presencia de restos de polifenoles en el hueso de aceituna, afectando la eficiencia de pretratamiento del agua residual. Para eliminar el color residual que aportaba el hueso al agua, se realizó lo siguiente: un lavado con agua osmotizada mientras se medía el color, hasta que los valores coincidieran con los del agua osmotizada pura.

Como resultado, se observó que a partir de los 5 minutos los efectos del hueso de aceituna en el color del agua eran muy leves, por lo que se decidió proceder de la siguiente forma: a la hora de realizar el pretratamiento, se realizaría una pasada con agua destilada durante 10 minutos, a partir de los cuales se cambiaría el agua del depósito por el agua residual a tratar. De esta forma, el ensayo principal comenzaría cuando ya no hubiera efectos en el color.

Finalmente, se realizaron unos pequeños cambios en el montaje de la columna. Como las partículas de hueso tenían un tamaño muy pequeño, para evitar que por efecto de la gravedad cayeran por la parte inferior de la columna, además del filtro de reja, se puso una pequeña capa de gravilla (cuyo tamaño de partícula es superior), la suficiente para cubrir el filtro. Además, se instaló un segundo filtro de reja en la parte superior de la columna para evitar que las partículas de hueso flotaran y salieran por la parte superior de la columna.

5.2.3. Arena.

La arena, al igual que las partículas de hueso de aceituna, tiene un tamaño de partícula diminuto, por lo que se ha instalado un filtro de reja en la parte superior de la columna para que las partículas de arena no se cuelen por el filtro y sean expulsadas de la columna. Además, se ha puesto una pequeña capa de gravilla en la parte inferior de la columna. Esto se ha hecho para evitar que algunas partículas de arena, en caso de tener menor tamaño que el filtro, puedan descender por la columna llegando al área en el que se encuentra el imán.

Por último, al igual que los otros dos lechos filtrantes, el paso de agua destilada por la arena le daba una tonalidad marrón clara, por lo que se procedió a lavar la arena con agua destilada hasta que, de forma cualitativa, se observaba que el agua de salida era transparente, lo cual se conseguía en apenas 1 minuto.

5.2.4. Ensayo de porosidad.

Paralelamente a las modificaciones aplicadas en cada ensayo de pretratamiento según el material filtrante utilizado, se ha separado una fracción de cada lecho, para realizarles ensayos con el fin de determinar su porosidad efectiva de forma experimental [26]. La porosidad efectiva de un lecho ε , viene dada por la ecuación 1:

$$\varepsilon = \frac{V_{huecos}}{V_{huecos} + V_{particulas}} \quad (Ec. 1)$$

El experimento realizado constaba de las siguientes fases. En primer lugar, se introduce un volumen conocido del lecho filtrante (lecho poroso) en una probeta graduada, y se mide el volumen (V_1). A continuación, se añade una cantidad conocida V_2 de agua osmotizada (y que sobrepase el volumen del relleno) dentro de la probeta. Se obtiene entonces V , el volumen máximo alcanzado por el agua añadida, y ΔV , el volumen de agua por encima de V_1 . A continuación, haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$V = V_1 + \Delta V \quad (Ec. 2)$$

$$V_1 = V_{particulas} + V_{huecos} \quad (Ec. 3)$$

$$\Delta V = V_2 - V_{huecos} \quad (Ec. 4)$$

Y sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en la ecuación 2. Se obtiene V_{huecos} , que sustituido en la ecuación 1, permite obtener la ecuación que describe la porosidad efectiva de un lecho:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V - V_2}{V_1} \quad (\text{Ec. 5})$$

Cabe destacar que, en el caso del hueso de aceituna, debido a que estas partículas absorben parte del agua y se hinchan, provocando una disminución del volumen de huecos, por lo que la porosidad de este lecho se midió al poco de realizar la mezcla de agua y hueso, y a los 10 minutos.

5.3. Caracterización del agua residual tras el pretratamiento.

Tras su paso por la columna de relleno, el agua residual obtenida presenta cambios en sus propiedades. Definir estos parámetros es el primer paso para saber los ensayos que se deben realizar. Como se ha visto en la introducción, existen muchos parámetros de interés en el estudio del agua residual del sector textil. No obstante, los parámetros en los que se hará hincapié son el pH, la conductividad, la turbidez, el color, la DQO y los SST.

- **pH.**

Es un parámetro que mide la concentración de iones hidrógeno $[H^+]$ presente en una disolución. Se utiliza para indicar la acidez o basicidad de una disolución. El rango en el que se mide es entre 0 y 14. A menor pH, más ácida es la sustancia y por tanto más concentración de $[H^+]$ tiene, mientras que a pH altos se considera que la sustancia es básica, resultando esto en una baja concentración de protones. Un pH de 7 indica que la disolución es neutra. Para medir el pH se utiliza la Ecuación 6:

$$pH = -\log[H^+] \quad (\text{Ec. 6})$$

Para realizar las medidas de pH en el laboratorio se dispone de un pH-metro calibrado como el de la Figura 7. Este consta de una sonda que, una vez introducida en la muestra, proporciona una lectura concreta del pH que tiene la disolución en cuestión.

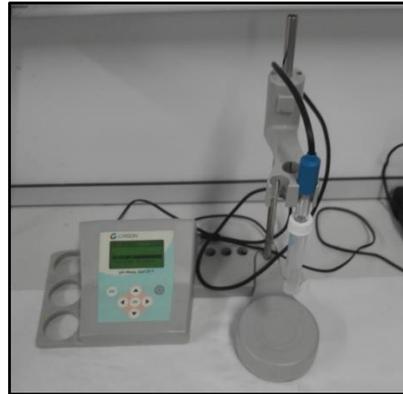


Figura 7. Detalle del pH-metro.

- **Conductividad.**

La conductividad mide la capacidad de una sustancia para conducir el calor o una corriente eléctrica a través de ella. En el agua residual a tratar la magnitud de interés es la conductividad eléctrica, que a su vez depende de otros factores como la concentración de sales disueltas en la sustancia, su temperatura o su densidad.

Para medir la conductividad eléctrica, en el laboratorio se cuenta con un conductímetro calibrado. El conductímetro cuenta con una sonda que, tras ser sumergida en la muestra, proporciona una lectura de conductividad. Para las medidas realizadas, la magnitud se medirá en (mS/cm). El conductímetro se puede observar en la siguiente imagen. (Ver Figura 8).

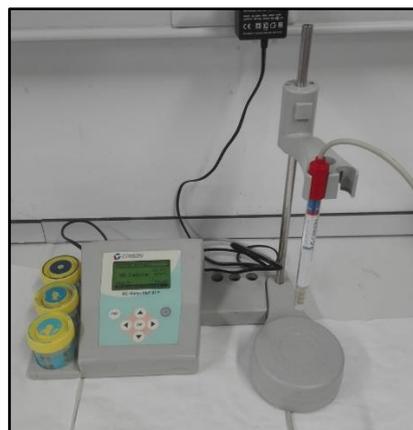


Figura 8. Detalle del conductímetro.

- **Turbidez.**

La turbidez es un parámetro que mide el grado de transparencia del agua a través de la dispersión de una muestra sometida a un haz de luz, que puede verse afectado por la presencia de partículas en suspensión. Es un parámetro muy interesante relacionado con la calidad del agua. Un agua muy

transparente tendrá una turbidez muy baja, mientras que un agua muy sucia tendrá un alto valor de turbidez.

El equipo utilizado para cuantificar el grado de turbidez es el turbidímetro (Ver Figura 9). Este, una vez calibrado, permite introducir una cubeta con el agua a analizar para proporcionar su correspondiente lectura de turbidez. La medida estará indicada en NTU (*Nephelometric Turbidity Units*).



Figura 9. Detalle del turbidímetro.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).**

La Demanda Química de Oxígeno es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido para oxidar todos los compuestos orgánicos presentes en una muestra de agua residual. Para lograr llevar a cabo esta oxidación, se utilizan disoluciones que contienen entre otras sustancias, un exceso de dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$), cuyo ion $Cr_2O_7^{2-}$ oxida las sustancias orgánicas de la muestra. El oxígeno equivalente al $Cr_2O_7^{2-}$ consumido (medido en mg O_2/L) es lo que cuantifica la DQO del agua residual [27].

Para la medir la DQO del agua residual, se utilizaron dos tipos diferentes de kits de Merck para la medida de DQO, cuyo rango se encuentra entre los 25 y los 1500 mg O_2/L para el primer tipo, y entre 15 y 150 mg O_2/L para el segundo tipo. El proceso a seguir, tal y como está indicado en el manual de uso de los kits, es el siguiente: en primer lugar, se agita un vial del kit para mezclar todos los reactivos que vienen en ella. Después, se introducen 3 mL de muestra de agua en el vial. Tras esto se agita el vial, teniendo cuidado ya que, como la reacción que se da es exotérmica, la temperatura del vial aumentará rápidamente. Se debe introducir el vial dentro de un termorreactor como el de la Figura 10. Tras una espera de 2 h, se saca el vial, y se deja enfriar 10 minutos, tras lo cual se volverá a agitar. Por último, pasados 30 minutos, ya se puede efectuar una medida de la DQO en un espectrofotómetro (Ver Figura 10).

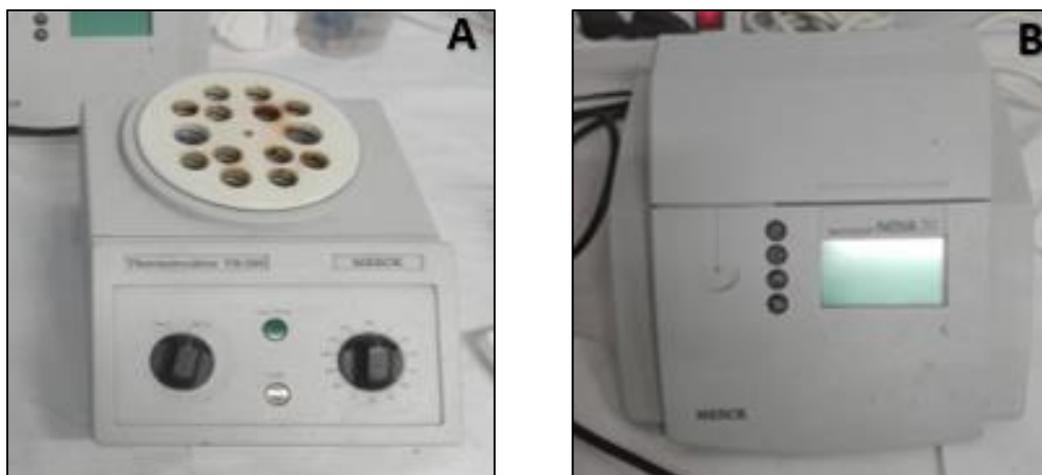


Figura 10. Detalles del termostato (A), y el espectrofotómetro (B).

- **Color.**

En el contexto en el que se desarrolla este proyecto, el color es un parámetro relacionado con la calidad del agua, al igual que la turbidez. El agua residual recibida proviene de un proceso textil, por lo que contiene pigmentos (colorantes), fibras y otros aditivos.

Para medir el color, se utilizará un espectrofotómetro, en el cual se insertan cubetas con agua osmotizada para hacer el blanco. Después, se introducen cubetas con el agua residual. El espectrofotómetro proporcionará medidas de la absorbancia a 3 longitudes de onda diferentes, distribuidas a lo largo del rango del espectro visible. A continuación (Figura 11), se puede observar este equipo en la siguiente imagen.



Figura 11. Detalle del espectrofotómetro.

Para la determinación del color se utilizarán dos parámetros: el *Deutsche-FarbZahl*, un parámetro de referencia utilizado en la industria de colorantes alemana, definido según la UNE-EN ISO 7887 como coeficiente de absorción espectral [28]. Este parámetro viene dado según la Ecuación 7:

$$DFZ_i = 100 \cdot \frac{A_{\lambda_i}}{d} \quad (Ec. 7)$$

Siendo:

DFZ (i) = parámetro DFZ para la longitud de onda i.

$A_{\lambda}(i)$ = Absorbancia de la muestra de agua para la longitud de onda i.

d = espesor de la muestra medida en cm.

El siguiente parámetro es el FZ, también tomado como referencia en la industria textil alemana, aunque de menos importancia que el coeficiente de absorción espectral. Este parámetro viene dado por la Ecuación 8:

$$FZ = \frac{A_{\lambda_{436}}^2 + A_{\lambda_{525}}^2 + A_{\lambda_{620}}^2}{A_{\lambda_{436}} + A_{\lambda_{525}} + A_{\lambda_{620}}} \quad (Ec. 8)$$

Siendo:

FZ = parámetro FZ para la muestra analizada.

A_{λ} = Absorbancia de la muestra de agua para cada longitud de onda.

- **Sólidos en Suspensión Totales (SST).**

En un agua residual, pueden existir partículas, el conjunto de las cuales se suele denominar como "Sólidos Totales", que son aquellos sólidos que se pueden determinar tras evaporación del agua de la muestra. Una subclasificación posible es diferenciando entre aquellos que no se pueden retener en un filtro, llamados "Sólidos Disueltos Totales", y aquellos que sí pueden retenerse en un filtro, llamados "Sólidos en Suspensión Totales" [29]. Este último tipo de partículas son las que se pretende cuantificar en este trabajo.

Para obtener una medida de los SST presentes en el agua residual, se sigue el siguiente proceso. En primer lugar, se prepara una rampa de filtración (Ver Figura 12), donde se colocará un filtro de acetato de celulosa con un tamaño de poro de 0.45 μm (pesado previamente), y se fijará con embudos de acero inoxidable. A continuación, se introduce en el embudo un volumen determinado de agua residual. Tras finalizar la filtración, se deja secar el filtro con las partículas retenidas (Ver Figura 12) en un horno a 105 °C durante un mínimo de 1 hora y media.

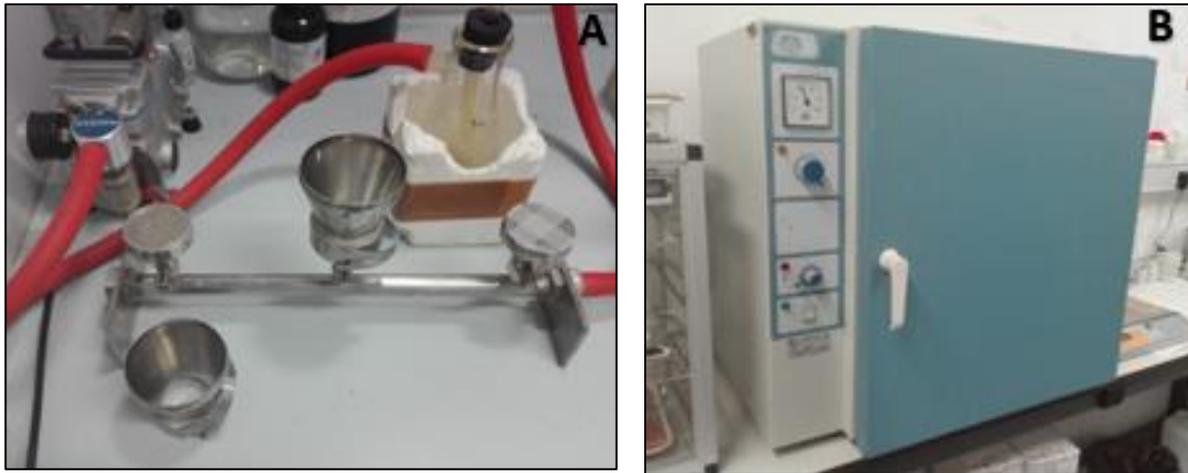


Figura 12. Detalles de la rampa de filtración (A), y la estufa (B).

Tras sacarlo de la estufa, se vuelve a pesar el filtro, que ahora presenta un aspecto diferente (Ver Figura 13). El incremento de masa en el filtro, junto con el volumen de la muestra, permite el cálculo de los SST a partir de la Ecuación 9:

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{1000 \cdot (P_F - P_0)}{V(L)} \quad (Ec. 9)$$

Siendo:

P_F = masa del filtro + masa del residuo seco (g).

P_0 = masa del filtro (g).

V = Volumen de la muestra.

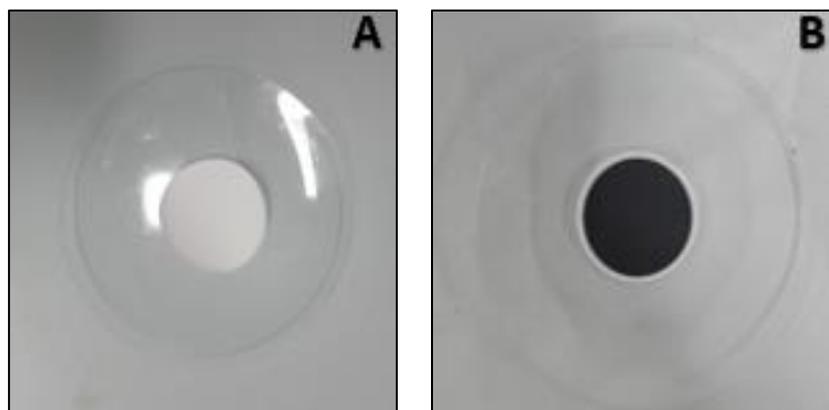


Figura 13. Detalle del filtro antes (A) y después (B) del ensayo de SST.

5.4. Acondicionamiento del agua a la salida del pretratamiento.

Tras realizar el pretratamiento, ya no quedaba suficiente agua proporcionada por la empresa como para poder realizar la filtración con membranas correctamente, por lo que se volvió a la empresa para recoger más agua residual. La naturaleza de las aguas residuales industriales que genera la empresa es variable, por lo que fue imposible conseguir un agua con las mismas características que el agua residual utilizada en los ensayos anteriores con los diferentes lechos filtrantes .

De esta forma, el agua proporcionada en esta ocasión tenía otro color y contaba con unas condiciones de DQO, SST, turbidez y conductividad considerablemente inferiores a las del agua que se había tratado en primer lugar, tanto antes como después del pretratamiento. Debido a esto se hizo necesario un “ensuciamiento artificial” con el objetivo de reproducir parcialmente las condiciones iniciales en las que se encontraba el agua, aumentando la turbidez o las partículas en suspensión presentes en el agua.

Para esto se ha contado con dos recursos. En primer lugar, la empresa también ha proporcionado una masa de fibras coloreadas utilizadas en su proceso, las cuales se pueden añadir para aumentar los SST, la turbidez, el color y la DQO. En el laboratorio también se contaba con NaCl para aumentar la conductividad del agua en caso de que fuera necesario. En segundo lugar, todavía quedaba una cantidad de la primera remesa de agua residual (en torno a 7 L), por lo que se podía considerar realizar una mezcla con el agua sobrante de la primera remesa y con el agua residual recién llegada.

Finalmente, se optó por una mezcla al 35% de agua residual antigua (con un color azul) y un 65% del agua residual recién traída (con una tonalidad negra), obteniendo un volumen de 20 L. Tras la mezcla, se añadieron sal y fibras para corregir todos los parámetros hasta alcanzar unas condiciones muy similares a las que tenía el agua antigua inicialmente.

Finalmente, se finaliza el proceso de acondicionamiento del agua pasándola por el mismo esquema que el presentado en la Figura 5, pero con la diferencia de que esta vez se filtrará todo el volumen de agua residual, y se hará utilizando el lecho filtrante óptimo, lo cual se determinará a partir de los resultados experimentales. Tras filtrar el agua residual, ya se contaba con un agua lista para pasar a la siguiente etapa del proceso, la planta de membranas.

5.5. Descripción del equipo de filtración con membranas.

Una vez acondicionada el agua residual, ya se puede utilizar en la planta de membranas. Esta planta consta de varias partes. En primer lugar, se cuenta con un cuadro de mandos como el de la Figura 14, el cual dispone de un sistema de encendido/apagado en dos pasos. También tiene un regulador con el cual se puede aumentar o disminuir el caudal de entrada de agua al sistema.



Figura 14. Detalle del cuadro de mandos de la planta de nanofiltración.

En la parte frontal de la planta se distinguen dos partes: la inferior y la superior. En la parte inferior de la planta hay un filtro de seguridad, para atrapar cualquier partícula que haya podido permanecer en el agua y evitar que entre al módulo de membranas. También hay una bomba, encargada de aumentar la presión del fluido para desplazarlo por el sistema. Por último, se encuentran dispuestas las tuberías del sistema por las que circulará el agua, contando con varias válvulas de regulación. En la parte superior de la planta hay varios elementos: un caudalímetro (que junto con el regulador del cuadro de mandos permite controlar el caudal del sistema), un sensor de temperatura del alimento y dos manómetros situados en dos puntos del sistema para controlar las diferencias de presión. También hay varias tuberías que conectan la planta con el módulo en el que se insertarán las membranas, así como una válvula con la que ajustar la presión. Todos estos elementos se pueden ver en las Figuras 15 y 16.

