



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a la empresa donde he realizado las prácticas por darme la oportunidad de poder aprender y formarme en el sector. Gracias a mi tutora y a mis compañeras por recibirme como una más.

Por otro lado, agradezco también a mi tutora María Sancho por su gran dedicación y empeño en este TFG. Tanto tutorizando este trabajo como de docente durante la carrera ha sido una profesora excelente que me ha ayudado en todo lo posible haciendo que todo parezca más fácil.

Por último, agradezco a mis familiares y amigos los ánimos y la motivación que me dieron durante la realización del presente Trabajo Fin de Grado y durante todo el transcurso del grado. Gracias a ellos fue mucho más fácil.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) surge durante la realización de prácticas curriculares en empresa a través de la UPV. Dicha empresa pertenece al sector cosmético y produce distintos tipos de productos, que posteriormente son distribuidos por sus clientes en grandes superficies. Para la elaboración de los productos cosméticos es necesario que el agua tenga una determinada pureza. Para ello, la empresa dispone de diversos tratamientos y plantas de ósmosis inversa que permiten acondicionar el agua a los parámetros que se requieren.

Actualmente, la empresa tiene como referencia la Norma “Farmacopea Europea de Agua Purificada”. No obstante, para poder ampliar su fabricación con productos como los inyectables, deberían de cumplir la norma “Farmacopea Europea para Inyectables de Agua Altamente Purificada”. En este caso, parámetros como la conductividad y las endotoxinas pasan a ser más restrictivos. Por ello, con el fin de cumplir los nuevos valores requeridos, se va a diseñar una modificación de la planta de ósmosis inversa existente.

La planta actual consta de dos pasos de ósmosis inversa, el primero con 6 membranas y el segundo con 4, a través de los cuales se llega a reducir la conductividad del agua de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para adaptar la calidad del agua tratada a la normativa de productos inyectables, se requiere que el sistema reduzca la conductividad del agua de red a 1.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Por otra parte, para mejorar el rendimiento del sistema de tratamiento, la empresa se plantea también la reducción del caudal de rechazo para que no se deseche todo a desagüe y se pueda reutilizar, consiguiendo una mayor sostenibilidad en la gestión del agua en el proceso.

En el presente TFG se estudiarán los dos objetivos planteados con ayuda de un programa de simulación que permitirá obtener las condiciones de operación de la planta modificada para seleccionar la configuración más adecuada. Adicionalmente, se realizará un presupuesto económico con el detalle de los costes asociados, los cuales ayudarán a la empresa a estudiar y decidir la viabilidad final de los cambios a realizar para ampliar el rango de productos en sus líneas de manufactura.

Por todo lo anteriormente descrito, este trabajo aportará un diseño de ampliación para la actual planta de ósmosis inversa, con el fin de obtener un agua altamente purificada y disminuyendo el caudal de rechazo, aportando más líneas de negocio para la empresa y unas mejores políticas medioambientales gracias a un mejor aprovechamiento del agua.

Palabras Clave: ósmosis inversa, alta pureza, farmacopea, simulación, rechazo, sostenibilidad.

RESUM

El present Treball Fi de Grau (TFG) sorgeix durant la realització de pràctiques curriculars en empresa a través de la UPV. Aquesta empresa pertany al sector cosmètic i produeix diferents tipus de productes, que posteriorment són distribuïts pels seus clients en grans superfícies. Per a l'elaboració dels productes cosmètics és necessari que l'aigua tinga una determinada puresa. Per a això, l'empresa disposa de diversos tractaments i plantes d'osmosi inversa que permeten condicionar l'aigua als paràmetres que es requereixen.

Actualment, l'empresa té com a referència la Norma "Farmacopea Europea d'Aigua Purificada". No obstant això, per a poder ampliar la seua fabricació amb productes com els injectables, haurien de complir la norma "Farmacopea Europea per a Injectables d'Aigua Altament Purificada". En aquest cas, paràmetres com la conductivitat i les endotoxines passen a ser més restrictius. Per això, amb la finalitat de complir els nous valors requerits, es dissenyarà una modificació de la planta d'osmosi inversa existent.