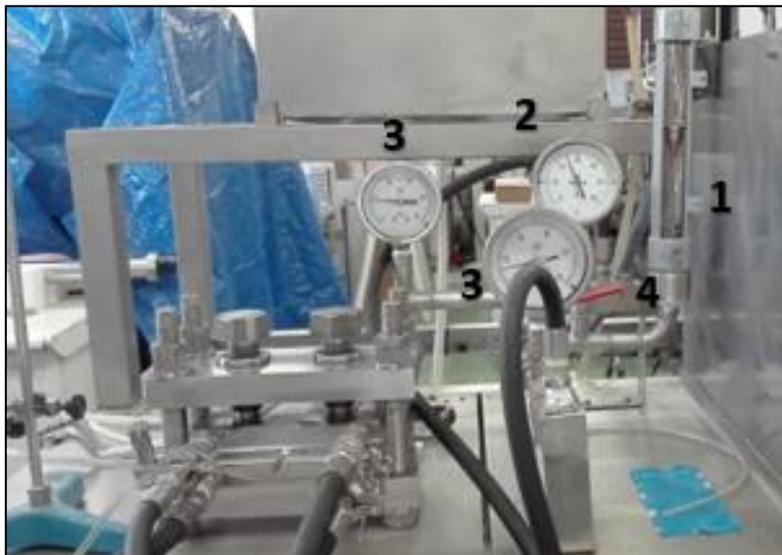


Figura 15. Detalle de la parte superior de la planta. Caudalímetro (1), sensor de temperatura (2), manómetros (3), válvula de ajuste de presión (4).



Figura 16. Detalle del filtro de seguridad (A) y la bomba (B) de la planta de nanofiltración.

En la planta se trabajará con dos membranas, conectadas en un único módulo. El módulo se inserta en un soporte, en el cual se utilizarán dos tornillos para asegurar la fijación de las piezas del módulo y evitar fugas durante los diferentes ensayos. Cada pieza metálica cuenta con varias conducciones por donde entrará el agua alimento y por donde saldrá el agua de rechazo. Mientras que, la corriente de permeado saldrá por unas pequeñas tuberías transparentes. A la hora de montar el módulo, se hará de la siguiente forma: primero se coloca uno de los soportes metálicos. Después, se debe seguir una secuencia concreta, colocando sobre el soporte una lámina metálica para dar estabilidad, seguida de una lámina de teflón, y colocando a continuación la membrana (asegurando que su cara activa está colocada adecuadamente). Se vuelve a colocar una lámina de teflón, y ya se cierra el conjunto con otro soporte. Realizando esto dos veces, el módulo ya está colocado. A continuación, se puede ver un detalle del soporte (Ver Figura 17).



Figura 17. Detalle del módulo de membranas. Soportes (1), tuberías de entrada y salida (2) y salida de permeado (3).

Finalmente, se destacan otros dos puntos de la planta. Por un lado, las salidas de permeado, de idéntica longitud para que el comportamiento en las dos sea lo más similar posible. Estas salidas estarán conectadas a un vaso, cuya masa de agua será medida con una balanza digital y un sistema de adquisición de datos. Para mantener la concentración del tanque de alimentación, las corrientes de permeado y de concentrado se recircularán al depósito del alimento. Por otro lado, el depósito con el alimento, situado en la parte trasera de la planta, y a donde se recirculará el rechazo. Como el control de la temperatura es vital para el éxito de los ensayos, se utilizará un equipo auxiliar, un condensador de “dedo frío” que permitirá controlar la temperatura del alimento y evitar que aumente por encima de los niveles deseados. En la siguiente Figura se pueden observar detalles de estos elementos (Ver Figura 18).



Figura 18. Detalles del equipo de toma de datos (A), la parte trasera de la planta (B) y el condensador de “dedo frío” (C).

5.6. Fases del proceso de nanofiltración con membranas.

A la hora de realizar la filtración del agua residual con membranas, se sigue un proceso que consta de varias etapas. Primeramente, se debe preparar la membrana de nanofiltración. Esta membrana cuenta con una serie de especificaciones técnicas recogidas en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la membrana NF270-4040.

Fabricante	Du Pont
Material de la membrana	Poliamida
Longitud de la membrana (mm)	1016
Diámetro de la membrana (mm)	99
Área de la membrana (m ²)	7.6
Rango de trabajo de pH	2 – 11
Temperatura de trabajo máxima (°C)	45
Presión de trabajo máxima (bar)	41

Para comenzar la preparación, se miden las dimensiones del módulo en el que irán insertadas, se recortan, y se dejan sumergidas en agua destilada durante al menos 24 horas, asegurando que la membrana quede totalmente libre de la disolución conservante con la que viene de fábrica.

La siguiente fase es la compactación de la membrana. En esta etapa, se pondrá la planta de nanofiltración en marcha. El objetivo de este ensayo es trabajar durante 3 horas a una presión superior a la máxima presión de trabajo, con el objetivo de que cuando se caracterice la membrana, los valores obtenidos sean fiables [30]. De esta forma, como durante los ensayos no se superará dicha presión (que en el caso de este trabajo será de 13 bares), la membrana no se deformará más a mitad de ensayo, lo cual podría generar un error en los datos recogidos.

A continuación, se realizará un ensayo experimental para calcular la permeabilidad inicial de la membrana. En esta prueba, se pasará agua osmotizada por el sistema durante 1 hora por cada presión de trabajo, que para este proyecto serán 4, 8 y 12 bares. Previamente al inicio del ensayo, el agua osmotizada se debe calentar hasta una temperatura de 26 °C aproximadamente, para lo que se utilizará una resistencia y un sensor de temperatura como los de la Figura 19. Durante el ensayo se medirá la masa de agua recogida en el permeado para posteriormente calcular el flujo promedio a cada presión. Este parámetro se obtendrá a partir de la ecuación 10. Una vez calculado, se puede obtener la permeabilidad:

$$J_p \left(\frac{L}{h \cdot m^2} \right) = \frac{V_{muestra}}{Tiempo \cdot A_{membrana}} \quad (Ec. 10)$$

Dado que los valores de permeabilidad obtenidos se encontraban por debajo de lo esperado de acuerdo con las indicaciones del fabricante, se repitió el ensayo 2 veces más, alternando cada experiencia con un lavado de la membrana con una mezcla de agua osmotizada y NaOH a pH 10.8 durante 1 hora. Dado que las dos membranas continuaron dando los mismos valores de permeabilidad, se ha considerado que esta discrepancia en los datos de permeabilidad se debe a la naturaleza de la membrana y no a errores durante la preparación de la misma.

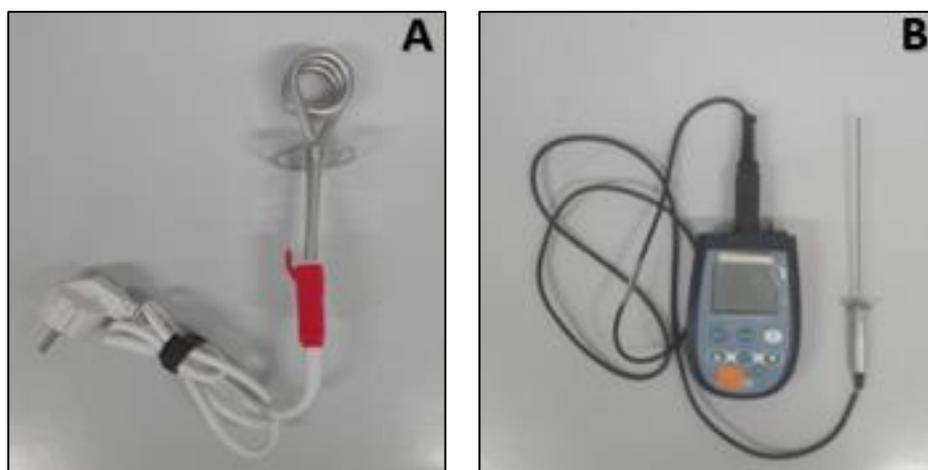


Figura 19. Detalle de la resistencia (A) y el sensor de temperatura (B).

En la siguiente etapa se procede a la etapa de nanofiltración del agua residual acondicionada anteriormente. En esta fase se trabajará 2 horas a cada una de las presiones de trabajo. Antes de comenzar con el ensuciamiento, se pondrá la planta en marcha y se desecharán aproximadamente 2-3 L del rechazo, para desplazar el agua osmotizada que haya podido quedar en los conductos del equipo. Después se volverá a poner en marcha, pero esta vez ya recirculando el alimento. Durante el ensayo, se deben tomar 6 muestras: 1 del permeado y 1 del alimento cada 2 horas, es decir, antes de variar la presión transmembranal y al final del ensayo. Estas muestras se caracterizarán posteriormente para seguir la evolución del agua residual durante el ensayo.

Tras finalizar el ensuciamiento de la membrana, se procede a la recuperación de la membrana. Para ello, se pasará agua destilada por el sistema sin aumentar la presión de la bomba y desechando el rechazo. Cada cierto tiempo se tomarán muestras del rechazo y se medirá la conductividad, hasta que coincida con la del agua osmotizada que habrá en el depósito. Esto será indicativo de que el agua utilizada en anteriores ensayos ya ha sido desplazada y solo queda agua destilada en el sistema. Entonces, comenzará la limpieza propiamente dicha durante 1 hora, recirculando el rechazo. Tras terminar con la limpieza, se repetirá el ensayo de permeabilidad siguiendo el mismo procedimiento explicado con anterioridad. Si la permeabilidad obtenida es al menos el 90% de la permeabilidad original, se puede asumir que la membrana se ha recuperado correctamente. En caso negativo, se deberá realizar una limpieza de la membrana con NaOH y repetir el ensayo de permeabilidad hasta lograr el objetivo.

Tras la caracterización de las muestras obtenidas durante el ensuciamiento anterior, se escogerá una única presión de trabajo. La última fase de operación de la planta de nanofiltración consiste en un ensayo de 6 horas en las que se realizará el ensuciamiento de la membrana a la presión de trabajo escogida. Después de seguir todos los protocolos para desplazar el agua del sistema y poner en marcha la planta, se tomarán 6 muestras del permeado (1 cada hora), y 2 muestras del alimento: una al principio y otra al final. Estas muestras se caracterizarán para controlar la evolución del agua residual tratada.

Finalmente, se repetirá un ensayo de limpieza y permeabilidad para comprobar que la membrana ha recuperado por completo su permeabilidad al agua, y se procederá a la limpieza general de la planta, así como al desmontado del módulo de membranas.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

En el siguiente apartado se procederá a la exposición de todos los cálculos que se han realizado durante el desarrollo del trabajo, ya sea durante la fase del pretratamiento con lechos filtrantes, o durante la etapa de nanofiltración.

Esto incluye todas las caracterizaciones realizadas al agua residual, así como los cálculos relacionados con cada una de las etapas que conforman el uso de la planta de nanofiltración.

6.1. Cálculos previos al pretratamiento.

En el siguiente apartado se expondrán todos aquellos cálculos previos al ensayo de pretratamiento con lechos filtrantes, así como los parámetros independientes del ensayo, como la porosidad. También aparecen en este apartado aquellos cálculos derivados de las complicaciones de cada lecho filtrante para preparar la filtración.

En primer lugar, se decidió trabajar con la potencia mínima proporcionada por la bomba. Lo ideal sería trabajar a una potencia tal que el caudal sea de 10-12 mL/min, lo cual a su vez corresponde con un flujo superficial de entre 0.85-1.02 m³/(m²*h). Pasando agua de muestra por el montaje (sin añadir ningún lecho filtrante) se obtuvieron caudales de entre 46-49 mL/min, lo cual supone un flujo de 3.9-4.86 m³/(m²*h). Es un rango superior al deseado, no obstante, la bomba no permite reducir más el caudal, así que para todos los ensayos se ha trabajado siempre a la potencia mínima, correspondiente a unos 31 rpm en la escala en que trabaja la bomba.

En lo que respecta a las masas de relleno usadas en el pretratamiento, se pueden ver en la Tabla 3.

Tabla 3. Masa de lecho filtrante utilizada en cada pretratamiento.

Ensayo	Masa gravilla (g)	Masa hueso (g)	Masa arena (g)
Gravilla	338.15	-	-
Hueso	22.95	129.17	-
Arena	24.74	-	213.56

Observando la Tabla 3, destaca el hecho de que tanto en el ensayo de hueso como en el de arena se ha añadido una pequeña masa de gravilla. Como ya se comentó en la metodología, esto se hizo para cubrir la parte inferior de la columna, y así evitar que las partículas de hueso y arena (que pueden tener un menor tamaño que los filtros colocados) puedan pasar a la parte inferior del sistema, donde se encuentra el imán agitador, y las conexiones con la bomba.

En la metodología también se comentó que el uso de hueso de aceituna requería varias etapas previas en las cuales se acondicionaba el lecho filtrante para que no afectara negativamente al agua filtrada. En las siguientes tablas se pueden observar los resultados de los análisis de DQO antes y después de los baños con una mezcla de agua y NaOH (ver Tabla 4), así como los resultados de color al lavar el relleno con agua destilada (ver Tabla 5).

Tabla 4. Resultados de DQO en el agua destilada a la salida del lecho antes y después de los ensayos con NaOH al utilizar el hueso de aceituna.

Estado de la muestra de agua destilada	DQO (mg O ₂ /L)
Antes de los ensayos	60
Después de los ensayos	12

Observando la Tabla 4 se justifica el lavado del hueso de aceituna con una mezcla de agua destilada y NaOH a pH 12.5, pues logra reducir la DQO hasta valores aceptables para proceder con el pretratamiento sin problemas. Este valor de DQO de 12 mg O₂/L se tomará como blanco, por lo que posteriormente cuando se obtenga la DQO del agua tras pasar por el sistema habrá que restar este valor.

Tabla 5. Evolución del color en la prueba previa al pretratamiento con el hueso de aceituna.

Tiempo (min)	λ_{436}	λ_{525}	λ_{620}
0	0.06	0.009	0.004
5	0.007	0.001	0.001
20	0.005	0.001	0.001
35	0.003	0.001	0.001
60	0.003	0.001	0.001

A partir de la Tabla 5 se deduce que al menos un lavado de 5 minutos al hueso de aceituna con agua destilada es necesario para que el lecho filtrante deje de teñir el agua que circula por él, pudiendo dar resultados incorrectos en el análisis de color posterior al pretratamiento. No se han adjuntado datos de color de los lavados realizados a la gravilla y a la arena porque estos fueron de carácter más cualitativo, simplemente observando como cambiaba el color. Además, esto se conseguía mucho más rápido que en el caso del hueso de aceituna.

Finalmente, con las medidas tomadas durante el ensayo de porosidad para cada relleno, y recuperando la ecuación 5:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V - V_2}{V_1} \quad (Ec. 5)$$

Se puede calcular la porosidad efectiva (ε) para cada uno de los lechos de rellenos. Todos estos datos se recogen en la Tabla 6.

Tabla 6. Porosidad efectiva de los diferentes materiales filtrantes.

Material filtrante	V ₁ (mL)	V ₂ (mL)	V (mL)	ε
Gravilla	50	50	81	0.380
Hueso (t = 0 min)	55	50	79	0.472
Hueso (t = 10 min)	51	50	79	0.431
Arena	58	42	88	0.207

Las conclusiones que se pueden obtener a partir de la Tabla 6 son las siguientes: en primer lugar, el hueso de aceituna es el lecho más poroso de los 3, seguido de la gravilla, y siendo la arena el relleno menos poroso de todos. Esto, a priori, puede indicar que la arena será el material filtrante que más retendrá las partículas en suspensión que pueda haber presentes en el agua residual a costa de obtener menor caudal de filtrado, pues hay más resistencia al paso del fluido. En segundo lugar, a medida que avanza el tiempo, el hueso de aceituna absorbe parte del agua y se hincha, resultando esto en una disminución de la porosidad, lo cual es coherente, pues a medida que el hueso se va hinchando, va disminuyendo el volumen de huecos libres que hay en el lecho de relleno.

Otro aspecto interesante antes de realizar cada ensayo con cada lecho filtrante es el agua residual proporcionada como alimento. Mientras no está siendo utilizada, el agua residual es preservada en la nevera a una temperatura de unos 4 °C. A esta temperatura se consigue evitar la degradación del agua, no obstante, no es suficiente. Para evitar que el alimento se vaya degradando durante todo el tiempo que dura la parte experimental de este trabajo, se ha optado por caracterizar el alimento antes de cada pretratamiento. De esta forma, se puede ver la evolución del alimento con el tiempo, y a la hora de calcular los rendimientos de eliminación para cada material filtrante, se cuenta con un valor inicial más adecuado. Todos estos datos se recogen en la Tabla 7.

Tabla 7. Evolución de las condiciones del agua residual alimento antes de realizar cada ensayo.

Parámetro	Alimento (ensayo gravilla)	Alimento (ensayo hueso)	Alimento (ensayo arena)
pH	7.22	7.48	7.54
Conductividad (mS/cm)	6.29	6.12	6.18
DQO (mg O₂/L)	332	548	548
Turbidez (NTU)	29.36	32.19	39.82
SST (mg/L)	22.00	28.33	50.71
DFZ (λ_{436})	28.50	32.40	39.40
DFZ (λ_{525})	22.5	26.2	31.1
DFZ (λ_{620})	23.8	28.5	31.6
FZ	0.25	0.29	0.35

Claramente, en la Tabla 7 se observa que algunos parámetros sufren grandes cambios entre ensayos por la degradación que sufre el agua a medida que pasa el tiempo, lo cual justifica el realizar una caracterización al alimento antes de cada ensayo de pretratamiento. El motivo por el que esta tendencia podría darse es que, a medida que pasa el tiempo, los sólidos presentes en el agua residual se van agrupando entre sí, aumentando la cantidad de color, SST y de turbidez. No obstante, destaca la gran diferencia de DQO presente en el agua del ensayo con gravilla en comparación con la de los otros 2 ensayos. Esta diferencia es demasiado alta como para atribuirla a una degradación del agua. En su lugar, el valor tan distinto de DQO podría deberse a un error durante la toma de muestra al recoger un volumen de agua que no fuera representativo por su menor cantidad de materia orgánica.

6.2. Resultados del pretratamiento.

Durante el pretratamiento con los lechos filtrantes, mientras se recogen las muestras, el equipo de adquisición de datos medirá la masa de agua recogida cada 5 segundos. Asumiendo que la densidad del agua será constante e igual a 1000 g/L se puede obtener fácilmente el caudal de salida del agua residual por el equipo. Estos datos se pueden observar en la Figura 20.

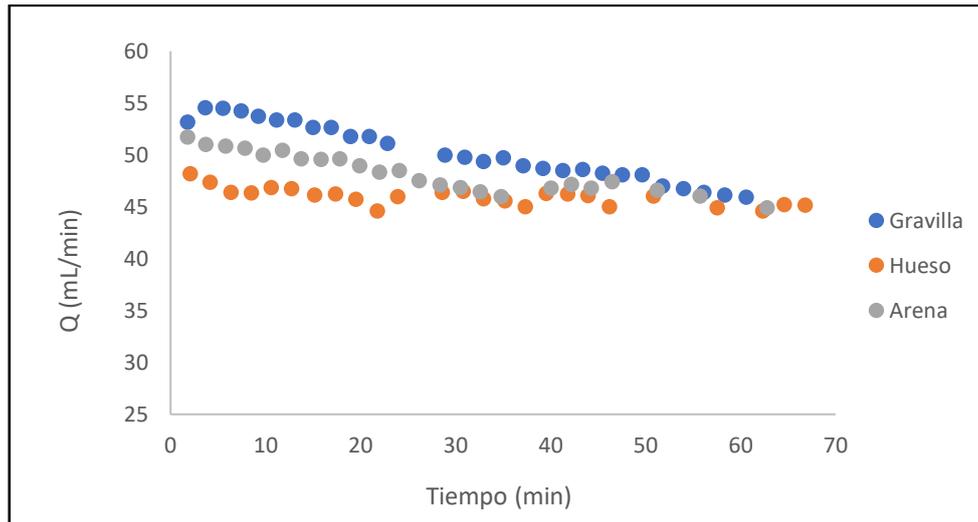


Figura 20. Evolución del caudal de salida frente al tiempo para cada uno de los materiales filtrantes.

La tendencia que se observa en la Figura 20 es clara: a medida que pasa el tiempo, el caudal de salida de agua residual disminuye, debido a que el filtro va reteniendo fibras y partículas en suspensión. Esta caída parece más pronunciada en el caso de la gravilla; donde la disminución se produce prácticamente durante todo el ensayo, mientras que en el caso de la arena la disminución se produce solo en la mitad del ensayo, manteniéndose en un rango de valores constante en la segunda mitad. Por último, destaca el ensayo con hueso, donde el caudal inicial es mucho más bajo que con los otros dos materiales filtrantes, pero a diferencia de estos, con el hueso el caudal apenas disminuye durante el ensayo, manteniéndose prácticamente constante en torno a un valor de 45 mL/min.

Paralelamente, se controló la presión en el manómetro que hay acoplado al montaje durante cada ensayo. Los datos de presión recogidos se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Evolución de la presión durante cada ensayo frente al tiempo.

Material filtrante	ΔP (bar) a t = 3 min	ΔP (bar) a t = 10 min	ΔP (bar) a t = 30 min	ΔP (bar) a t = 60 min
Gravilla	0.04	0.05	0.075	0.1
Hueso	0.03	0.07	0.1	0.1
Arena	0.04	0.08	0.1	0.1

Estos resultados obtenidos indican que la presión aumenta levemente a medida que pasa el tiempo, lo cual es coherente, pues poco a poco, el material filtrante va reteniendo partículas y fibras del agua residual, incrementando la pérdida de carga en el lecho de relleno. No obstante, la presión no aumenta demasiado, lo cual facilita el estudio de la evolución del caudal ya que una alta presión podría provocar

el empuje de las partículas a través del filtro, alterando el caudal. Lo ideal sería trabajar a caudal constante, lo que no se pudo conseguir con el montaje de laboratorio empleado.

Una vez tomadas las muestras necesarias durante el pretratamiento, se procedió a la caracterización de las mismas, obteniendo el valor de los mismos parámetros que en la Tabla 6 para diferentes puntos del ensayo. La evolución de los parámetros se puede observar en las Figuras 21 a 26.

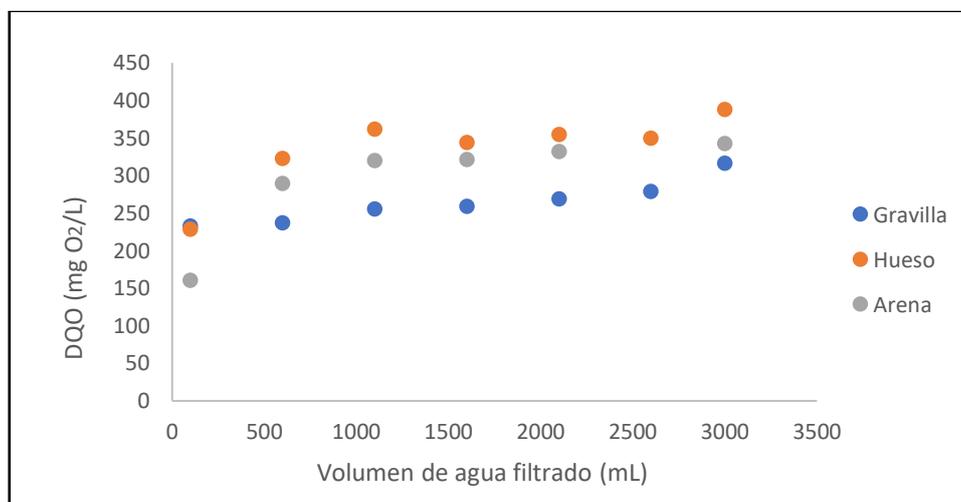


Figura 21. Evolución de la DQO frente al volumen de agua filtrado para cada material filtrante.

En la Figura 21 se aprecia cómo durante todo el ensayo la tendencia que se sigue es un aumento leve de la DQO, sin importar el relleno utilizado. Destaca el primer punto de cada relleno, que es sensiblemente inferior al resto de valores obtenidos. Esto se debe principalmente a que, al recoger la primera muestra de agua tratada, esa agua está compuesta por una mezcla del agua residual a tratar y posibles restos de agua osmotizada que queden en las conducciones del montaje, y que son rápidamente desplazados al comienzo del ensayo. Esta pequeña proporción de agua destilada disminuye la cantidad de materia orgánica en la muestra, resultando en una lectura menor de DQO.

A continuación, se ha representado en la Figura 22 la evolución del pH durante los diferentes ensayos.

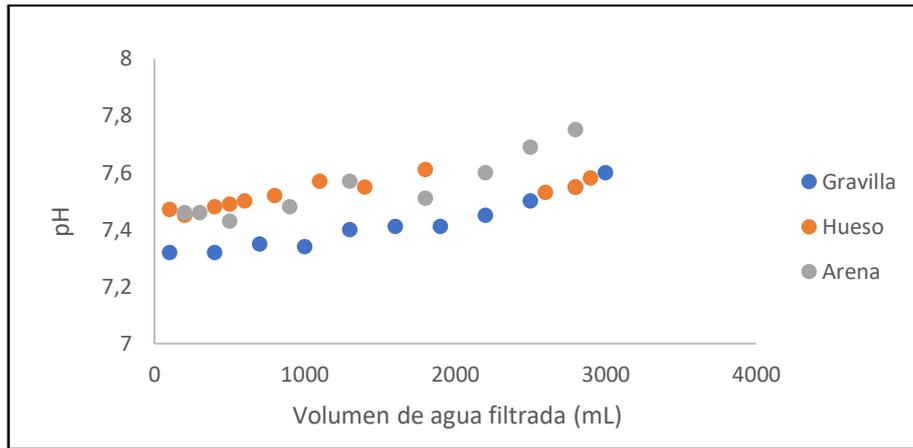


Figura 22. Evolución del pH frente al volumen de agua filtrada para cada lecho filtrante.

Principalmente se observa cómo el pH se mantiene prácticamente constante (entre 7.3 y 7.8). Esto ocurre en los 3 rellenos. por lo que puede decirse que es coherente con lo que cabría esperar, pues se trata de un proceso físico donde no hay cambios de naturaleza química de las sustancias presentes en el agua residual.

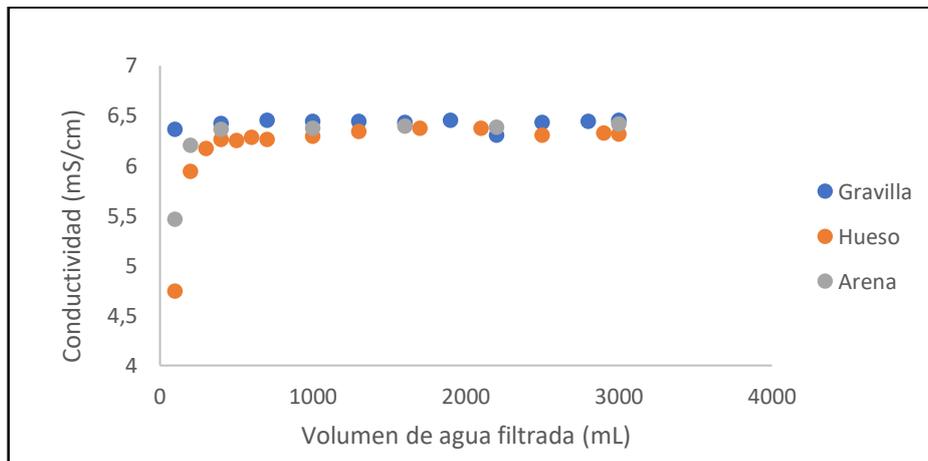


Figura 23. Evolución de la conductividad frente al volumen de agua filtrada para cada lecho filtrante.

Con la conductividad ocurre algo muy parecido a la evolución del pH. La tendencia observada en la Figura 23 es una estabilización muy rápida en valores en torno a 6.35 independientemente del lecho filtrante utilizado. Cabe destacar los primeros puntos, en los cuales se tienen valores más bajos de conductividad, seguramente debidos a que las muestras tomadas tenían una pequeña cantidad de agua osmotizada, que por proporción disminuye el porcentaje de iones presentes en la muestra.

Seguidamente, se han representado los datos de turbidez obtenidos para cada uno de los lechos de relleno. Todos estos valores se exponen en la Figura 24.

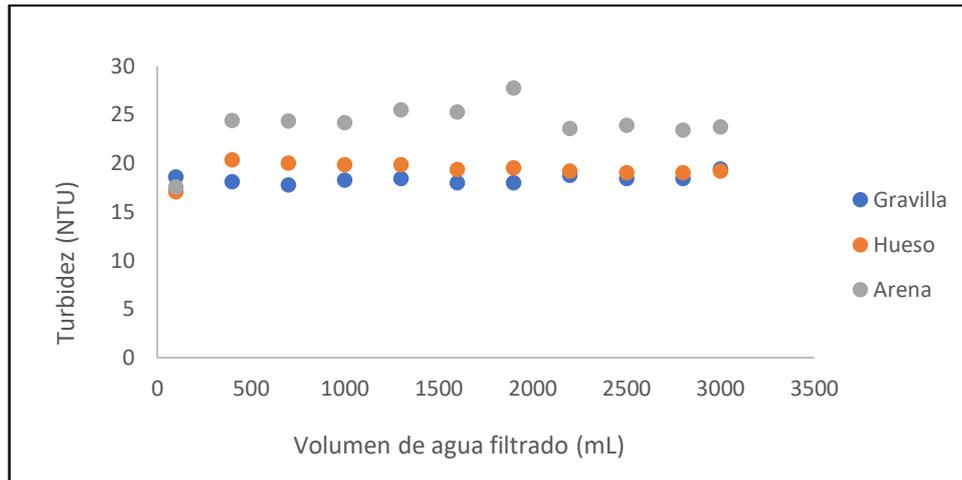


Figura 24. Evolución de la turbidez frente al volumen de agua filtrada para cada lecho filtrante.

De los resultados observados en la Figura 24 se deduce que la turbidez permanece prácticamente constante para los 3 materiales filtrantes. No obstante, en este caso sí que hay una diferencia entre los valores según el relleno, pues mientras que la gravilla y el hueso reducen la turbidez hasta valores de en torno a 18 NTU, la arena estabiliza la turbidez en unos 24 NTU. La primera muestra recogida con la arena como relleno tiene una turbidez mucho menor que el resto de las muestras, posiblemente debido a la presencia de agua destilada que por proporción disminuye la cantidad de partículas en suspensión presentes en la muestra.

Después de esto, se procedió al estudio cualitativo de la evolución del color en función del agua filtrada. Como ya se ha comentado anteriormente, para este apartado se utilizaron dos parámetros: el coeficiente de absorción espectral, al que se denominará como DFZ, y el parámetro FZ, y que se calcularán a partir de las Ecuaciones 7 y 8:

$$DFZ_i = 100 \cdot \frac{A_{\lambda_i}}{d} \quad (Ec. 7)$$

$$FZ = \frac{A_{\lambda_{436}}^2 + A_{\lambda_{525}}^2 + A_{\lambda_{620}}^2}{A_{\lambda_{436}} + A_{\lambda_{525}} + A_{\lambda_{620}}} \quad (Ec. 8)$$

Los datos se encuentran representados en las Figuras 25 y 26.

Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m³/d) para la eliminación de fibras y reutilización del agua.

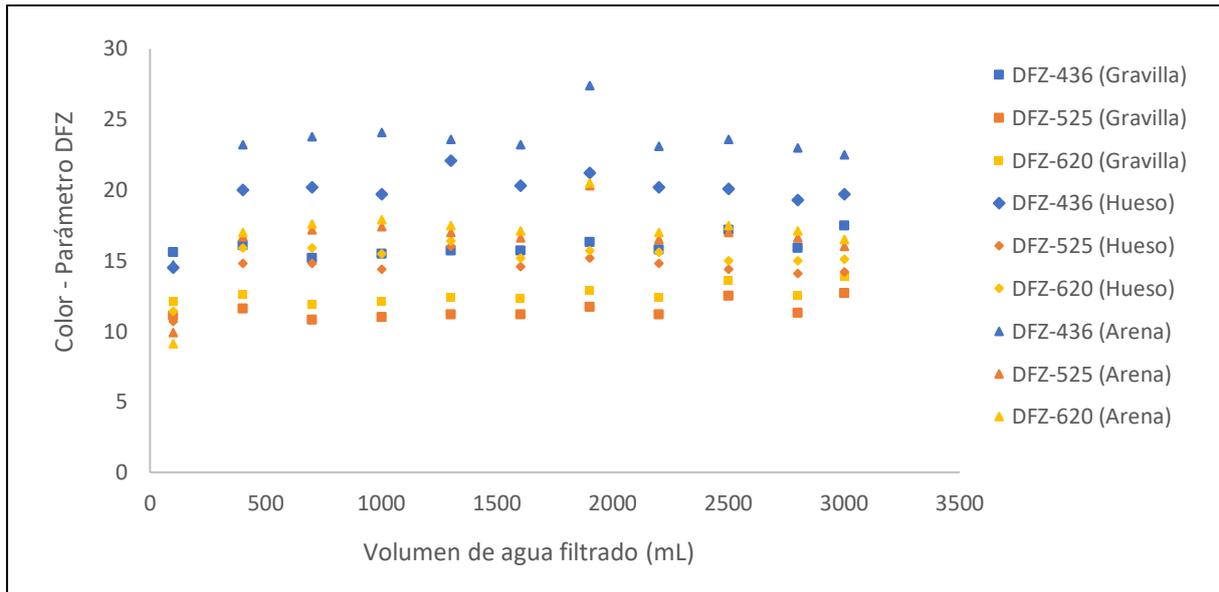


Figura 25. Evolución del color (DFZ) frente al volumen de agua filtrada para para cada lecho filtrante.

En la Figura 25 se observan varias tendencias. Por un lado, la longitud de onda medida con el DFZ-436 (todos aquellos puntos de color azul) es aquella con mayor valor en los 3 lechos filtrantes, muy posiblemente debido a que en este rango del espectro visible se encuentra el color azul, el mismo que tiene el agua residual estudiada. En cuanto a la diferencia entre lechos filtrantes, la gravilla (puntos con forma cuadrada) es aquella con menor valor de DFZ en general, lo cual indica que la gravilla funciona bien para retener las partículas que pigmentan el agua. En cuanto al hueso y la arena (puntos con forma de rombo y triángulo, respectivamente), cuentan con valores bastante similares de DFZ, por lo que no habría diferencias significativas entre utilizar uno u otro.

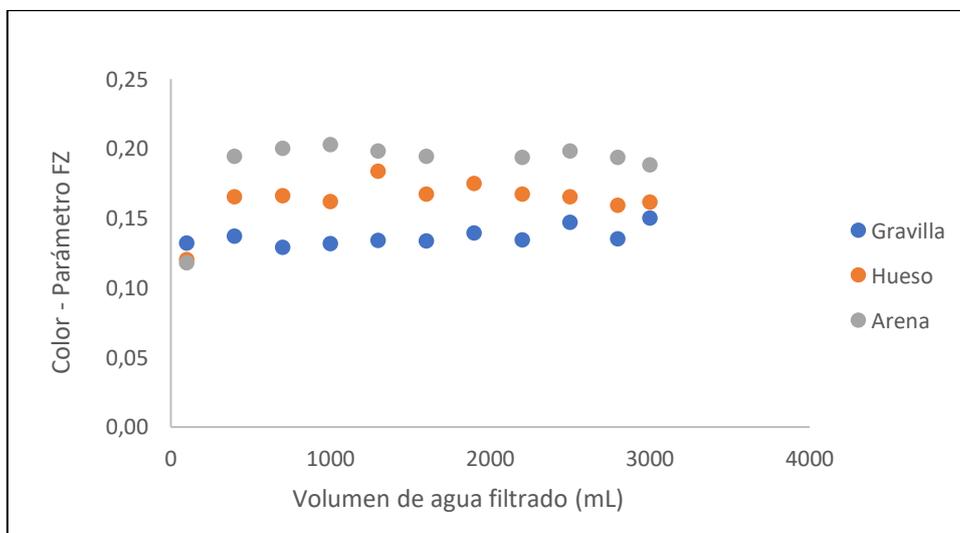


Figura 26. Evolución del color (FZ) frente al volumen de agua filtrada para cada lecho filtrante.

Si realizamos un análisis con el parámetro FZ, se obtienen unos resultados muy similares a los conseguidos con el análisis del DFZ. Se logra una tendencia muy estable, lo cual indica que durante el ensayo no se reduce ni aumenta sensiblemente el color de las muestras. Cabe destacar, eso sí, cómo la gravilla es el relleno que produce un menor valor también en el color, si bien hay que tener en cuenta que los valores de los parámetros del agua residual empleada en el ensayo con gravilla son menores que los medidos en las aguas de alimentación a los otros dos materiales filtrantes.

Finalmente, todos aquellos datos recogidos para realizar el estudio de los SST del agua se han condensado en la Tabla 9 para facilitar la aplicación de la Ecuación 9:

$$SST \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{1000 \cdot (P_F - P_0)}{V (L)} \quad (Ec. 9)$$

Tabla 9. Recogida de datos y cálculos necesarios para obtener la SST de cada lecho filtrante.

Ensayo	Parámetro	Gravilla	Hueso	Arena
Inicial	P ₀ (g)	35.15	35.8979	50.7083
	P _F (g)	35.1522	35.8996	50.714
	V (L)	0.061	0.06	0.085
	SST (mg/L)	22	28.33	67.06
Final	P ₀ (g)	33.1692	36.3826	35.1555
	P _F (g)	33.1704	36.3834	35.1586
	V (L)	0.1	0.1	0.105
	SST (mg/L)	19.67	8	29.52

A partir de los resultados de SST de la Tabla 9 se observa que en el caso de los tres materiales filtrantes se logra una buena eliminación de partículas en suspensión en las muestras de agua residual filtrada. Esta reducción es muy elevada cuando el lecho filtrante utilizado es hueso de aceituna o arena, mientras que al utilizar gravilla los SST apenas se reducen.

Una vez se han realizado todas las caracterizaciones para todos los lechos de relleno, es interesante ver los porcentajes de eliminación/reducción de los parámetros estudiados en cada uno de los materiales filtrantes usados. De esta forma, se puede ver en qué aspectos destaca cada material filtrante, lo cual es primordial a la hora de elegir el óptimo para el diseño final de una instalación. Estos datos de rendimiento se obtendrán utilizando la Ecuación 11.

$$\eta(\%) = \frac{A - B}{A} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 11})$$

Siendo:

A = valor del parámetro al inicio.

B = valor del parámetro al final.

Así, en la Tabla 10 se recogen todos los rendimientos calculados:

Tabla 10. Resumen de los rendimientos de eliminación para cada uno de los materiales filtrantes.

Parámetro	Reducción del parámetro (%)		
	Gravilla	Hueso	Arena
DQO (mg O₂/L)	4.82	29.38	37.59
Turbidez (NTU)	33.86	40.42	40.41
SST (mg/L)	10.58	71.76	55.98
DFZ (λ_{436})	38.60	39.20	42.89
DFZ (λ_{525})	43.56	45.80	48.55
DFZ (λ_{620})	41.60	47.02	47.78
FZ	40.54	41.94	45.41

A partir de los resultados de la Tabla 10 se puede concluir que, en lo que respecta al color y a la turbidez, los 3 lechos de relleno reducen estos parámetros en una proporción similar. Por otro lado, analizando los rendimientos de eliminación de la DQO y de los SST, sí que se observa que la gravilla tiene un rendimiento mucho inferior a los otros dos materiales filtrantes. Se da también el caso de que, mientras que el hueso funciona mucho mejor que la arena para eliminar los SST del agua residual, utilizar la arena como material filtrante resulta en una mayor reducción de la DQO del agua a tratar.

No obstante, teniendo en cuenta todo lo expuesto en los apartados anteriores para cada uno de los rellenos filtrantes, se considera que la arena es el relleno óptimo para realizar el pretratamiento, por lo que se ha seleccionado este material, y es el que se utilizará en adelante cuando haya que realizar el pretratamiento de nuevo.

6.3. Resultados del acondicionamiento del agua residual.

Como ya se ha comentado en la metodología, al finalizar los ensayos con los materiales filtrantes, ya no se disponía de suficiente agua para poder desarrollar con garantías todos los ensayos en la siguiente fase. Es por esto por lo que se recibió una nueva remesa de agua de alimento, que se abreviará como “agua negra” por su color. Esta se caracterizó siguiendo todos los ensayos ya descritos. Los resultados se recogen en la Tabla 11, donde además se adjuntan también los datos del sobrante de agua, a la que se llamará “agua azul”, para facilitar la comparación.

Tabla 11. Caracterización de los dos tipos de agua utilizada como alimento.