La planta actual consta de dos passos d'osmosi inversa, el primer amb 6 membranes i el segon amb 4, a través dels quals s'arriba a reduir la conductivitat de l'aigua de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Per a adaptar la qualitat de l'aigua tractada a la normativa de productes injectables, es requereix que el sistema reduísca la conductivitat de l'aigua de xarxa a 1.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

D'altra banda, per a millorar el rendiment del sistema de tractament, l'empresa es planteja també la reducció del cabal de rebuig perquè no es rebutge tot a desguàs i es pugui reutilitzar, aconseguint una major sostenibilitat en la gestió de l'aigua en el procés.

En el present TFG s'estudiaran els dos objectius plantejats amb ajuda d'un programa de simulació que permetrà obtindre les condicions d'operació de la planta modificada per a seleccionar la configuració més adequada. Addicionalment, es realitzarà un pressupost econòmic amb el detall dels costos associats, els quals ajudaran l'empresa a estudiar i decidir la viabilitat final dels canvis a realitzar per a ampliar el rang de productes en les seues línies de manufactura.

Per tot l'anteriorment descrit, aquest treball aportarà un disseny d'ampliació per a l'actual planta d'osmosi inversa, amb la finalitat d'obtindre una aigua altament purificada i disminuint el cabal de rebuig, aportant més línies de negoci per a l'empresa i unes millors polítiques mediambientals gràcies a un millor aprofitament de l'aigua.

Paraules Clau: osmosi inversa, alta puresa, farmacopea, simulació, rebuig, sostenibilitat.

ABSTRACT

The degree final project developed while completing the internship in a company through the Polytechnic University of Valencia. This company belongs to the cosmetic sector and produces different types of products that lately are distributed by their own customers in large stores.

The cosmetic products require a specific level of purity in water. For that purpose, a variety of treatment options and reverse osmosis plants are available in the company which allow to condition water to the required parameters.

Nowadays, the company has as a reference the European Pharmacopoeia standard of purified water. However, in order to extend its production with some products like the injectable ones, they should conform the European Pharmacopoeia standard of highly purified water for injections. In this case, parameters such as conductivity and endotoxins become more restrictive. Thereupon, a modification of the existing reverse osmosis plant is going to be designed to comply the new required values.

The existing plant consists of two reverse osmosis passes, the first pass with 6 membranes and the second one with 4, through which water conductivity is reduced from 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A system reduction of 1.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tap water conductivity is required to adapt the quality of treated water to the injectable products legislation.

On the other hand, to improve the performance of the treatment system, the company also contemplates reducing the flow rejection in order not to dispose all to the drainage system and to be reused in obtaining like this more water management sustainability in the process.

In this final project, two goals set will be studied with the help of a simulation program which will allow to obtain the most suitable setting choice for the modified operation plant conditions. In addition, an economic budget will be carried out including associated costs that will help the company to study and decide the final feasibility of changes to be done in order to extend the range of products in their manufacturing lines.

As described above, this work will provide an extension design for the present reverse osmosis plant with the aim of obtaining highly purified water and reducing the flow rejection, giving more business lines to the company and better environmental policies due to a better use of water.

Keywords: reverse osmosis, high purity, pharmacopoeia, simulation, rejection, sustainability.

ÍNDICE DE DOCUMENTOS

- Documento I. Memoria
- Documento II. Presupuesto
- Documento III. Planos

DOCUMENTO I. MEMORIA

**PROYECTO DE MODIFICACIÓN DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS
INVERSA INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA DEL SECTOR
COSMÉTICO: ADAPTACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA
TRATADA A LA NORMATIVA EUROPEA DE APLICACIÓN, Y
DISMINUCIÓN DEL CAUDAL DE RECHAZO.**

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

E.T.S.I.I.

Autora: Paula Moreno Jorge

Tutora: María Pino Sancho Fernández

Tutora externa: Estefanía Benavent Adelantado

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	1
1.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	1
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	3
2.2. EL AGUA EN LA INDUSTRIA COSMÉTICA	4
2.2.1. Norma Farmacopea Europea	5
2.3. TECNOLOGÍAS PARA LA PURIFICACIÓN DEL AGUA EN LA INDUSTRIAL	6
• Carbón Activado.....	6
• Filtración convencional.	7
• Ultravioleta.....	7
• Electrodiálisis (ED).....	8
2.4. FUNDAMENTOS DE LA ÓSMOSIS INVERSA (OI)	9
2.4.1. Ósmosis y ósmosis inversa	9
2.4.2. Membranas	11
2.4.4. Elementos principales de un sistema de ósmosis inversa.	14
2.4.6. Parámetros de operación del proceso	15
2.4.6. Configuraciones de un sistema de ósmosis inversa.....	16
2.5. FUNDAMENTOS DEL INTERCAMBIO IÓNICO (II)	18
2.5.1. Tipos de resina.	18
2.5.2. Etapas en el proceso de Intercambio Iónico.	19
2.5.3. Modos de operación.	20
2.6. TRATAMIENTO ACTUAL DEL AGUA EN LA EMPRESA	20
2.6.1. Pretratamiento.....	20
2.6.2. Tratamiento con ósmosis inversa.	21