Parámetro	Agua “azul”	Agua “negra”
pH	7.22	7.87
Conductividad (mS/cm)	6.29	1.14
DQO (mg O ₂ /L)	332	76
Turbidez (NTU)	29.36	24.96
SST (mg/L)	22	1.5
DFZ (λ_{436})	28.5	18.3
DFZ (λ_{525})	22.5	15.2
DFZ (λ_{620})	23.8	13.0
FZ	0.252	0.158

Las diferencias que se observan en la Tabla 11 son muy evidentes. El agua negra, en su estado inicial, contaba con valores de DQO, turbidez, SST y color muchísimo menores a los que tenía el agua azul. Estos valores eran incluso inferiores a los que se obtenían tras filtrar el agua residual azul. También destacaba el valor de conductividad, que en el caso del agua negra era casi 6 veces menor al del agua azul. Con el objetivo de conseguir que el agua negra tenga unas propiedades similares a las del agua azul tras el pretratamiento, se procedió a mezclar 7 litros de agua azul y 13 de agua negra. Esta mezcla, tras su caracterización, dio los resultados que se pueden consultar en la Tabla 12.

Tabla 12. Caracterización de la mezcla de agua negra y azul.

Parámetro	Agua mezclada	Agua mezclada corregida
		$m_{\text{NaCl}} = 0.183 \text{ g}$
pH	7.97	7.72
Conductividad (mS/cm)	3.14	6.01
DQO (mg O₂/L)	208	269
Turbidez (NTU)	28.34	28.1
SST (mg/L)	9.33	7.45
DFZ (λ_{436})	21.9	22.6
DFZ (λ_{525})	17.9	18.2
DFZ (λ_{620})	17.0	16.6
FZ	0.192	0.195

De la Tabla 12 se puede extraer que la mezcla de las dos aguas resulta positiva, pues ya se logran unos valores de los parámetros aceptables, exceptuando la conductividad, la cual en la misma tabla se encuentra corregida tras añadirle NaCl. Con el agua ya preparada, se procede a realizar el pretratamiento de los 20 L de agua con el lecho relleno de arena como material filtrante, para conseguir ya unas condiciones de salida homogéneas con las que pasar a trabajar en la planta de membranas.

En este ensayo de pretratamiento se realizarán los mismos controles que en los anteriores: de caudal y presión durante la toma de muestras, y una posterior caracterización del agua recogida. La principal diferencia es que ahora no se recogerán alícuotas de 100 mL, sino que se hará la filtración en el relleno durante 7 horas. Debido a la gran cantidad de datos de caudal recogido, se ha decidido acotar los datos por franjas para analizar la variabilidad de las mismas y obtener una tendencia más clara. Esta evolución puede observarse en la siguiente imagen (Ver Figura 27):

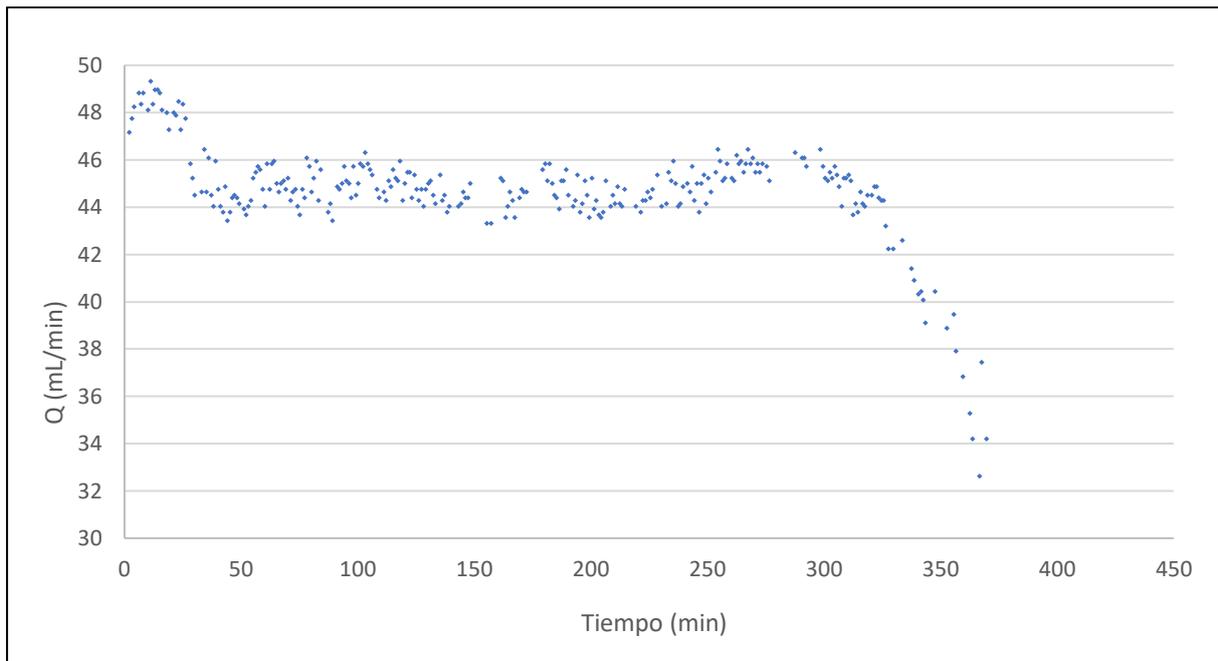


Figura 27. Evolución del caudal frente a tiempo con arena como lecho filtrante.

A la vista de la representación de la Figura 27, se distinguen 3 fases en el comportamiento de los datos de caudal de filtrado. En primer lugar, durante los primeros 50 minutos, el caudal de salida disminuye de 49 a 45 mL/min. Esta reducción es debida principalmente a la progresiva acumulación de los solutos en la columna de relleno. A continuación, se tiene una fase en la cual el caudal permanece constante en un rango de entre 43 y 45 mL/min, destacando eso sí, la gran variabilidad en los datos. Como se verá posteriormente en el análisis de la presión del sistema (Ver Figura 28), este comportamiento en el caudal se debe a que, aunque la columna se encuentra con acumulación de sólidos, la bomba lo compensa evita que el caudal disminuya más. Por último, aproximadamente a partir de los 300 min, el caudal disminuye de forma muy pronunciada. Experimentalmente, se comprobó que, a partir de este punto, la bomba no era capaz de bombear correctamente el agua residual por la columna, y sufría paradas continuas (cada pocos segundos).

Este comportamiento indica que, a partir de los 300 minutos, el relleno se puede considerar “agotado”, y es en este punto en el que habría que parar el ensayo y proceder a la limpieza de la columna, eliminando las partículas retenidas y sustituyendo el material filtrante tras un número de ciclos de operación determinados.

A continuación, en la Figura 28 se ha representado la evolución de la presión manométrica en función del tiempo de ensayo transcurrido.

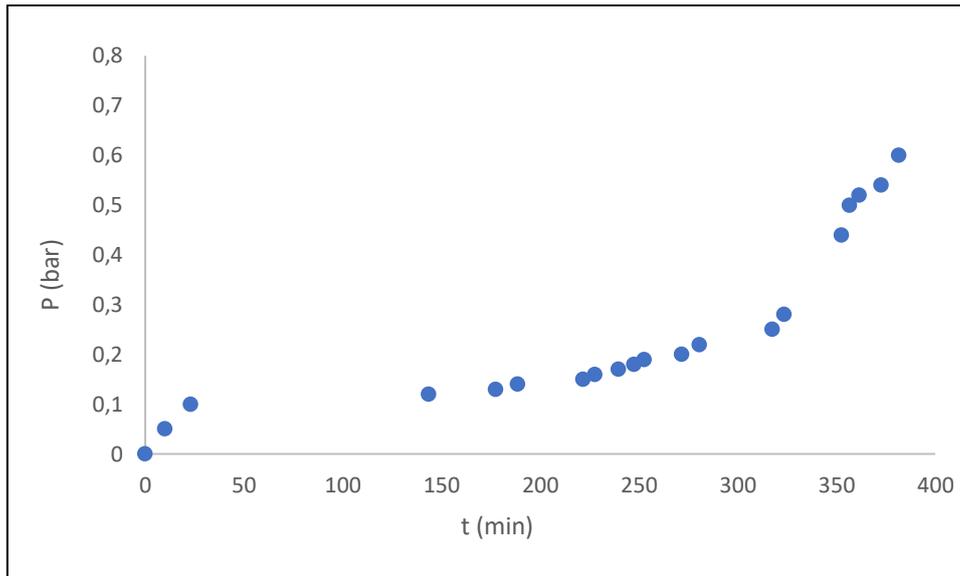


Figura 28. Evolución de la presión frente al tiempo con arena como lecho filtrante.

En comparación con la Figura 27, en esta imagen también se observan diferentes fases. En la primera fase, la presión va aumentando a un ritmo muy suave, razón por la que en el caudal se logra un rango de valores constante, pues la bomba va ejerciendo poco a poco más presión y de esta forma se compensa el atascamiento de la columna. No obstante, en torno a $t = 300$ minutos, la presión aumenta drásticamente debido a que ya no es capaz de bombear correctamente el agua residual por la columna. A pesar de que no están registrados en la imagen, durante el ensayo se alcanzaron picos de hasta 0.85 bar, aunque muy puntuales.

Tras terminar, se ha realizado la caracterización del agua residual obtenida, y se ha procedido a calcular los porcentajes de reducción para cada uno de los parámetros estudiados. Estos datos se pueden comprobar en la Tabla 13.

Tabla 13. Resumen de los parámetros estudiados y rendimientos de eliminación.

Parámetro	Agua mezclada	Agua mezclada tras filtración	Rendimiento de eliminación (%)
pH	7.72	7.82	-
Conductividad (mS/cm)	6.01	6.16	-
DQO (mg O₂/L)	269	150	44.24
Turbidez (NTU)	28.1	22.67	19.32
SST (mg/L)	7.45	0*	100
DFZ (λ_{436})	22.6	15.4	31.86
DFZ (λ_{525})	18.2	11.9	34.62
DFZ (λ_{620})	16.6	10.5	36.75
FZ	0.195	0.129	33.55

Estudiando los resultados obtenidos en la Tabla 13, se observa que los rendimientos de eliminación son similares a los obtenidos anteriormente (para el “agua azul”).

Destaca sin embargo el rendimiento de eliminación del 100% obtenido para los SST. Esto se trata realmente de un error experimental, pues se dio el escenario de que la masa del filtro tras retener sólidos en suspensión y pasar por la estufa era menor que la propia masa del filtro. Este error suele ocurrir cuando la muestra apenas tiene sólidos en suspensión, siendo sencillo que la estufa evapore los pocos sólidos retenidos que hay, así como alguna capa superficial del filtro. También puede deberse a un error experimental durante la pesada del filtro, por una mala calibración de la balanza electrónica, etc. Una forma de solucionar este error sería aumentando el volumen de muestra filtrado, que en este caso fue de 0.15 litros.

No obstante, tras todos estos pasos, se considera que el agua residual recibida ya está preparada para ser tratada en la planta de membranas de nanofiltración.

6.4. Resultados del tratamiento en la planta de membranas de NF.

En primer lugar, se calculó el caudal de trabajo de alimentación de la planta de membranas. Para ello, en primer lugar, se ha obtenido la sección perpendicular al flujo de agua que entra a la membrana. Para ello, se ha fijado una velocidad de trabajo de 1 m/s y se ha utilizado la Ecuación 12, para luego calcular el caudal que hay que fijar en la planta de membranas, utilizando la Ecuación 13:

$$Sección_{tangencial_membr} (m^2) = Ancho \cdot Espesor \quad (Ec. 12)$$

$$Sección_{tangencial_membr} = 0.08 \cdot 0.001545 = 1.236 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$Q \left(\frac{L}{h} \right) = Sección_{tangencial_membrana} \cdot v_{agua} \cdot 3.6 \cdot 10^6 \quad (Ec. 13)$$

$$Q = 1.236 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 3.6 \cdot 10^6 = 444.96 \approx 445 \frac{L}{h}$$

Así pues, al trabajar con la planta de membranas de NF, se hará trabajando a este caudal. Otro parámetro muy importante es el área efectiva de la membrana, que viene dada por la siguiente Ecuación 14 (se debe tener en cuenta que se trabaja con 2 membranas):

$$A_{membrana} (m^2) = 2 \cdot Ancho \cdot Largo \quad (Ec. 14)$$

$$A_{membrana} = 2 \cdot 0.605 \cdot 14.9 \approx 0.018 m^2$$

A continuación, se realiza el ensayo de permeabilidad al agua, para lo cual se necesita calcular el flujo promedio de permeado conseguido para cada una de las presiones de trabajo. Para calcular el flujo se recupera la Ecuación 10:

$$Jp \left(\frac{L}{h \cdot m^2} \right) = \frac{V_{muestra}}{Tiempo \cdot A_{membrana}} \quad (Ec. 10)$$

Cabe destacar que para la Ecuación 10, el área de membrana utilizada se corresponde con el área activa de la membrana, calculada anteriormente con la Ecuación 14. Los datos de densidad de flujo de

permeado se han corregido para tener en cuenta el efecto de la temperatura, y se han recogido en la Tabla 14. Además, los datos de flujo se han representado en la Figura 29.

Tabla 14. Resumen de los valores de flujo de permeado obtenidos.

Ensayo	J _p (L/h·m ²)	J _p (L/h·m ²)	J _p (L/h·m ²)
	ΔP = 4 bar	ΔP = 8 bar	ΔP = 12 bar
Prueba 1	22.97	39.37	52.24
Prueba 2	21.247	37.806	49.289
Prueba 3	22.509	37.739	50.319

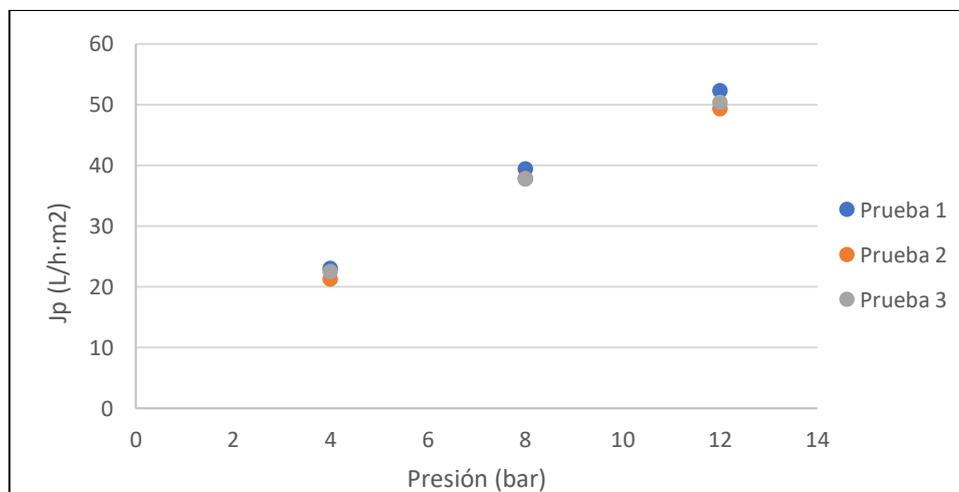


Figura 29. Evolución de la densidad de flujo de permeado frente a la presión.

Obteniendo una línea de tendencia que pasa por el origen, la pendiente de la ecuación obtenida nos da el valor del coeficiente de permeabilidad (K). También se ha obtenido el coeficiente de regresión lineal R² con el objetivo de ver si la aproximación hecha es correcta. Estos datos se encuentran en la Tabla 15.

Tabla 15. Resumen de los coeficientes de permeabilidad obtenidos en cada prueba.

Ensayo	K (L/h·m ² ·bar)	Coefficiente de regresión lineal R ²
Prueba 1	4.615	0.916
Prueba 2	4.370	0.919
Prueba 3	4.445	0.907

Realizando un estudio conjunto de la Figura 29 y la Tabla 15 los resultados obtenidos podrían ser considerados con gran incertidumbre a priori. En primer lugar, al forzar la intersección de las rectas por el origen, los coeficientes de regresión lineal R² obtenidos son de en torno a 0.91, un valor que debería ser mayor para asegurar que el ajuste de los datos experimentales a la línea de tendencia son estadísticamente fiables, y por ende los posibles errores experimentales no son significativos. Además, consultando las especificaciones que el fabricante ofrece sobre las membranas NF 270/4040, los valores de permeabilidad obtenidos son inferiores a los valores teóricos manejados, de en torno a 10 L/(h·m²·bar). Debido a esta discrepancia se hizo la Prueba 2 para comprobar que la membrana estaba bien colocada y que los cálculos previos se habían realizado correctamente. Al no variar el resultado, se procedió a realizar una Prueba 3, en la cual antes de pasar agua destilada se hizo un lavado de 1 hora con una mezcla de agua y NaOH.

Debido a que en las 3 pruebas se han obtenido resultados similares, se ha considerado que los resultados obtenidos son correctos, y que la diferencia en los coeficientes de permeabilidad no se debe a errores durante el montaje o la realización de las experiencias, sino a la propia naturaleza de las membranas utilizadas.

A continuación, se ha realizado un ensayo para elegir la presión de trabajo, operando la planta a cada una de las 3 opciones durante 2 horas cada una: comenzando con $\Delta P = 4$ bar, después $\Delta P = 8$ bar, y por último $\Delta P = 12$ bar. Para elegirla, se ha obtenido la evolución que ha seguido el caudal de permeado para cada una de las presiones de trabajo (Ver Figura 30). Después, se han caracterizado algunas muestras recogidas, tanto del alimento como del permeado. Llegados a este punto del trabajo, ya no se realizará el ensayo de SST, pues se asume que los resultados van a ser nulos debido a que en el estado actual el agua ya no contiene partículas en suspensión. Para medir la calidad del agua se recurrirá a la obtención de la DQO y en algunos casos, de la turbidez. Asimismo, para los análisis de color se utilizará solo el coeficiente de absorción espectral, pues el parámetro FZ seguía las mismas correlaciones y por tanto no es necesario hacer el estudio con los dos parámetros. En la Tabla 16 se han recogido los resultados de todas las caracterizaciones realizadas.

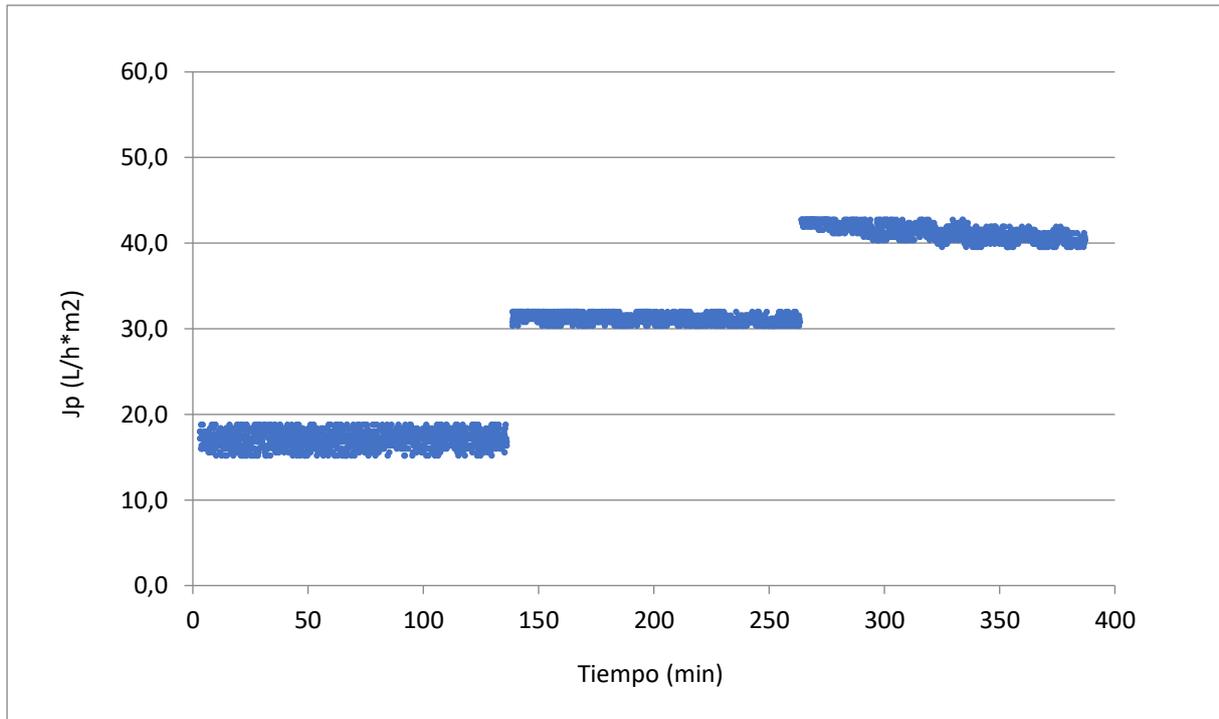


Figura 30. Evolución de la densidad de flujo de permeado frente al tiempo para cada presión de trabajo.

La tendencia observada en la Figura 30 indica que, durante los ensayos, para todas las presiones la densidad de flujo de permeado permanece prácticamente constante. No obstante, para una presión de trabajo de 8 y 12 bar, se observa una disminución de este parámetro, debida probablemente al ensuciamiento de la membrana, lo cual hace disminuir el caudal de permeado, y por tanto su densidad de flujo. Este fenómeno se acentúa más a 12 bar, también posiblemente porque es el último ensayo realizado, cuando la membrana ya ha sufrido la pérdida de eficiencia debida a los dos primeros ensayos.

Tabla 16. Resumen de la caracterización del permeado y el alimento durante el ensayo de NF.

Parámetro	Muestra alimento			Muestra permeado		
	$\Delta P = 4$ bar	$\Delta P = 8$ bar	$\Delta P = 12$ bar	$\Delta P = 4$ bar	$\Delta P = 8$ bar	$\Delta P = 12$ bar
pH	7.74	7.98	8.1	7.93	8.02	7.97
Conductividad (mS/cm)	5.74	5.93	5.99	3.66	3.1	2.9
DQO (mg O ₂ /L)	116	114	118	19	18	15
Turbidez (NTU)	20.52	19.47	18.78	-	-	-
DFZ (λ_{436})	13.5	12.4	12.0	0.2	0.3	0.2
DFZ (λ_{525})	10.3	9.3	9.0	0.2	0.3	0.1
DFZ (λ_{620})	9.0	8.0	7.7	0.2	0.2	0.1

En la Tabla 16 se observa cómo los resultados obtenidos en el permeado son excelentes, logrando reducir casi completamente la DQO y los parámetros asociados al color a 0. Por otro lado, en el alimento los parámetros presentan valores como los que cabía esperar por ser ensayos con recirculación de permeado y rechazo. Para elegir correctamente la presión de trabajo se han representado los rendimientos de eliminación tanto de DQO como de color, los cuales se pueden observar en las siguientes imágenes:

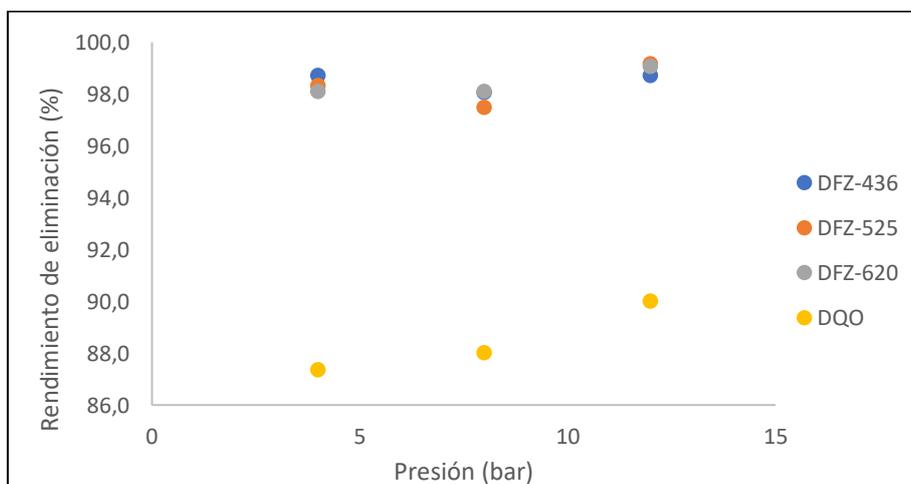


Figura 31. Evolución del rendimiento de eliminación frente a la presión para el permeado.

En la Figura 31 se observa cómo sin importar la presión, los rendimientos de eliminación para el permeado son muy similares, de en torno al 98%. Sí que se observa que a medida que se aumenta la presión, el rendimiento de eliminación de DQO mejora, pasando del 88 al 90% por ciento (como cabía esperar por la mayor densidad de flujo de permeado), si bien es cierto que el aumento de presión también puede resultar en un mayor coste energético.

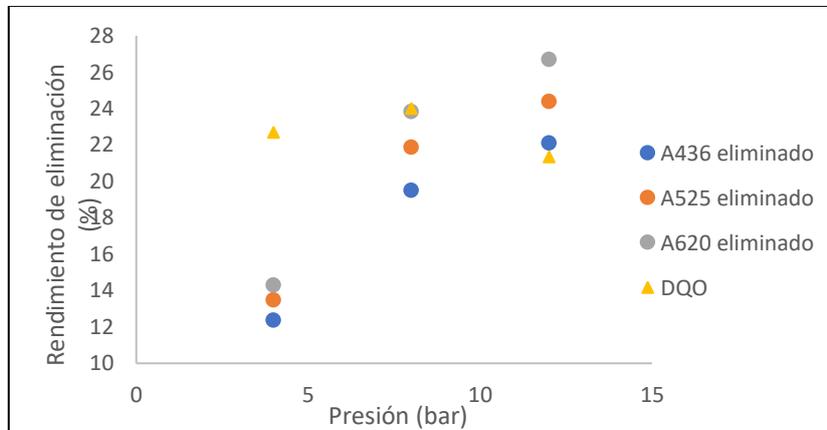


Figura 32. Evolución del rendimiento de eliminación frente a la presión para el alimento.

La tendencia observada en la Figura 32 indica que, al aumentar la presión, aumenta el rendimiento de eliminación del color. Lo sorprendente es la tendencia en la DQO, pues a la mayor presión se tiene el menor rendimiento de eliminación, mientras que a 8 bar se consigue la mayor reducción de DQO.

Finalmente, se escoge trabajar a 8 bar, pues se logra un salto de eficiencia mucho mayor que trabajando a 4 bar, mientras que trabajar a 12 bar no necesariamente mejora los rendimientos mucho más, además de que de esta forma se reduce el gasto energético de la planta.

Antes de comenzar el ensayo definitivo, se realizó un aclarado con agua osmotizada a las membranas de forma previa al ensayo de permeabilidad para observar si se ha recuperado la densidad de flujo de permeado de la membrana. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Resultados del ensayo de permeabilidad tras barrido a distintas presiones.

Parámetro	Valor
J_p (L/h·m²); P = 4 bar	23.048
J_p (L/h·m²); P = 8 bar	38.633
J_p (L/h·m²); P = 12 bar	50.167
K (L/h·m²·bar)	4.479
Coefficiente de regresión lineal R²	0.8731

Comparando el valor de permeabilidad de la Tabla 17 con los de la Tabla 15, se puede afirmar que la membrana se ha recuperado tras la limpieza, pues tiene un valor de permeabilidad superior a un 90% del inicial, límite marcado para considerar que la membrana se ha limpiado correctamente.

La última etapa consistió en la nanofiltración del agua residual durante 6 horas, manteniendo la presión de trabajo constante. Durante el ensayo, se midió la densidad de flujo de permeado, cuyos datos se han representado en la Figura 33. Además, se tomó una muestra de permeado cada hora, y muestras de alimento al principio y al final del ensayo. De todas estas muestras se seleccionaron las más representativas, y se han caracterizado únicamente para obtener la DQO, el coeficiente de absorción espectral y la conductividad. También se calcularon los porcentajes de eliminación de cada parámetro. Todos los datos se han recogido en la Tabla 18.

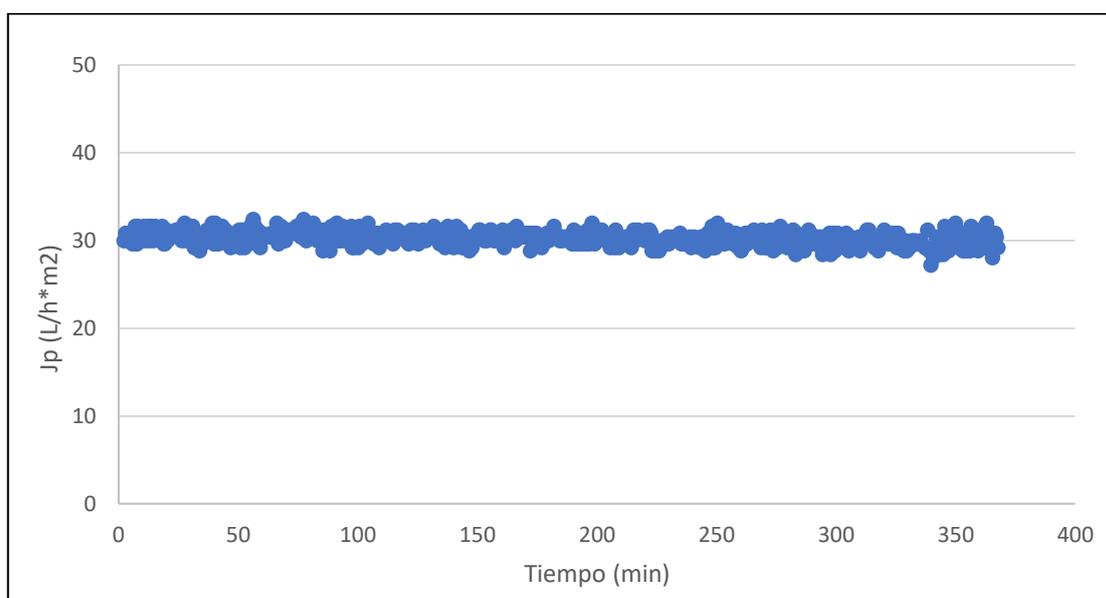


Figura 33. Evolución de la densidad de flujo de permeado durante el ensayo de nanofiltración.

En la Figura 33 se observa que la densidad de flujo del permeado permanece constante durante todo el ensayo en un valor en torno a 30. Apenas se observa una disminución de la eficiencia de la membrana, quizá debido a que las condiciones del agua de alimento no suponen un problema de ensuciamiento para la membrana.

Tabla 18. Resumen de la caracterización tras el ensayo de nanofiltración a $\Delta P = 8$ bar.

Parámetro	t = 0 h (Alimento)	t = 1 h	t = 3 h	t = 6 h	t = 6 h (Alimento)
DQO (mg O ₂ /L)	92	11	9	8	88
Conductividad (mS/cm)	5.54	2.83	2.88	2.9	5.48
DFZ (λ_{436})	0.089	0.001	0.001	0	0.075
DFZ (λ_{525})	0.064	0.001	0.001	0	0.052
DFZ (λ_{620})	0.053	0.001	0.001	0	0.041
Reducción DQO (%)	-	88.04	90.22	91.30	4.35
Reducción conductividad (%)	-	48.92	48.01	47.65	1.08
Reducción DFZ- λ_{436} (%)	-	98.88	98.88	100	15.73
Reducción DFZ- λ_{525} (%)	-	98.44	98.44	100	18.75
Reducción DFZ- λ_{620} (%)	-	98.11	98.11	100	22.64

Tras hacer el ensayo, las principales conclusiones que se extraen de la Tabla 18 son la gran reducción tanto de DQO como de los parámetros asociados al color en el permeado. También es cierto que se produce una disminución de la conductividad, ya que la membrana de NF retiene parte de los iones monovalentes y la mayor parte de los polivalentes.

Por último, también se observa cómo, tras el ensayo, el alimento (tras las 6 horas) también ha visto reducido muy ligeramente su color y su DQO, debido a las partículas que hayan podido quedar retenidas en la membrana.

Tras terminar el ensayo de nanofiltración, se repitió el proceso de limpieza de las membranas y se realizó un ensayo de permeabilidad para comprobar que la membrana se recuperaba correctamente. Una vez hecho esto, los datos se adjuntan en la Tabla 19.

Tabla 19. Resultados del ensayo de permeabilidad tras ensuciar la membrana a $\Delta P = 8$ bar.

Parámetro	Valor
J_p (L/h·m²); P = 4 bar	22.378
J_p (L/h·m²); P = 8 bar	37.933
J_p (L/h·m²); P = 12 bar	48.233
K (L/h·m²·bar)	4.338
Coefficiente de regresión lineal R²	0.8516

De los resultados se obtiene que, una vez más, tras la limpieza de la membrana se ha conseguido recuperar un mínimo de un 90% de la permeabilidad inicial de la membrana, por lo que se considera que la limpieza ha sido realizada correctamente. Vuelve a destacar el valor del estadístico R², que indica que los datos experimentales se desvían de la linealidad.

7. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA.

A modo de resumen, en el siguiente apartado se condensan las diferentes decisiones que se han tomado durante la fase experimental, y a raíz de los resultados obtenidos, para obtener aquella combinación que fuera más eficiente a la hora de reducir en el agua residual los parámetros relacionados con los contaminantes de la misma. Estas decisiones se refieren a dos aspectos de la parte experimental: el material filtrante utilizado en el pretratamiento, y la presión de trabajo de la planta de membranas.

En lo que respecta al material filtrante, en la fase experimental se ha probado con 3 diferentes: gravilla, partículas de hueso de aceituna y arena. A raíz de los ensayos, se observó que la gravilla tenía un rendimiento de eliminación de los parámetros de interés mucho menor que los otros dos materiales, por lo que se descartó. Las partículas de hueso de aceituna y la arena tenían un rendimiento similar a la hora de reducir los parámetros de interés. No obstante, el uso de hueso de aceituna implica que se deben realizar varios ensayos previos al material filtrante antes de poder tenerlo en un estado adecuado para poder ser utilizado, trámite que se evita utilizando arena. Debido a esto, finalmente se ha escogido la arena como material filtrante.

En segundo lugar, en la planta de membranas de NF se tenía la posibilidad de trabajar a una presión de 4, 8 o 12 bar. La presión de trabajo escogida influirá en la densidad de flujo de permeado, aumentando ésta a medida que aumenta la presión. La presión escogida también influye en los rendimientos de eliminación de las sustancias contaminantes, aumentando o disminuyendo según la presión de trabajo. Además, el uso de una u otra presión también afecta a parámetros como el coste energético. A partir de los resultados obtenidos en el ensayo del barrido de presiones, se observa que para una presión de 8 y 12 bar se obtienen rendimientos de eliminación mucho mejores que a 4 bar, lo que implica el descarte de este último valor de trabajo. Para una diferencia de presiones de 12 bar se obtienen resultados mejores que a 8 bar, aunque esta diferencia no es elevada. Además, escoger la presión de 12 bar resultaría en un mayor coste relacionado tanto con el suministro de energía a la maquinaria como para el control de temperatura del agua. Por tanto, se ha escogido trabajar a una diferencia de presión de 8 bar. De esta forma, se consiguen unos buenos rendimientos en la planta de membranas sin que los costes derivados de esta se disparen.

8. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.

En el siguiente apartado se procede al dimensionado de la planta industrial, a partir de los datos obtenidos durante la fase experimental del trabajo. Como indica el título del Trabajo de Fin de Grado, la instalación diseñada debe tratar un caudal de 70 m³/d de agua residual proveniente de un proceso textil. Tras el paso del agua por la planta, esta podrá ser reutilizada por la propia empresa.

En primer lugar, se realizará un dimensionamiento de la etapa de filtración en profundidad utilizando materiales filtrantes, y lo mismo para la etapa de filtración con membranas de nanofiltración. A continuación, se diseñarán los diferentes depósitos y tanques de mezcla de acuerdo con las sustancias que contendrán y el volumen de las mismas. Por último, se desarrollarán los diferentes elementos secundarios, como bombas o válvulas, que conforman la instalación.

8.1. Diseño de la etapa de filtración en profundidad.

Para poder seleccionar el equipo con el cual se realizará la filtración en profundidad, se parte de los datos obtenidos en el ensayo experimental con arena. A partir de estos datos, se ha determinado que el caudal promedio de filtración es de 47.5 mL/min (Ver Figura 20.) A continuación, se puede obtener el área de filtración dado que se conoce el diámetro de la columna de relleno, y a partir de esta la velocidad del fluido:

$$Q_{prom_lecho} = 47.5 \frac{mL}{min} \cdot \frac{60 min}{1 h} \cdot \frac{1 m^3}{1 \cdot 10^6 mL} = 2.85 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}$$

$$A_{filtración} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} = \pi \cdot \frac{0.03^2}{4} = 7.07 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$v_{filtración} = \frac{Q_{prom_lecho}}{A_{filtración}} = \frac{2.85 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{h}}{7.07 \cdot 10^{-4} m^2} = 4.032 \frac{m}{h} \cong 4 \frac{m}{h}$$

Una vez obtenida la velocidad de filtración, se fijará este parámetro. Relacionando la velocidad de filtración, que permanece constante, con el caudal de trabajo de la instalación, se puede despejar el área de filtración que debe tener el equipo de filtración que se quiera adquirir.

Hay que tener en cuenta dos factores. El primero, que se recupera todo el caudal que pasa por el equipo adquirido, por lo que no es necesario aplicar ningún factor de rendimiento al caudal de entrada. El segundo, que la instalación estará diseñada para funcionar durante 8 h/día. Por tanto, se puede calcular el caudal de trabajo diario como:

$$Q_{trabajo} = 70 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1 día}{8 h} = 8.75 \frac{m^3}{h} = 8750 \frac{L}{h}$$

Y, por tanto, el área de filtración necesaria en la planta se calcula como:

$$A_{filtración} = \frac{Q_{prom_lecho}}{v_{filtración}} = \frac{8.75 \frac{m^3}{h}}{4 \frac{m}{h}} = 0.729 m^2$$

Con este dato y el caudal de trabajo ya se puede acudir a las casas comerciales para escoger el equipo más adecuado. El equipo escogido cuenta con un sistema de lavado automático, de forma que cuando el material filtrante ha disminuido su rendimiento de eliminación de sólidos en suspensión, el proceso se para hasta que el lavado del material filtrante ha terminado. Para evitar esta parada del proceso, o en caso de avería, se ha escogido un equipo de filtrado con dos células que trabajan en paralelo, solucionando el problema, pues cuando una de ellas está en el proceso de lavado, se pone en marcha la otra, evitando detener el proceso.

Así, se ha escogido un equipo de filtración en profundidad de la casa comercial *Hidro-water*, en concreto el modelo FDS-931. Este equipo cuenta con dos compartimentos que permiten un caudal máximo de 19.81 m³/h, permitiendo que en caso de aumentar el caudal de la instalación no haya problemas. Para llenar cada compartimento se requieren 600 kg de arena SILEX. Además, durante el lavado del material filtrante con agua osmotizada trabaja a 26.42 m³/h. Este dato será interesante más adelante para dimensionar el tanque donde se almacenará dicho agua osmotizada. Las dimensiones de cada uno de los compartimentos del filtro son 0.927 m de diámetro por 2.575 m de altura. A continuación, en la Figura 34 se muestra un diseño del equipo en cuestión.



Figura 34. Detalle del equipo de filtración en profundidad (www.hidro-water.com)

8.2. Diseño de la etapa de NF.

Para diseñar correctamente la etapa de nanofiltración, se debe obtener el número módulos de membranas a utilizar y la configuración que seguirán. Ya se sabe que las membranas escogidas pertenecen a la casa comercial FILMTEC-DUPONT, en concreto al modelo NF270-4040, cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de la membrana NF270-4040.

Fabricante	Du Pont
Material de la membrana	Poliamida
Longitud de la membrana (mm)	1016
Diámetro de la membrana (mm)	99
Área de la membrana (m²)	7.6
Rango de trabajo de pH	2 – 11
Temperatura de trabajo máxima (°C)	45
Presión de trabajo máxima (bar)	41

El proceso de membranas se diseña para una conversión del 75% del caudal de entrada, por lo que se puede obtener tanto el caudal de salida de permeado como del concentrado:

$$Q_{\text{permeado}} = Q_{\text{trabajo}} \cdot \eta = 8750 \frac{L}{h} \cdot 0.75 = 6562.5 \frac{L}{h}$$

$$Q_{\text{concentrado}} = Q_{\text{trabajo}} - Q_{\text{permeado}} = 8750 \frac{L}{h} - 6562.5 \frac{L}{h} = 2187.5 \frac{L}{h}$$

Durante los ensayos experimentales en la planta de laboratorio, se obtuvo la densidad de flujo de permeado (J_p) de 30 L/h·m². Por tanto, recuperando la ecuación que define este parámetro (Ecuación 10.) se puede despejar el área de membrana necesaria para la instalación industrial:

$$J_p \left(\frac{L}{h \cdot m^2} \right) = \frac{V_{muestra}}{Tiempo \cdot A_{membrana}} \quad (Ec. 10)$$

$$A_{Total_membrana} = \frac{Q_{permeado}}{J_p} = \frac{6562.5 \frac{L}{h}}{30 \frac{L}{h \cdot m^2}} = 218.75 m^2$$

Consultando en la Tabla 2 el área activa que tiene cada membrana, se puede obtener el número de membranas necesarias en la planta:

$$n^{\circ} memb = \frac{A_{Total_membrana}}{A_{membrana}} = \frac{218.75 m^2}{7.6 \frac{m^2}{memb}} = 28.78 membranas \cong 29 membranas$$

Una vez calculado el número de membranas, se elige la configuración que seguirán estas. Las membranas suelen agruparse en serie (el rechazo de una membrana es el alimento de la siguiente) en tubos de presión para maximizar su eficiencia. A raíz de los resultados obtenidos, la primera opción sería la colocación de los módulos en paralelo. De esta forma, se obtendrían 29 corrientes de permeado y 29 de concentrado. No obstante, con esta configuración no se obtendría una conversión del 75%. Para ello, se trabaja con una configuración piramidal.