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS.....	23
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	25
4.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE EMPLEADO	25
4.2. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA ACTUAL.	35
4.3. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL NÚMERO DE MEMBRANAS.....	37
4.4. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL CAUDAL DE RECIRCULACIÓN AL PASO 1.....	37
4.5. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE INTERCAMBIO IÓNICO.	37
4.6. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA MINIMIZAR EL CAUDAL DE RECHAZO.	37
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	39
5.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA ACTUAL	39
5.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL NÚMERO DE MEMBRANAS	40
5.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL CAUDAL DE RECIRCULACIÓN AL PASO 1	43
5.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE INTERCAMBIO IÓNICO.....	45
5.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA MINIMIZAR EL CAUDAL DE RECHAZO.....	48
5.6. PROPUESTA DE MEJORA DE LA INSTALACIÓN ACTUAL.	49
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	51
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la Norma Farmacopea Europea para el Agua Purificada. (BWT Holding GmbH., 2021).	5
Tabla 2. Parámetros de la Norma Farmacopea Europea para el Agua para Inyectables. (BWT Holding GmbH., 2021).	6
Tabla 3. Caracterización del agua de entrada en la Simulación 1.	36
Tabla 4. Configuración de la ósmosis inversa de la planta actual.	36
Tabla 5. Resultados finales de la OI actual.	39
Tabla 6. Parámetros del agua permeada.	39
Tabla 7. CASO 1: Simulación de la planta actual con 5 y 4 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.	40
Tabla 8. CASO 2: Simulación de la planta actual con 4 y 4 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.	41
Tabla 9. CASO 3: Simulación de la planta actual con 4 y 3 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.	41
Tabla 10. CASO 4: Simulación de la planta actual con 4 y 2 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.	42
Tabla 11. Resumen de resultados de las simulaciones de la planta de ósmosis inversa modificando membranas.	42
Tabla 12. CASO 1: Modificación del caudal de recirculación al paso 1 en 35% y 50% del paso 1 y 2, respectivamente.	43
Tabla 13. CASO 2: Modificación del caudal de recirculación al paso 1 en 20% y 40% del paso 1 y 2, respectivamente.	44
Tabla 14. CASO 3: Modificación del caudal de recirculación al paso 1 en 30% y 60% del paso 1 y 2, respectivamente.	44
Tabla 15. Resumen de resultados de los casos de la simulación de OI con modificaciones en los caudales de rechazo.	45
Tabla 16. Inicialización del proceso de Intercambio Iónico.	46
Tabla 17. Parámetros de calidad del efluente del Intercambio Iónico.	47
Tabla 18. Resumen parámetros de diseño del Intercambio Iónico.	47
Tabla 19. Resumen de resultados finales del sistema de Intercambio Iónico.	47

Proyecto de modificación de una planta de ósmosis inversa industrial de una empresa del sector cosmético.