Para asegurar un adecuado funcionamiento de la instalación de membranas, se utiliza un software de simulación gratuito desarrollado por la casa comercial *Dow Water & Process Solutions (DUPONT)*. Este software, llamado WAVE (Water Application Value Engine) permite modelar un proceso de membranas, simplificando los problemas de funcionamiento (exceder la conversión de los elementos de membrana, no cumplir con los requisitos mínimos de flujo de concentrado o de densidad de flujo de permeado, entre otros) que podrían surgir. Así, introduciendo los parámetros del agua que tenemos (caudal de entrada, rendimiento, tipo de membrana utilizado, pH, presión de trabajo, temperatura, conductividad, etc.) el software indica la configuración que debe seguir el sistema. Los resultados obtenidos a través de WAVE se recogen en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados obtenidos en la simulación con WAVE.

Etapas	N.º tubos	N.º membranas por tubo	Total de membranas	Q _{entrada} (m ³ /h)	Q _{permeado} (m ³ /h)	Q _{concentrado} (m ³ /h)
1	3	6	18	8.75	4.90	3.85
2	2	6	12	3.85	1.66	2.19

A raíz de los resultados obtenidos, se deduce que en la simulación, el programa WAVE ha propuesto una estructura piramidal con 18 membranas en la primera etapa agrupadas en 3 tubos de presión con seis elementos cada uno, cuya corriente de concentrado pasa a una segunda etapa en la que se organizan 12 membranas más agrupadas en 2 tubos. La principal diferencia con respecto a los cálculos anteriores es que experimentalmente se obtiene que la etapa de NF debe tener 29 membranas, mientras que en la simulación aparecen 30. Estas diferencias se deben a que, el sistema considera, la pérdida de carga, la disminución de flujo entre membranas (factor de flujo), etc.

8.2.1. Consideraciones sobre la etapa de NF.

Una vez obtenido el informe de la simulación con WAVE, se observó que, si bien los resultados teóricos y experimentales eran muy similares, en la simulación se habían detectado varias advertencias.

Para comprobar que no existe ningún error en el tratamiento de datos, se ha consultado la guía que ofrece Du Pont para el diseño de un sistema de ósmosis inversa [31]. El documento en cuestión ofrece también aproximaciones a los resultados que se deben obtener en función de parámetros como el rendimiento o el tipo de agua tratada. Dado que los resultados obtenidos experimentalmente coinciden con los obtenidos en las condiciones indicadas en dicho documento, se da por válida la configuración seleccionada.

No obstante, también se ha realizado una segunda simulación centrándose en la eliminación de las advertencias. Los resultados obtenidos en esta segunda simulación difieren de la primera pues se han introducido en la aplicación informática otros valores de determinados parámetros, como por ejemplo la presión de alimentación, diferentes a los ensayados en laboratorio. Por ello, se tendrán en cuenta los resultados de la segunda simulación como posibles soluciones que pueden aplicarse a la planta industrial en caso de que, una vez operativa, se presenten problemas de funcionamiento.

En el apartado Anexos, se adjuntará el informe de la primera simulación para poder observar todos los datos obtenidos.

8.3. Diseño de los tanques de almacenamiento y de mezcla.

Para el diseño de los tanques de almacenamiento y de mezcla, se diseñarán según el volumen que tengan que contener. Después de obtener los volúmenes de todos los tanques de almacenamiento, se realizará la selección de los equipos.

- **Tanque de almacenamiento de agua residual:**

El tanque en el cual se almacenará el agua residual obtenida. Se dimensionará con un factor de seguridad del 30%. Dado que el tiempo de retención del agua en dicho depósito será de 1 día, se puede calcular el volumen total.

$$V_{H_2O \text{ residual}} = 70 \frac{m^3}{día} \cdot 1 \text{ día} \cdot 1.3 = 91 \text{ m}^3$$

- **Tanques mezcla:**

Tanto el tanque de mezcla utilizado antes como después de la filtración en profundidad deben tener el mismo volumen que el tanque de almacenamiento diseñado anteriormente, puesto que, en la situación más desfavorable, tendrán que mantener el mismo volumen que en el depósito. En cuanto al tanque de mezcla auxiliar, se escogerá el mismo volumen para que en el caso más desfavorable, en el cual recibirá 3 corrientes diferentes, no haya problemas de almacenamiento. Por tanto, manteniendo los cálculos, se obtiene que:

$$V_{\text{tanque mezcla}} = 70 \frac{m^3}{día} \cdot 1 \text{ día} \cdot 1.3 = 91 \text{ m}^3$$

- **Tanque de almacenamiento de agua osmotizada:**

El tanque de agua osmotizada tendrá dos funciones diferenciadas. Por un lado, proporcionar agua osmotizada para la limpieza del material filtrante agotado que haya en los equipos de filtración. Por otro lado, de forma secundaria debe proporcionar una corriente de agua a la etapa de membranas en caso de querer hacer una limpieza de la misma. La primera función es la que más agua requiere, en concreto 26.67 m³/h para el equipo escogido, por lo que se dimensionará como si únicamente tuviera esta función. Asumiendo que la limpieza solo requiere 1 hora, y dimensionando con un factor de seguridad del 20%, se obtiene el siguiente volumen:

$$V_{H_2O \text{ osmotizada}} = 26.67 \frac{m^3}{h} \cdot 1 \text{ h} \cdot 1.2 = 32 \text{ m}^3$$

- **Tanque de almacenamiento de residuos:**

En el siguiente depósito se almacenará en primer lugar el agua osmotizada proveniente de la limpieza del equipo de filtración profunda, que a su paso por el equipo arrastrará partículas retenidas y sólidos en suspensión. Además, en caso de que en la etapa de NF se diera una sobrepresión, una válvula reductora de presión redirigirá la corriente que circule por esa parte del circuito a este tanque de almacenamiento. Esta fracción del volumen es muy pequeña, por lo que se dimensionará el tanque de la misma forma que el depósito de agua osmotizada.

$$V_{Residuos} = 26.67 \frac{m^3}{h} \cdot 1 h \cdot 1.2 = 32 m^3$$

- **Tanques de almacenamiento de ácido y base:**

Para el dimensionamiento de los tanques de ácido y base, se ha considerado que el total de volumen que deben ocupar es la diferencia entre el volumen del tanque de mezcla auxiliar, y el volumen de agua osmotizada. De esta forma, se dimensionarán ambos tanques asumiendo la situación más desfavorable. Tomando un tiempo de retención de 1 h, y un factor de seguridad del 20%, el volumen de estos tanques se calcula como:

$$V_{\text{Ácido} + \text{Base}} = V_{\text{tanque mezcla}} - V_{\text{H}_2\text{O osmotizada}} = 70 - 32 = 38 m^3$$

$$V_{\text{Ácido}} = V_{\text{Ácido}} = \frac{38 m^3}{2} \cdot 1.2 = 22.8 m^3$$

- **Tanque de almacenamiento de permealado:**

La corriente de permealado es un 75% del total de la corriente de entrada, por lo que asumiendo el mismo tiempo de retención, un coeficiente de seguridad del 20%, el volumen de este depósito se calcula rápidamente con el caudal de permealado:

$$V_{\text{permealado}} = 70 \frac{m^3}{\text{día}} \cdot 0.75 \cdot 1 \text{ día} \cdot 1.2 = 63 m^3$$

- **Tanque de almacenamiento de concentrado:**

Al igual que en el depósito anterior, el tanque de recogida del concentrado puede obtenerse teniendo en cuenta que la corriente de concentrado será un 25% de la corriente de entrada. Se asumirá un coeficiente de seguridad del 20%:

$$V_{\text{concentrado}} = 70 \frac{m^3}{\text{día}} \cdot 0.25 \cdot 1 \text{ día} \cdot 1.2 = 21 m^3$$

Una vez obtenidos los volúmenes teóricos de todos los depósitos y tanques, se han recogido los resultados en la Tabla 21, donde se añadirán además los volúmenes nominales de los tanques adquiridos y sus dimensiones.

Tabla 21. Resultados del dimensionamiento de los tanques de mezcla y almacenamiento.

N.º depósitos	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (m ³)	Altura (m)	Diámetro (m)
1	21	24	2.29	3.65
2	22.8	25	4.65	2.7
2	32	36	1.52	5.48
1	63	64	1.52	7.31
4	91	96	2.29	7.31

Todos los tanques adquiridos pertenecen a la casa comercial *Tanks Direct* (www.tanks-direct.co.uk) y están hechos de acero galvanizado, a excepción de los tanques de almacenamiento de ácido y base, que están fabricados a partir de Polietileno de Media Densidad (MDPE).

8.4. Diseño y selección del resto de elementos de la planta.

Para finalizar con el diseño de la instalación, se procede a seleccionar los diferentes elementos que forman la planta industrial:

- Válvulas:

Para la selección de válvulas se acudirá a la casa comercial *Genebre, S.A.* Se escogerán 3 válvulas de 3 vías, que servirán para dirigir el caudal de agua en un sentido u otro. También se adquirirán 14 válvulas reguladoras para aumentar o disminuir el caudal de una conducción. Por último, se adquirirá una válvula reductora de presión para utilizarla como mecanismo de seguridad en la etapa de membranas en caso de sufrir una sobrepresión. Todas las válvulas seleccionadas son de bola. A continuación, se pueden observar las válvulas seleccionadas en la Figura 35.

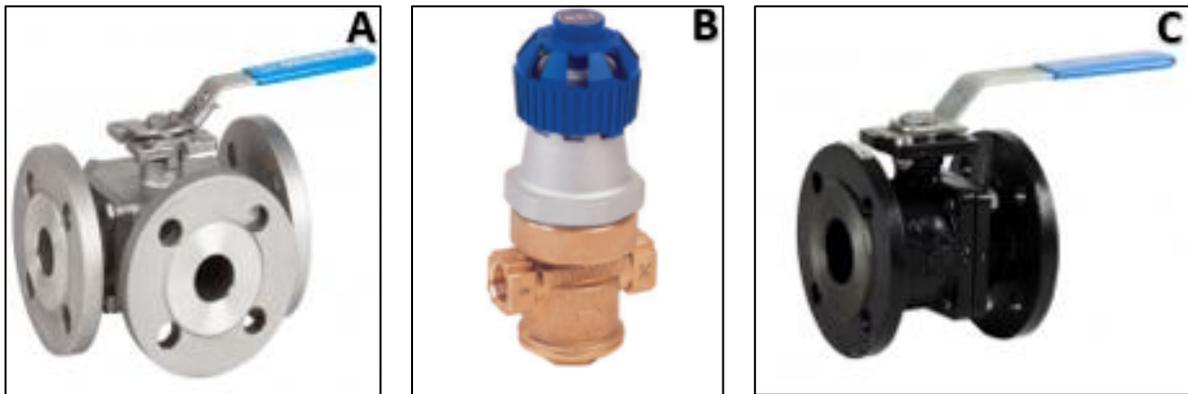


Figura 35. Detalle de la válvula de 3 vías (A), reductora de presión (B) y de regulación de caudal (C). (www.Genebre.es).

- Bombas:

Para la selección de bombas se ha consultado a la casa comercial *Grundfos*, permitiendo realizar la búsqueda de la bomba según el caudal y la presión a soportar. Así, se han escogido dos modelos de bombas: la CM25-3-A-R-A-E, que se utilizará en todas aquellas partes de la instalación que requieran aumentar la presión del fluido. Esta bomba tiene un rango de actuación muy amplio, pudiendo trabajar hasta a 30 m³/h. Además, proporciona una altura de presión de hasta 6 bar, por lo que no se corre el riesgo de alcanzar una sobrepresión en ningún punto de la planta. En cuanto al trabajo en la etapa de membranas, en este caso se necesita una presión de trabajo mayor, de en torno a 8 bar, por lo que se recurrirá a la CR10-9-A-A-A-E, que aumenta la presión de trabajo hasta 16 bar, y mantiene un caudal máximo de trabajo de 15 m³/h. Ambas bombas se muestran en la Figura 36.

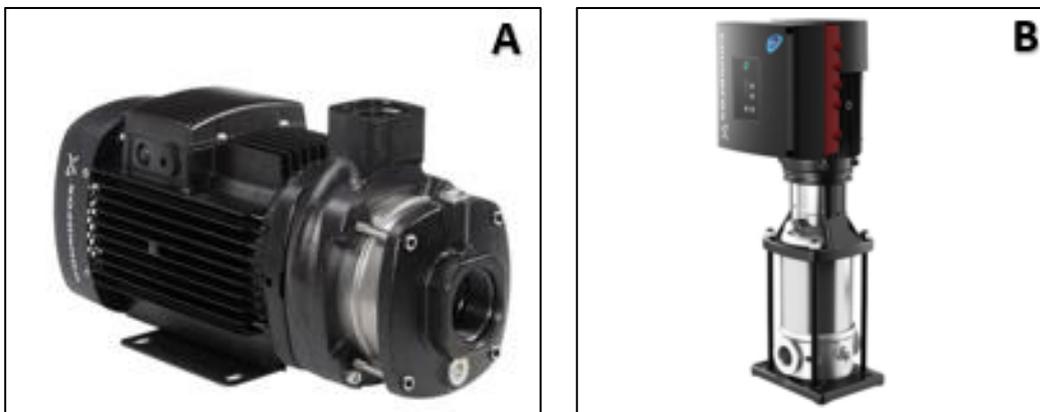


Figura 36. Detalle de las bombas CM25-3-A-R-A-E (A) y CR10-9-A-A-A-E (B). (www.grundfos.com)

- Manómetro:

Los manómetros se han adquirido en la casa comercial *Genebre, S.A.* En concreto se trata de manómetros con un rango de medida de 0 a 16 bar, hechos principalmente de acero inoxidable. Estos manómetros tienen una salida inferior. A continuación, se puede ver un detalle de los manómetros adquiridos en la Figura 37.

- Termómetro:

Los termómetros utilizados se han comprado en la casa comercial *Genebre, S.A.* Estos termómetros en cuestión son bimetálicos inoxidable, y tienen una conexión orientable para facilitar su colocación en los tanques de mezcla. Abarca un rango de medida de 0 a 60 °C, y puede trabajar hasta una presión máxima de 25 bar. En la Figura 37 se observa un detalle del termómetro en cuestión.

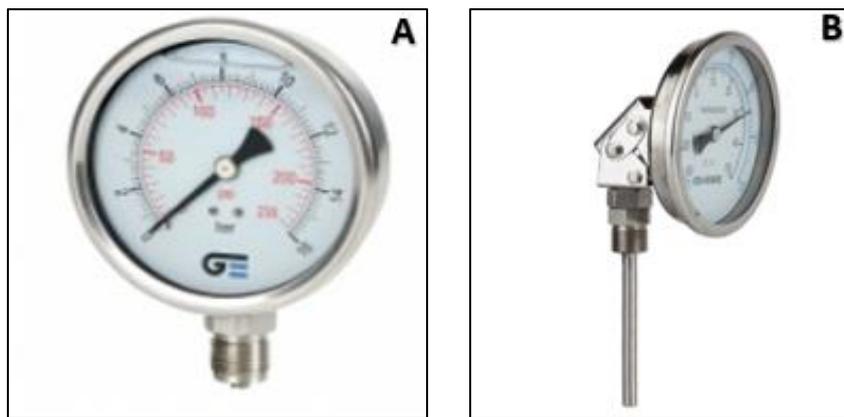


Figura 37. Detalle del manómetro (A) y el termómetro (B). (www.Genebre.es)

- Sensor de nivel:

A la hora de escoger el sensor de nivel, se ha elegido la casa comercial *Hilitand*, y en concreto el modelo GRL8-01. El sensor escogido en concreto cuenta con un relé de control, y sirve para medir tanto el nivel superior como el inferior de un depósito de agua. En la Figura 38 se puede ver dicho sensor de nivel.

- Agitador de turbina:

Los agitadores de turbina son utilizados en la planta para homogeneizar el fluido que se encuentra en los tanques de mezcla, normalmente agua. Estos agitadores se han comprado en la casa comercial *Traxco*. Tienen un metro de longitud y un diámetro de agitación de 1.5 metros. En la Figura 38 se adjunta una imagen del agitador utilizado.

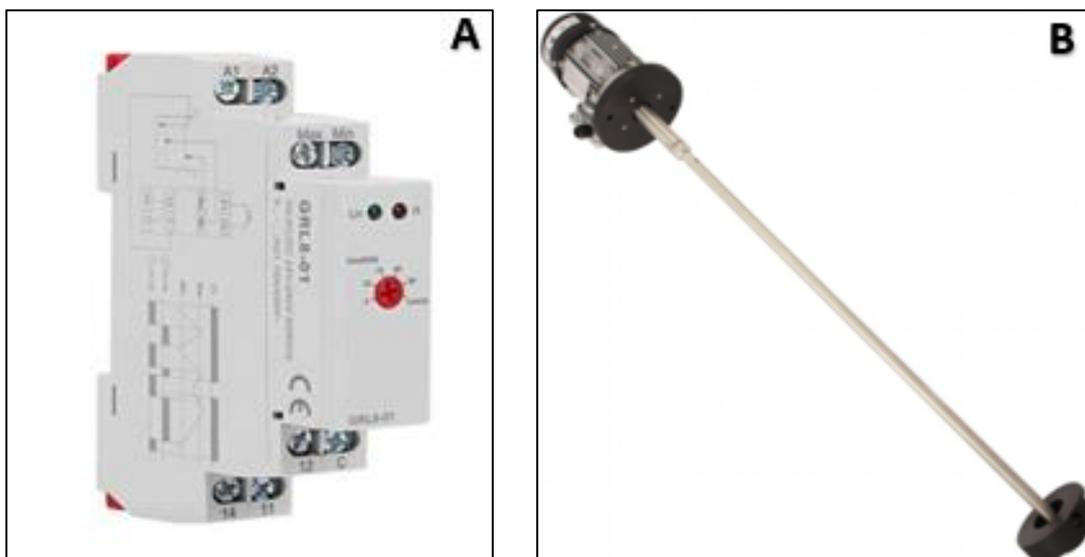


Figura 38. Detalle del sensor de nivel GRL8-01 (A) (www.amazon.com/GRL8-01) y el agitador de turbina (B). (www.traxco.es)

- Conductímetro:

Utilizado para medir la conductividad del agua en los tanques de mezcla, el conductímetro escogido pertenece a la casa comercial *PCE-instruments*. Permite medir hasta 20 mS/cm y operar a temperaturas de hasta 60 °C. En la Figura 39 se observa una imagen del conductímetro utilizado.

- pH-metro:

En lo que respecta al pH-metro, se utilizará para controlar los valores del pH en los tanques de mezcla. Se ha decidido escoger un pH-metro de la casa comercial *ibdciencia*. En la Figura 39 se adjunta una imagen del pH-metro utilizado.



Figura 39. Detalle del conductímetro (A) (www.pce-instruments.com) y del pH-metro (B) (www.ibdciencia.com)

- Caudalímetro:

El caudalímetro se instalará en aquellos puntos de la planta que requieren un control más exhaustivo del caudal de corriente de agua, correspondiendo estos puntos a las entradas al equipo de filtración en profundidad, y a la entrada a la etapa de membranas. Se ha escogido un caudalímetro de la casa comercial *Sensovant*. El caudalímetro en cuestión puede observarse en la Figura 40.

- Filtro de seguridad:

El filtro de seguridad se coloca antes de la bomba que impulsa el agua hacia la etapa de membranas. De esta forma, se asegura que no llegue ninguna partícula a la bomba y la pueda estropear. Se ha escogido un filtro de sedimentos de 10 micras, que va insertado en un porta filtros. La marca elegida para comprar este equipo ha sido *Leroy Merlin*. A continuación se puede ver dicho filtro en la imagen 40.

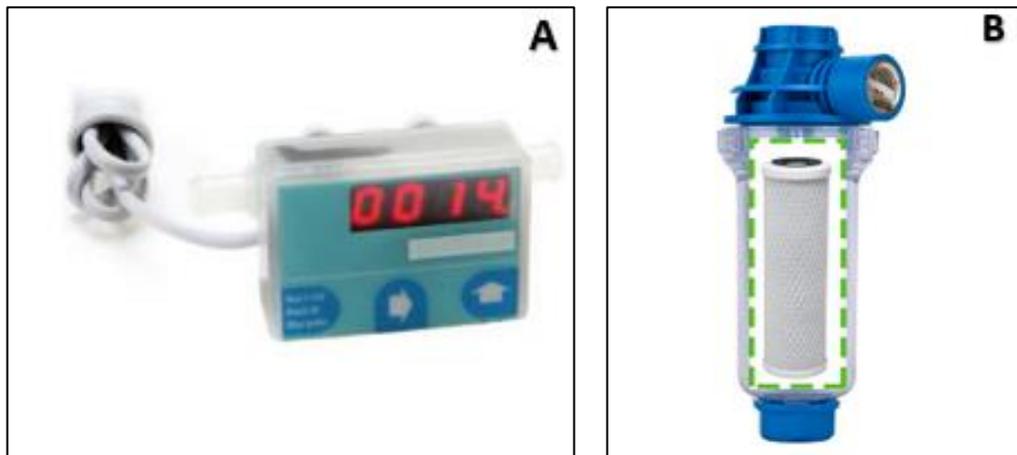


Figura 40. Detalle del caudalímetro (A) (www.sensovant.com) y el filtro de seguridad (B) (www.leroymerlin.es).

8.5. Descripción del proceso seguido en la planta.

Una vez se tienen todos los equipos dimensionados y seleccionados, se realiza la instalación de la planta. En este apartado se realizará una descripción del proceso en su conjunto.

El proceso de tratamiento de aguas comienza con la llegada del agua residual y su almacenamiento en un depósito de 96 m³. A partir de aquí, el agua es bombeada a un tanque de mezcla, donde por un lado se comprobará que las propiedades del agua (temperatura, pH, conductividad, etc.) son las adecuadas para continuar, y por otro lado se homogeneizará el agua con un agitador de turbina acoplado al tanque. A la salida de este tanque de mezcla, se cuentan con dos corrientes, cada una dirigida a uno de los dos compartimentos del filtro de arena. De esta forma, se puede tanto trabajar en paralelo,

como trabajar utilizando un compartimento mientras el otro se lava. En ambas corrientes se controla tanto la presión como el caudal, para evitar dañar el equipo.

En lo referido al proceso de lavado de la arena que hay en el filtro, esta se realizará con agua osmotizada proveniente de un tanque de almacenamiento. Tras su paso por el equipo, el agua habrá arrastrado las fibras y otros sólidos en suspensión retenidos, por lo que se envía a un depósito diseñado para almacenar todos los residuos provenientes de la planta para su gestión.

El agua residual salida del filtro de arena se lleva a continuación a un segundo tanque de mezcla para volver a homogeneizar sus propiedades, y controlar su temperatura, pH y conductividad. Una vez hecho esto, se bombea el agua. El agua de salida pasa a continuación hacia la etapa de membranas.

En esta etapa, se hace pasar el agua por un filtro de seguridad para evitar que las membranas o la bomba puedan estropearse. Controlando la presión y el caudal, se hace pasar el agua a una presión de en torno a 8 bar por los módulos de membranas, que siguen una configuración piramidal como se ha explicado anteriormente. Tras la primera etapa de membranas se obtienen dos corrientes: una de permeado, que se dirige a un depósito de almacenamiento diseñado para esta corriente, y una de concentrado que se vuelve a pasar por una bomba para eliminar la posible pérdida de carga provocada tras el paso por las membranas de NF. En la segunda fase de la filtración con membranas se vuelve a obtener una corriente de permeado que se dirige a su respectivo depósito, y en esta ocasión una corriente de concentrado o rechazo que se envía a un depósito para almacenarla.

En este punto, se cuenta ya con una corriente de permeado que, en caso de cumplir las características impuestas por la empresa o por la legislación pertinente, puede reutilizarse en los procesos de la empresa que requieran agua. En cuanto a la corriente de concentrado, puede gestionarse su eliminación, o puede recircularse una parte de nuevo al segundo tanque de mezcla para continuar purificándose.

Paralelamente al proceso descrito, la planta cuenta también con un sistema de limpieza. Este sistema utiliza agua osmotizada, una disolución de sosa cáustica (pH 12) y una disolución de ácido clorhídrico (pH 2) mezclados en un tercer tanque de mezcla en las proporciones necesarias para poder realizar una limpieza de las membranas sin presión si fuera necesario. Además, antes de llegar a los módulos de membranas, existe una válvula reductora de presión que, en caso de detectar una sobrepresión durante el bombeo del alimento, se abrirá para devolver todo el efluente hacia el tanque de mezcla, evitando así la pérdida de corriente en el sistema y la rotura de las membranas a causa de una presión demasiado elevada.

9. ESTUDIO ECONÓMICO.

En el siguiente punto se realiza un análisis del coste de operación del proyecto. Para ello, se calcularán los costes de funcionamiento de la planta durante 1 año, y se dividirán entre los m³ de agua residual tratados en el mismo periodo de tiempo.

En primer lugar, se asumirá que un año tiene 360 días a la hora de realizar los cálculos, y que se trabaja 8 horas al día. Los costes de funcionamiento se reparten entre la contratación de la mano de obra, el gasto energético de la instalación y los costes derivados de la compra de reactivos químicos y otros elementos.

Para el cálculo de la mano de obra, se contará con un ingeniero para la revisión del proceso, necesitando de sus servicios unas 2 horas a la semana. También se contará con dos ayudantes, encargados del control en tiempo real de la planta, con unos servicios de 6 horas al día. Así, en la Tabla 22 se calculan dichos costes.

Tabla 22. Costes derivados de la mano de obra.

Unidad	Denominación	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
h	Ingeniero	26,67	103	2.747,01
h	Técnico industrial	17,62	2.160	38.059,20
	TOTAL			40.806,21

A continuación, se han obtenido los costes derivados de la compra de reactivos químicos y otros materiales. Para ello, se han realizado una serie de suposiciones:

- El material filtrante adquirido no necesita cambiarse en varios años, por lo que solo se adquirirá el suficiente como para llenar los compartimentos del equipo. La cantidad necesaria de material filtrante viene dada por el equipo de filtración adquirido.
- El ácido y la base adquiridos se renovarán una vez al mes durante 1 año, por lo que el precio indicado será el referido a la cantidad necesaria para llenar cada depósito durante 1 mes. Las cantidades necesarias de ácido y base vienen dadas por el volumen de los depósitos que los almacenan, y por el pH deseado de cada disolución.
- Se destinará una partida económica dedicada a la compra de más membranas de nanofiltración en caso de que alguna sufriera desperfectos de fabricación o durante el proceso. Esta partida será de 1000 €.

Así, los costes asociados a los reactivos y otros materiales se representan en la Tabla 23.

Tabla 23. Costes derivados de reactivos químicos y otros elementos.

Unidad	Denominación	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
u	HCl de pureza 37% en botella de 2.5 L	311,92	12	3.743,04
u	NaOH al 99% en sacos de perlas de 1 kg	25,60	12	307,20
u	Reposición de membranas NF270-4040	1.000,00	1	1.000,00
u	SILEX en sacos de 25 kg	14,99	24	359,76
	TOTAL			5410,00

Por último, para el cálculo del coste energético, se ha realizado el siguiente proceso. En primer lugar, se ha obtenido el total de potencia que necesitan los elementos de la instalación (bombas, agitadores de turbina, sensores de nivel, etc.). Así, se ha obtenido que la potencia necesaria es de 67.13 kW. Por tanto, se contratarán 70 kW de potencia.

Después, se calculan el término de potencia fijo, y el término de energía variable. Para el cálculo de término variable se considera que la planta trabaja 6 horas en la zona horaria valle (el 75% de las horas), y 2 horas en la zona horaria llano (el 25% de las horas), para disminuir así los costes energéticos.

A continuación, se calcula el término fijo:

$$\text{Término fijo} = 70 \text{ kW} \cdot 3,040876 \frac{\text{€}}{\text{kW} \cdot \text{mes}} \cdot 12 \frac{\text{mes}}{\text{año}} = 2.554,34 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Para el cálculo del término variable, en primer lugar se calculará la energía consumida en cada una de las zonas horarias.

$$E_{\text{consumida mensual}} = 67.13 \text{ kW} \cdot 8 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 30 \frac{\text{día}}{\text{mes}} = 16111,2 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

$$E_{\text{consumida valle}} = 16111,2 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \cdot 0.75 = 12084.15 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

$$E_{\text{consumida llano}} = 16111,2 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}} \cdot 0.25 = 4027.05 \frac{\text{kWh}}{\text{mes}}$$

$$Coste_{valle} = 12084.15 \frac{kWh}{mes} \cdot 12 \frac{mes}{año} \cdot 0,079915 \frac{€}{kWh} = 11.588,46 \frac{€}{año}$$

$$Coste_{llano} = 4027.05 \frac{kWh}{mes} \cdot 12 \frac{mes}{año} \cdot 0,103118 \frac{€}{kWh} = 4.983,17 \frac{€}{año}$$

$$Término variable = Coste_{valle} + Coste_{llano} = 16.571,63 \frac{€}{año}$$

Aplicando un impuesto del 5.1127% a la suma del término fijo y el variable, se obtiene el coste total energético. También se aplicará un 21% de I.V.A. sobre el coste total.

$$Coste total = (Término fijo + Término variable) \cdot 1.051127$$

$$Coste total = \left(2.554,34 \frac{€}{año} + 16.571,63 \frac{€}{año} \right) \cdot 1.051127 = 20.103,82 \frac{€}{año}$$

$$Coste total_{con I.V.A.} = Coste total \cdot 1.21 = 24.325,62 \frac{€}{año}$$

Una vez calculado el coste energético, ya se puede calcular el coste anual de mantenimiento de la planta industrial. Los datos se han recogido en la Tabla 24.

Tabla 24. Costes anuales de la planta.

Denominación	Importe (€)
Costes derivados de la mano de obra	40.806,21
Costes de reactivos químicos y otros elementos	5.410,00
Coste energético de la planta	24.325,62
TOTAL	70.541,83

Una vez obtenido el coste anual de la planta, se calcula el volumen de agua tratado durante 1 año. Dividiendo el coste anual entre el volumen anual se obtiene el coste de tratar 1 m³ de agua residual.

$$\text{Volumen tratado} = Q \cdot t = 70 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 360 \frac{\text{día}}{\text{año}} = 25200 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$\text{Coste m}^3 = \frac{\text{Coste anual}}{\text{Volumen tratado}} = \frac{70.541,83 \frac{\text{€}}{\text{año}}}{25200 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}} = 2,799 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

10. CONCLUSIONES.

De acuerdo con los objetivos planteados en este Trabajo de Fin de Grado, se describen a continuación las conclusiones obtenidas.

Se han estudiado diferentes métodos de filtración a escala de laboratorio: filtración con materiales filtrantes y filtración con membranas de NF. De todos los materiales filtrantes (hueso de aceituna, gravilla y arena), el material seleccionado ha sido aquel con el que se ha obtenido el mejor rendimiento. Así, de todos ellos, con la arena se ha logrado una reducción del 37.59% para la DQO, del 40.41% para la turbidez, del 55.98% para los SST, y de en torno a un 45% para los parámetros relacionados con el color. Estos resultados obtenidos indican que el uso de arena como material filtrante en el pretratamiento del agua residual es muy efectivo.

En relación con el sistema de membranas, puede decirse que los rendimientos conseguidos con las membranas de nanofiltración, son una eliminación de DQO del 97% y del 100% para el resto de los parámetros. Esto indica que, efectivamente, un sistema formado por un tratamiento principal con membranas, anteponiendo un pretratamiento con materiales filtrantes, se puede considerar un método eficaz para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil.

Las condiciones de operación y el pretratamiento con arena han contribuido a minimizar los problemas de ensuciamiento en las membranas de nanofiltración. El ensayo de larga duración ha permitido estudiar el comportamiento de la membrana seleccionada y tras 8 horas de operación a presión constante, la densidad de flujo de permeado de la membrana se mantuvo en torno a 30 L/h·m². Además, tras este ensayo pudo apreciarse que la membrana no se había ensuciado, pues con un aclarado con agua osmotizada, la recuperación de la permeabilidad fue del 96.92%.

A partir de los datos experimentales, se ha realizado el diseño de la instalación, teniendo en cuenta tanto las diferentes etapas que conforman el proceso como el dimensionamiento de los equipos que intervienen en él.

Se ha realizado un presupuesto que requiere de una inversión inicial elevada, pero que permite tratar un caudal elevado de agua al día, por lo que se consigue reducir el impacto medioambiental por parte de la empresa. Asimismo, se ha realizado también un estudio económico del funcionamiento anual de la planta industrial propuesta, logrando un coste de 2,799 €/m³, lo cual a priori indica que el coste del tratamiento de aguas es razonable.

11. BIBLIOGRAFÍA.

[1] SUEZ, Degremont Water Handbook (2019, 5 de Mayo). Water and generalities, water: a fundamental element. Recuperado de:

<https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/water-a-fundamental-element>

[2] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO.

[3] Onur Tekoğlu, Celalettin Özdemir. 2004. Wastewater of textile industry and its treatment processes. En: BALWOIS 2010 (4, 25-29, Mayo, 2010: Ohrid, Republic of Macedonia).

[4] Unión Europea. Directiva (UE) 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

[5] Gobierno de España. Ministerio para la Transición ecológica. Agua. Legislación.

Recuperado de: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/legislacion/>

[6] Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunidad Valenciana (EPSAR). Normativa propia.

Recuperado de: <http://www.epsar.gva.es/sanejament/legislacion/Detalle-legislacion.aspx>

[7] Montagut Contreras, E. (2019, 7 de Junio). La Revolución del algodón en Inglaterra. Los ojos de Hipatia. Recuperado de:

<https://losojosdehipatia.com.es/cultura/historia/la-revolucion-del-algodon-en-inglaterra/>

[8] A. Garrido. ¿Cuántos litros de agua llevamos encima? Observatorio del Agua de la Fundación Botín.

[9] Ellen MacArthur Foundation. (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion's future.

Recuperado de: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>.

[10] Irastorza, E. EAE Business School. Enero 2019. El sector textil en 2018. Análisis internacional, nacional y autonómico. La moda en tendencias.

- [11] CESCE. 2018. Informe sectorial de la economía española. Sector textil.
- [12] IVACE. Septiembre 2017. Textil de la Comunidad Valenciana
- [13] Facultad de Diseño y Comunicación. Universidad de Palermo. (2019, 8 de junio). Recuperado de: https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/blog/docentes/trabajos/35801_128773.pdf
- [14] Islam Kiron, M. Define Sizing, objects of sizing, properties of size ingredients, disadvantages of sizing. TextileLearner. Recuperado de: https://textilelearner.blogspot.com/2011/08/define-sizing-objects-of-sizing-types_286.html
- [15] Gunasekar, V., Ponnusami, V. (2015). Eco-friendly Textile Dyeing Processes. Environmental Chemistry for a Sustainable World, 255-287.
- [16] Abrahart, E., N., Stothers, J., B. Dye. Encyclopaedia Britannica [versión electrónica]. Recuperado de: <https://www.britannica.com/>
- [17] How blue jeans are made. How Products Are Made, Volume 1. Recuperado de: <http://www.madehow.com>
- [18] Mostafa, M., (January, 2015). Waste water treatment in Textile Industries – the concept and current removal Technologies. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences 7(1): 501-525.
- [19] SUEZ, Degremont Water Handbook (2019, 9 de Junio). Water and generalities, what water should we treat? And why? Industrial effluent. Textile industries. Recuperado de: <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/what-water-should-we-treat-and-why/industrial-effluent/textile-industries>
- [20] Qué es el proceso de lodos activados. (2019, 9 de Junio). Soluciones Medioambientales y Agua, S.A. Recuperado de: <http://www.smasa.net/proceso-lodos-activados/>
- [21] Tang, C., Chen, V. (2002). Nanofiltration of textile waste water for water reuse. Desalination, 143(1), 11-20.

[22] Degrémont, (1979). *Manual Técnico del Agua (4ª Edición)*. Vizcaya, España, Editorial AUTOR-EDITOR.

[23] Materiales Filtrantes para Agua. Distribuidora Internacional de filtros (DIFSA), S.A. de C.V. Recuperado de: <https://www.filtrosparaagua.com/materiales-filtrantes-para-agua.php>

[24] Tecnología de membranas: aplicables a la recuperación de productos de corrientes líquidas. (2019, 10 de Junio). Portalechero. Recuperado de: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/3374/1/innova.front/tecnologia-de-membranas:-aplicables-a-la-recuperacion-de-productos-de-corrientes-liquidadas:.html>

[25] Departamento de Ingeniería Química y Nuclear UPV. (2018, 15 de Octubre). *Procesos industriales en Ingeniería Química. Tema 2. Servicios auxiliares y acondicionamiento de agua en la industria*. Recuperado de: <https://poliformat.upv.es>

[26] Departamento de Ingeniería Química y Nuclear UPV. (2017, 8 de Febrero). *Caracterización de partículas sólidas*. Recuperado de: <https://poliformat.upv.es>

[27] Facultad de Ciencias Experimentales UPO. (2019, 22 de Mayo). *Determinación de materia orgánica en aguas: Demanda Química de Oxígeno*. Recuperado de https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/TAQP4_0506.pdf

[28] AENOR. Calidad del agua. Examen y determinación del color. UNE-EN ISO 7887. Madrid: AENOR, 2012.

[29] Method 2540 A, Standard methods for the examination of water and wastewater, 22nd edn. American Public Health Association, Washington, DC, 2012.

[30] Synder Filtration. 2011. Membrane Compaction. (2019, 22 de Mayo). Recuperado de: <http://synderfiltration.com/learning-center/articles/membranes/membrane-compaction/>

[31] DuPont Water Solutions. FILMTEC Membranes – Steps to Design a Reverse Osmosis System. (2019, 24 de Junio). Recuperado de: https://water.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/2209/related/1

12. ANEXOS.

12.1. Resumen de las fichas de seguridad de los compuestos utilizados.

Producto	Kit de análisis DQO
Proveedor.	Merck
Pictogramas que acompañan al producto.	<p data-bbox="810 654 1013 683">Toxicidad aguda:</p>  <p data-bbox="810 1057 1061 1086">Peligro para la salud:</p>  <p data-bbox="810 1444 933 1473">Corrosivo:</p> 

<p>Pictogramas que acompañan al producto.</p>	<p>Peligroso para el medio ambiente:</p> 
<p>Frases de peligro (H) y significado de las frases.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - H340: Puede provocar defectos genéticos. - H350: Puede provocar cáncer. - H360FD: Puede perjudicar a la fertilidad. Puede dañar al feto. - H290: Puede ser corrosivo para los metales. - H302 + H332: Nocivo en caso de ingestión o inhalación. - H311: Tóxico en contacto con la piel. - H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. - H373: Puede provocar daños en los órganos tras exposiciones prolongadas o repetidas. - H410: Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.
<p>Consejos de prudencia (P) y significado de las frases.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - P201: Solicitar instrucciones especiales antes del uso. - P273: Evitar su liberación al medio ambiente. - P280: Llevar guantes/ prendas/ gafas/ máscara de protección.

Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m3/d) para la eliminación de fibras y reutilización del agua.

<p>Consejos de prudencia (P) y significado de las frases.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - P301 + P330 + P331 EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. - P302 + P352 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes. - P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. - P308 + P310 EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico.
<p>Equipos de protección individual (EPIs) recomendados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro. - Salpicaduras: guantes de goma butílica. - Ropa de trabajo protectora.
<p>Recomendaciones especiales sobre la incompatibilidad con otros productos químicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Incompatible con tejidos de plantas/animales, y metales. Desprende hidrógeno en reacción con los metales. - Reacción exotérmica al mezclarse con oxígeno.
<p>Primeros auxilios.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tras inhalación: aire fresco. Tras parada respiratoria: inmediatamente respiración instrumental. Aplicar oxígeno en caso necesario. Llame inmediatamente al médico.

Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m³/d) para la eliminación de fibras y reutilización del agua.