Tabla 20. Datos de la simulación de OI para disminuir el caudal de rechazo. 48

Tabla 21. Resultados de la simulación de OI para la disminución del caudal de rechazo total.. 48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques general del proceso productivo de la empresa.....	3
Figura 2. Filtro de carbón activo para el pretratamiento del agua. (Aquaprof., 2018).....	6
Figura 3. Esquema del tratamiento del agua mediante luz ultravioleta. (Hidroserver., 2013)	7
Figura 4. Módulo de Electrodionización (EDI). (Blue Gold, 2021)	8
Figura 5. Esquema de los distintos tipos de filtración. (Condorchem Envitech, 2021).....	9
Figura 6. Representación de ósmosis. (Condorchem Envitech, 2021).....	10
Figura 7. Estado de las dos disoluciones en equilibrio produciéndose una diferencia de nivel. (Condorchem Envitech, 2021).....	10
Figura 8. Representación de ósmosis inversa. (Condorchem Envitech, 2021)	11
Figura 9. Corrientes principales en una membrana de ósmosis inversa. (Salas, 2015)	11
Figura 10. Módulo placa-bastidor (mod. de CITME, 2006)	12
Figura 11. Membrana tubular. (Lenntech B.V., 2021).....	13
Figura 12. Módulo de membrana enrollada en espiral. (Sotto, 2008).....	13
Figura 13. Membrana de fibras huecas. (EOZ, 2021).	14
Figura 14. Diagrama de bloques con las etapas principales en un sistema de ósmosis inversa.	14
Figura 15. Ejemplo de membranas en serie dentro de un tubo de ósmosis inversa. (Culling Water Projects, 2017)	16
Figura 16. Ejemplo de configuración de ósmosis inversa con dos etapas. (Salas, 2015).....	17
Figura 17. Ejemplo de configuración de ósmosis inversa con doble paso. (Salas, 2015)	17
Figura 18. Ejemplo de configuración de ósmosis inversa con recirculación y bypass. (Salas, 2015)	18
Figura 19. Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico. (Belén, 2007)	19
Figura 20. Diagrama de bloques del procedimiento de las simulaciones.....	25
Figura 21. Diagrama de bloques de los pasos generales en el programa.....	25
Figura 22. Captura de pantalla de inicio del programa WAVE.....	26
Figura 23. Captura de pantalla de la caracterización del agua del programa WAVE.....	27
Figura 24. Captura de pantalla de Ajuste de solutos en el programa WAVE.....	27

Figura 25. Captura de pantalla de la configuración de la ósmosis inversa en el programa WAVE.	28
Figura 26. Captura de pantalla de la configuración de los caudales y corrientes de la ósmosis inversa en el programa WAVE.....	29
Figura 27. Ejemplo del diagrama de flujo ofrecido por el software WAVE.....	29
Figura 28. Captura de la Inicialización del Intercambio Iónico en el programa WAVE.	30
Figura 29. Captura de pantalla de la selección del tanque y sistema de regeneración del Intercambio Iónico en el programa WAVE.....	31
Figura 30. Captura de pantalla de la selección de las resinas del Intercambio Iónico en el programa WAVE.....	32
Figura 31. Captura de pantalla de la selección del regenerante en el Intercambio Iónico en el programa WAVE.....	33
Figura 32. Captura de pantalla de la selección de la calidad del producto en el Intercambio Iónico en el programa WAVE.	34
Figura 33. Captura de pantalla de los parámetros finales en el Intercambio Iónico en el programa WAVE.....	35
Figura 34. Diagrama de flujo de la planta actual de ósmosis inversa dado por el programa WAVE.	40
Figura 35. Diagrama de flujo del Intercambio iónico con resinas SAC y SBA.....	46

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) surge durante la realización de las prácticas en una empresa que pertenece al sector cosmético donde se fabrican una gran cantidad de productos para el uso personal y de higiene. Para la elaboración de todos estos productos es indispensable el uso de agua, que debe estar en unas condiciones de calidad adecuadas y acorde a la normativa y/o legislación relacionada con los productos fabricados. Por ello, actualmente la empresa utiliza varias tecnologías con el fin de conseguir un agua purificada de entorno a $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ para la elaboración de sus productos. Algunas de estas tecnologías son: distintos tipos de filtración, pretratamientos con químicos, descalcificadoras, ósmosis inversa y post-tratamientos como la ozonización. Sin embargo, con las tecnologías actuales la calidad del agua solo sirve para la elaboración de ciertos productos. Si la empresa quisiera aumentar su abanico de producción y fabricar nuevos productos, como fármacos o inyectables, sería necesario un agua mucho más purificada y que cumpliera con la Norma Farmacopea del Agua Altamente Purificada para Inyectables, que establece una conductividad del agua de $1,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Por ello, se propone realizar una mejora de la planta de ósmosis inversa actual para que la empresa pueda aspirar a producir mayor diversidad de productos y así aumentar sus ganancias. En este TFG se simularán distintas alternativas con diferentes tecnologías para reducir la conductividad del agua al nivel establecido por la citada Norma, y se comprobará cuál es la solución más adecuada para la empresa. Por otro lado, también se analizará entre las alternativas planteadas cuál permite minimizar la cantidad del caudal de rechazo, consiguiendo una mayor sostenibilidad en la gestión del agua.

1.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

La realización de este Trabajo Fin de Grado se basa en plasmar en un tema determinado parte de los conocimientos que se han ido estudiando y aprendiendo durante todo el grado, siendo necesario para conseguir la obtención de los 12 créditos para terminar el Grado de Ingeniería Química. Por otro lado, este proyecto tiene parte de conexión con los estudios del grado. El proyecto estudia la purificación del agua y para ello son necesarios conocimientos de las tecnologías existentes de desionización como por ejemplo las membranas de ósmosis inversa, las resinas de intercambio iónico o los procesos de ultrafiltración. Todos estos conceptos han sido vistos en asignaturas como “Análisis y simulación de procesos” u “Operaciones y procesos unitarios en la industria de alimentos” a lo largo de la carrera. Además, se han tenido que realizar varios diagramas de flujo de las plantas de ósmosis, los cuales se aprendieron a dibujar siguiendo la norma UNE-10628 en la asignatura de “Procesos industriales de ingeniería química” y también se ha utilizado el software AutoCad para representarlos, el cual fue estudiado en la asignatura de “Expresión Gráfica”.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La empresa donde se realiza el presente Trabajo Fin de Grado pertenece a la industria de la cosmética, siendo un referente en el sector. En dicha empresa, se fabrican una gran cantidad de productos para el uso personal, ofreciendo rutinas en el cuidado de la piel y rituales de belleza. Se dedican a buscar la fórmula perfecta para el producto, el diseño de los envases y la implantación del lugar de venta.

La compañía cuenta con unas instalaciones que tienen alrededor de 45.000 m² de superficie donde hay implementadas 19 líneas de producción para distintos tipos de envasados como, por ejemplo, perfume, botellas, tarros o labiales entre otros. También disponen de una gran cantidad de reactores para la fabricación en caliente, en frío o especiales para zonas ATEX, con sus respectivos depósitos y equipos complementarios que llegan a producir 975.000 unidades al día de productos.

A continuación, en la Figura 1, se muestra un diagrama de bloques de la fabricación y la producción que se lleva a cabo en dicha empresa.

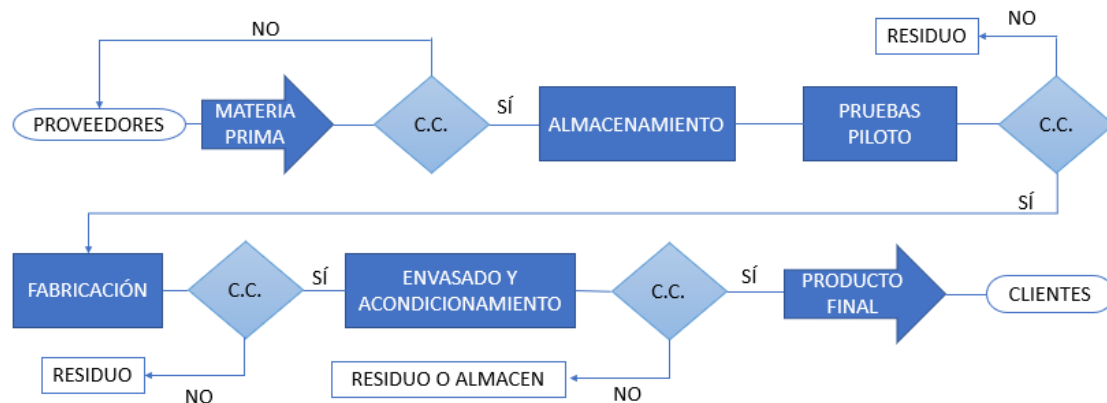


Figura 1. Diagrama de bloques general del proceso productivo de la empresa.

Las principales etapas del proceso productivo se describen brevemente a continuación:

1. Recepción de materia prima y almacenamiento: primero de todo se reciben las materias primas que se van a utilizar en todo el proceso de fabricación y producción de la planta. Hay varios tipos de materias primas esenciales para el proceso.

- Una de las más importantes es el agua que se almacena y posteriormente pasa por un tratamiento de purificación, el cual es objeto del presente TFG.

- Las materias mayoritarias, las cuales también son almacenadas en grandes tanques, ya que se utilizan en gran porcentaje en todas las fabricaciones.
- Recipientes y piezas necesarias para guardar los productos fabricados.
- Materias minoritarias, se necesita una menor cantidad de estas para la fabricación, vienen en recipientes pequeños.

Antes de almacenar todos estos productos se pasa un control de calidad para verificar que estén en unas buenas condiciones y cumplan con los parámetros exigidos por la empresa. En caso de que no sea así, la materia prima se devuelve a su proveedor para que la gestione.

2. Pruebas piloto: en esta etapa se realiza la fabricación del producto a pequeña escala para analizar las características y los parámetros necesarios para realizarlo a gran escala. Se utilizan las materias primas explicadas anteriormente y el producto obtenido pasa un control de calidad para saber si con los objetivos que se deseaban. En caso contrario, el producto se gestiona como residuo.

3. Fabricación: una vez se ha comprobado el procedimiento para realizar el producto a pequeña escala se pasa a fabricar de manera normal con los reactores instalados en la planta y vuelve a pasar por un control de calidad para confirmar que el producto sigue cumpliendo con los requerimientos necesarios. Si no es así, se gestiona como residuo.

4. Envasado y acondicionamiento: cuando el producto ya está fabricado, se envasa y se acondiciona para su traslado hasta los puntos de comercialización, comprobando mediante un control de calidad que todo esté en perfectas condiciones. Si no pasa el último control de calidad, los productos que tengan un fallo mínimo en el acabado se almacenan para dárselos a los trabajadores y los que su error pueda afectar al producto fabricado se gestionan como residuo.

Como se puede observar en el diagrama de bloques, la fabricación y la producción del producto final pasa por una gran cantidad de controles de calidad. La empresa también tiene en cuenta el cuidado con el medio ambiente comprobando que todo esté correctamente para disminuir cualquier impacto negativo medioambiental.

2.2. EL AGUA EN LA INDUSTRIA COSMÉTICA

Uno de los componentes primordiales que no puede faltar en ninguna de las industrias es el agua. Es esencial para poder producir la mayoría de los alimentos, bebidas, cosméticos o fármacos entre otros. También es necesaria para poder realizar distintos tipos de operaciones, hasta las más simples en una industria como, por ejemplo, calentar, enfriar o limpiar.

El cuerpo humano está formado por un 70% de agua, la cual hidrata la piel, regula la temperatura y ayuda al buen funcionamiento de muchos de los órganos. Por lo tanto, en el sector cosmético es de vital importancia controlar su calidad física, química y microbiológica ya que es materia prima en todos los productos para el uso personal.

El agua que se utiliza en dicho sector es agua purificada, la cual ha sido previamente tratada consiguiendo una pureza específica. Algunos de los parámetros más importantes para tener en cuenta en la purificación del agua son la conductividad y los requerimientos microbiológicos.

El agua purificada hace que los cosméticos sean más limpios y puros, ya que evita que la piel absorba impurezas del agua no tratada pudiendo provocar reacciones indeseadas. Además, ofrece una mayor estabilidad al producto evitando cambios de color o textura. Es imprescindible llevar un control rutinario y realizar distintos tratamientos para que cumpla con las exigencias necesarias. (Valquer Laboratorios S.L., 2014).

2.2.1. Norma Farmacopea Europea

Para hablar de la calidad del agua en la industria objeto de este TFG hay que hacer referencia a la Norma Farmacopea, la cual se basa en cumplir unos requisitos para asegurar que el agua está purificada.

Una Farmacopea es un texto donde se recogen las especificaciones de calidad que deben seguir y cumplir los principios activos y excipientes de los medicamentos. Se describe la calidad que debe tener la sustancia a nivel químico, físico y biológico. Hay distintas normas farmacopeas como la norteamericana (USP), la italiana (FU) o la Europea (pH. Eur). Se estudiará el caso de la última, ya que es la que se sigue en la empresa donde se realiza el proyecto y la cual muchos clientes demandan.

Según la Norma Farmacopea Europea el agua se puede clasificar en distintos tipos y se diferencian por los grados de calidad química, física, biológica y microbiológica.

- Agua Potable: proviene de las aguas naturales que con tratamiento cumplen los requisitos para ser agua de bebida. Es la materia prima para el resto de los tipos de agua.
- Agua Purificada: se utiliza para la preparación de productos medicinales o cosméticos que no requieren de administración parenteral. Los parámetros necesarios que debe cumplir son los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la Norma Farmacopea Europea para el Agua Purificada. (BWT Holding GmbH., 2021).

Farmacopea Agua Purificada Ph Eur		
Parámetros	Unidades	Valor
TOC	ppm C	≤ 0.50
Conductividad	μS/cm	≤ 4.3 (20°C)
Nitratos (NO ₃)	ppm	≤ 0.2
Metales pesados	ppm Pb	