Primeros auxilios.	<ul style="list-style-type: none">- En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse. Llame inmediatamente al médico. - Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Llamar inmediatamente al oftalmólogo. - Tras ingestión: hacer beber agua (máximo 2 vasos), evitar el vómito (¡peligro de perforación!). Llame inmediatamente al médico. No proceder a pruebas de neutralización.
--------------------	---

Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m³/d) para la eliminación de fibras y reutilización del agua.

Producto	NaOH
Proveedor.	Carlroth
Pictogramas que acompañan al producto.	Corrosivo: 
Frasas de peligro (H) y significado de las frases.	<ul style="list-style-type: none"> - H290: Puede ser corrosivo para los metales. - H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.
Consejos de prudencia (P) y significado de las frases.	<ul style="list-style-type: none"> - P233: Mantener el recipiente herméticamente cerrado. - P280: Llevar guantes de protección y gafas de seguridad. - P303 + P361 + P353: EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o con el pelo): Quitar inmediatamente toda ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua [o ducharse]. - P305 + P351 + P338: EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. - P310: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o un médico.
Equipos de protección individual (EPIs) recomendados.	<ul style="list-style-type: none"> - Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro.

Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m³/d) para la eliminación de fibras y reutilización del agua.

Equipos de protección individual (EPIs) recomendados.	<ul style="list-style-type: none"> - Guantes de seguridad de goma de nitrilo. - Ropa de trabajo protectora.
Recomendaciones especiales sobre la incompatibilidad con otros productos químicos.	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosivo con metales.
Primeros auxilios.	<ul style="list-style-type: none"> - En caso de inhalación: Proporcionar aire fresco. Si aparece malestar o en caso de duda consultar a un médico. - En caso de contacto con la piel: En caso de contacto con la piel, lávese inmediata y abundantemente con mucho agua. Necesario un tratamiento médico inmediato, ya que cauterizaciones no tratadas pueden convertirse en heridas difícil de curar. - En caso de contacto con los ojos: En caso de contacto con los ojos aclarar inmediatamente los ojos abiertos bajo agua corriente durante 10 o 15 minutos y consultar al oftalmólogo. Proteger el ojo ileso. - En caso de ingestión: Lavar la boca inmediatamente y beber agua en abundancia. En caso de tragar existe el peligro de una perforación del esófago y del estómago (fuertes efectos cauterizantes). Llamar al médico inmediatamente.

Producto	HCl
Proveedor.	PanReac AppliChem
Pictogramas que acompañan al producto.	<p>Corrosivo:</p>  <p>Peligro para la salud:</p> 
Frasas de peligro (H) y significado de las frases.	<ul style="list-style-type: none"> - H314: Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves. - H335: Puede irritar las vías respiratorias.
Consejos de prudencia (P) y significado de las frases.	<ul style="list-style-type: none"> - P260: No respirar el polvo/ el humo/ el gas/ la niebla/ los vapores/ el aerosol. - P261: Evitar respirar el polvo/ el humo/ el gas/ la niebla/ los vapores/ el aerosol. - P264: Lavarse concienzudamente tras la manipulación. - P271: Utilizar únicamente en exteriores o en un lugar bien ventilado. - P280: Llevar guantes de protección y gafas de seguridad.

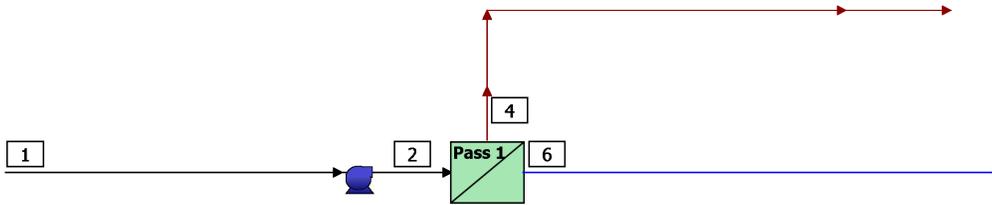
Diseño del tratamiento de las aguas residuales de una industria textil (70 m³/d) para la eliminación de fibras y reutilización del agua.

Consejos de prudencia (P) y significado de las frases.	<ul style="list-style-type: none"> - P301 + P330 + P331: EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.
Equipos de protección individual (EPIs) recomendados.	<ul style="list-style-type: none"> - Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro. - Equipo respiratorio adecuado en caso de formarse vapores/aerosoles. - Guantes de seguridad de neopreno nitrilo latex. - Ropa de trabajo protectora.
Recomendaciones especiales sobre la incompatibilidad con otros productos químicos.	<ul style="list-style-type: none"> - El producto es químicamente estable bajo condiciones normales.
Primeros auxilios.	<ul style="list-style-type: none"> - En caso de inhalación: Trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica. - En caso de contacto con la piel: Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. Extraer el producto con un algodón impregnado en polietilenglicol 400. - En caso de contacto con los ojos: Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir atención médica. - En caso de ingestión: Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

12.2. Resumen de la simulación con el software WAVE.

RO Summary Report

RO System Flow Diagram



#	Description	Flow (m ³ /h)	TDS (mg/L)	Pressure (bar)
1	Raw Feed to RO System	8.75	5,084	0.0
2	Net Feed to Pass 1	8.75	5,087	9.5
4	Total Concentrate from Pass 1	2.19	13,023	7.0
6	Net Product from RO System	6.56	2,434	0.0

RO System Overview

Total # of Trains	1	Online =	1	Standby =	0	RO Recovery	75.0 %
System Flow Rate	(m ³ /h)	Net Feed =	8.75	Net Product =	6.56		

Pass	Pass 1
Stream Name	Stream 1
Water Type	Waste Water (With conventional pretreatment, SDI < 5)
Number of Elements	30
Total Active Area (m ²)	229
Feed Flow per Pass (m ³ /h)	8.75
Feed TDS ^a (mg/L)	5,087
Feed Pressure (bar)	9.5
Flow Factor	0.85
Permeate Flow per Pass (m ³ /h)	6.56
Pass Average flux (LMH)	28.7
Permeate TDS ^a (mg/L)	2,434
Pass Recovery	75.0 %
Average NDP (bar)	3
Specific Energy (kWh/m ³)	0.46
Temperature (°C)	25.0
pH	6.9
Chemical Dose	
RO System Recovery	75.0 %
Net RO System Recovery	75.0%

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

RO Flow Table (Stage Level) - Pass 1

Stage	Elements	#PV	#Els per PV	Feed				Concentrate			Permeate			
				Feed Flow	Recirc Flow	Feed Press	Boost Press	Conc Flow	Conc Press	Press Drop	Perm Flow	Avg Flux	Perm Press	Perm TDS
				(m ³ /h)	(m ³ /h)	(bar)	(bar)	(m ³ /h)	(bar)	(bar)	(m ³ /h)	(LMH)	(bar)	(mg/L)
1	NF270-4040	3	6	8.75	0.00	9.2	0.0	3.85	7.4	1.8	4.90	35.7	0.0	1,806
2	NF270-4040	2	6	3.85	0.00	8.2	1.0	2.19	7.0	1.2	1.66	18.2	0.0	4,282

RO Solute Concentrations - Pass 1

Concentrations (mg/L as ion)						
	Feed	Concentrate		Permeate		
		Stage1	Stage2	Stage1	Stage2	Total
NH ₄ ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ⁺	2,000	3,639	5,123	710.6	1,684	957.6
Mg ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba ⁺²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃ ⁻²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO ₃ ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NO ₃ ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cl ⁻	3,084	5,612	7,900	1,096	2,597	1,477
F ⁻	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO ₄ ⁻²	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	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 ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TDS ^a	5,084	9,251	13,023	1,806	4,282	2,434
pH	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9

Footnotes:

^aTotal Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

RO Design Warnings

Design Warning	Limit	Value	Pass	Stage	Element	Product
Permeate Flow Rate > Maximum Limit (m ³ /h)	0.18	0.39	1	1	1	NF270-4040
Permeate Flow Rate > Maximum Limit (m ³ /h)	0.18	0.33	1	1	2	NF270-4040
Permeate Flow Rate > Maximum Limit (m ³ /h)	0.18	0.28	1	1	3	NF270-4040
Permeate Flow Rate > Maximum Limit (m ³ /h)	0.18	0.24	1	1	4	NF270-4040
Permeate Flow Rate > Maximum Limit (m ³ /h)	0.18	0.21	1	1	5	NF270-4040
Permeate Flow Rate > Maximum Limit (m ³ /h)	0.18	0.19	1	2	1	NF270-4040
Concentrate Flow Rate < Minimum Limit (m ³ /h)	1.14	1.10	1	2	6	NF270-4040
Element Recovery > Maximum Limit (%)	12.0	13.3	1	1	1	NF270-4040
Element Recovery > Maximum Limit (%)	12.0	13.1	1	1	2	NF270-4040
Element Recovery > Maximum Limit (%)	12.0	12.9	1	1	3	NF270-4040
Element Recovery > Maximum Limit (%)	12.0	12.7	1	1	4	NF270-4040
Element Recovery > Maximum Limit (%)	12.0	12.4	1	1	5	NF270-4040
Element Recovery > Maximum Limit (%)	12.0	12.2	1	1	6	NF270-4040

RO Flow Table (Element Level) - Pass 1

Stage	Element	Element Name	Recovery (%)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Feed TDS (mg/L)	Conc Flow (m ³ /h)	Perm Flow (m ³ /h)	Perm Flux (LMH)	Perm TDS (mg/L)
1	1	NF270-4040	13.3	2.92	9.2	5,087	2.53	0.39	50.9	1,116
1	2	NF270-4040	13.1	2.53	8.7	5,695	2.20	0.33	43.6	1,384
1	3	NF270-4040	12.9	2.20	8.3	6,346	1.91	0.28	37.3	1,706
1	4	NF270-4040	12.7	1.91	8.0	7,033	1.67	0.24	31.8	2,087
1	5	NF270-4040	12.4	1.67	7.7	7,751	1.46	0.21	27.3	2,526
1	6	NF270-4040	12.2	1.46	7.5	8,492	1.28	0.18	23.5	3,025
2	1	NF270-4040	9.7	1.93	8.2	9,251	1.74	0.19	24.6	3,135
2	2	NF270-4040	9.4	1.74	7.9	9,910	1.58	0.16	21.3	3,642
2	3	NF270-4040	9.0	1.58	7.7	10,556	1.43	0.14	18.7	4,177
2	4	NF270-4040	8.8	1.43	7.5	11,188	1.31	0.13	16.5	4,731
2	5	NF270-4040	8.6	1.31	7.3	11,809	1.20	0.11	14.8	5,298
2	6	NF270-4040	8.5	1.20	7.1	12,420	1.10	0.10	13.3	5,875

Footnotes:

*Total Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

RO Solubility Warnings

None

RO Chemical Adjustments

	Pass 1 Feed	RO 1 st Pass Conc
pH	6.9	6.9
Langelier Saturation Index	0.00	0.00
Stiff & Davis Stability Index	0.00	0.00
TDS ^a (mg/l)	5,085	13,023
Ionic Strength (molal)	0.09	0.23
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	0.00	0.00
CO ₂ (mg/l)	0.00	0.00
CO ₃ ⁻² (mg/L)	0.00	0.00
CaSO ₄ (% saturation)	0.00	0.00
BaSO ₄ (% saturation)	0.00	0.00
SrSO ₄ (% saturation)	0.00	0.00
CaF ₂ (% saturation)	0.00	0.00
SiO ₂ (% saturation)	0.00	0.00
Mg(OH) ₂ (% saturation)	0.00	0.00

Footnotes:

*Total Dissolved Solids includes ions, SiO₂ and B(OH)₃. It does not include NH₃ and CO₂

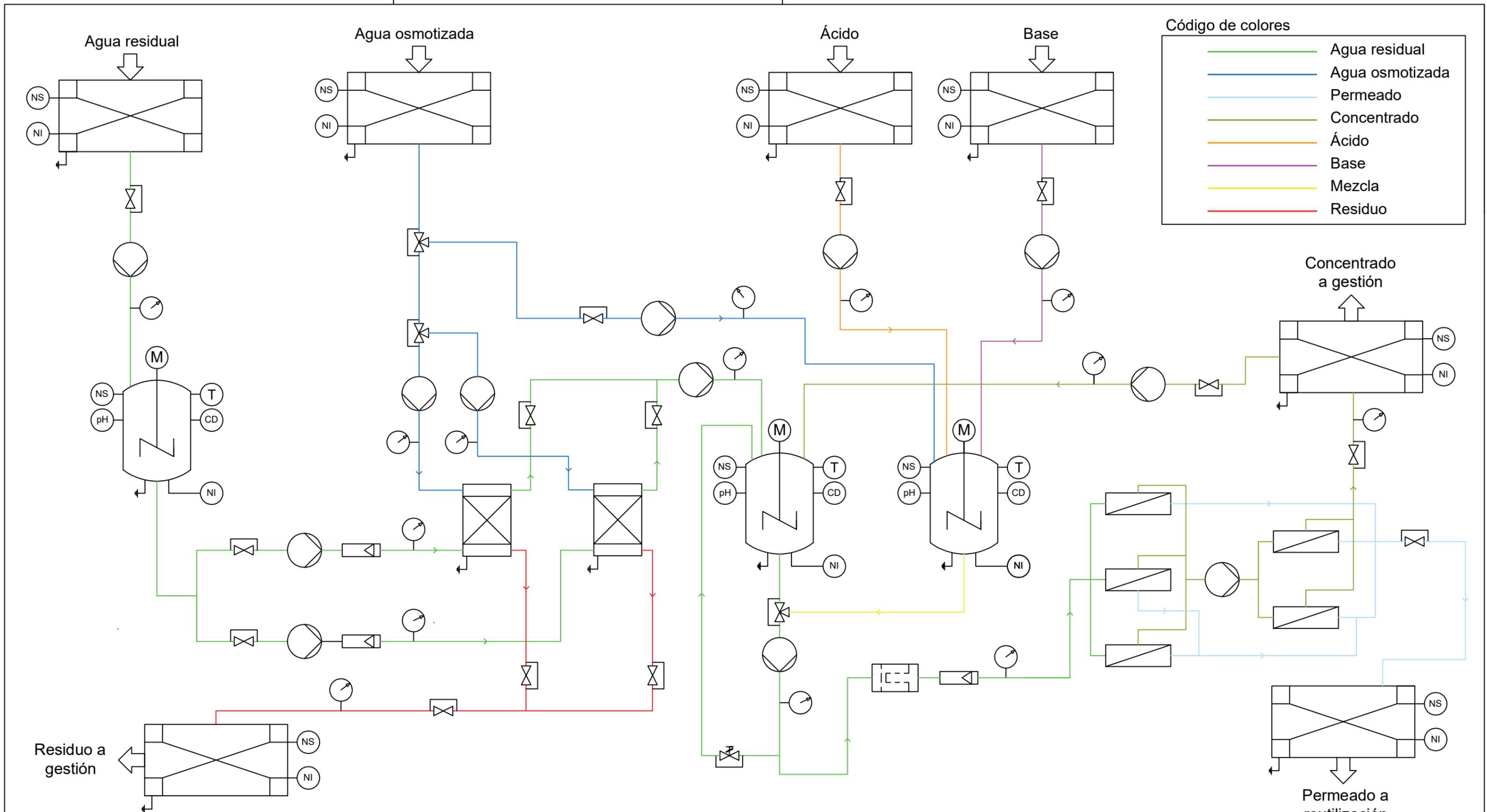
Information provided is offered in good faith, but without guarantees. Users of such information assume all risk and liability and expressly release The Dow Chemical Company and its subsidiaries, officers and agents from any and all liability. Because use conditions and applicable laws may differ from 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 The Dow Chemical Company 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 The Dow Chemical Company 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.

DOCUMENTO 2:

PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. Diagrama de flujo..... 1



Código de colores

—	Agua residual
—	Agua osmotizada
—	Permeado
—	Concentrado
—	Ácido
—	Base
—	Mezcla
—	Residuo

Leyenda

Tanque de mezcla	Depósito	Filtro de arena	Filtro de seguridad	Bomba	Módulo de membranas	Válvula	Termómetro	pH-metro
				Toma de tierra	Caudalímetro	Válvula de seguridad	Manómetro	Sensor de nivel inferior
						Válvula de 3 vías	Conductímetro	Sensor de nivel superior

DOCUMENTO 3:

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

- 1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)..... 1
 - 1.1. Mano de obra 1
 - 1.2. Equipos principales..... 2
 - 1.3. Equipos secundarios..... 3
- 2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC) 4
- 3. PRESUPUESTO DE EXPLOTACIÓN 5

1. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM).

En esta primera parte, se agrupan todos los costes estimados para la construcción de la planta industrial diseñada. Los costes se han calculado asumiendo que la obra se ha llevado a cabo en 30 días laborables, a razón de 8 horas al día.

1.1. Mano de obra.

En este punto se adjuntan las nóminas de los trabajadores. Para calcularlas, se recogen los precios unitarios de cada trabajador involucrado en la obra, el número de horas trabajadas y el coste total de cada uno.

Unidad	Denominación	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
h	Peón electricista	13,18	240	3.163,20
h	Peón ordinario construcción	13,11	240	3.146,40
h	Peón fontanería	13,18	240	3.163,20
h	Oficial 1ª electricista	16,58	140	2.321,20
h	Oficial 1ª fontanería	16,58	140	2.321,20
h	Oficial 1ª construcción	15,77	140	2.207,80
h	Ingeniero	26,60	100	2.660,00
	TOTAL			18.983,00

1.1. Equipos principales.

En el siguiente apartado se recogen los elementos principales de la instalación. Además, todos aquellos equipos que, por su importancia en el proceso, han tenido que ser dimensionados en la memoria, también han sido incluidos.

Unidad	Denominación	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
u	Tanque de almacenamiento de 24 m ³	4.682,21	1	4.682,21
u	Tanque de almacenamiento para productos químicos de 25 m ³	5.818,70	2	11.637,40
u	Tanque de almacenamiento de 36 m ³	5.882,54	2	11.765,08
u	Tanque de almacenamiento de 64 m ³	8.300,00	1	8.300,00
u	Tanque de almacenamiento de 96 m ³	9.164,36	5	45.821,80
u	Filtro de arena de doble compartimento	6.000,00	1	6.000,00
u	Filtro de seguridad y porta filtros	42,90	1	42,90
u	Membrana DOW NF270-4040	280,35	30	8.410,50
u	Tubo de presión para NF	1.800,00	5	9.000,00
	TOTAL			105.659,89

1.2. Equipos secundarios.

A continuación, se recogen los elementos secundarios de la instalación, como los sensores utilizados, las bombas y las válvulas.

Unidad	Denominación	Precio (€)	Cantidad	Importe (€)
u	Válvula de 3 vías	582,52	3	1.747,56
u	Válvula reductora de presión	381,98	1	381,98
u	Válvula de bola	112,70	14	1.577,80
u	Manómetro	61,32	15	919,80
u	Termómetro	68,96	3	206,88
u	Sensor de conductividad	120,88	3	362,64
u	Sensor de pH	116,80	3	350,40
u	Caudalímetro	127,90	3	383,70
u	Sensor de nivel	25,99	11	285,89
u	Agitadores de turbina	275,00	3	825,00
u	Bomba centrífuga	1.490,00	10	14.900,00
u	Bomba centrífuga para NF	7.362,00	2	14.724,00
	TOTAL			36.665,65

Una vez obtenidos los costes de la mano de obra y los equipos adquiridos, se puede obtener el presupuesto de ejecución material como la suma de los importes anteriores.

Denominación	Importe (€)
Mano de obra	18.983,00
Equipos principales	105.659,89
Equipos secundarios	36.665,65
Presupuesto de ejecución material (PEM)	161.308,54

2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC).

Para la obtención del presupuesto de ejecución por contrata, se tendrá en cuenta un 13% de gastos generales, y un 6% de beneficio industrial. Estos porcentajes se calcularán a partir del presupuesto de ejecución material, y después se sumarán al mismo.

Denominación	Importe (€)
Presupuesto de ejecución material (PEM)	161.308,54
Gastos generales (13%)	20.970,11
Beneficio industrial (6%)	9.678,51
Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)	191.957,16

3. PRESUPUESTO DE EXPLOTACIÓN.

Una vez obtenido el presupuesto de ejecución por contrata, se calcula el presupuesto de explotación aplicando el 21% de IVA al PEC obtenido anteriormente.

Denominación	Importe (€)
Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)	191.957,16
I.V.A. (21%)	40.311,00
Presupuesto de explotación	232.268,16

Asciende el presupuesto de explotación a la expresada cantidad de **DOSCIENTOS TREINTA Y DOS MIL DOSCIENTOS SESENTA Y OCHO EUROS CON DIECISÉIS CÉNTIMOS.**

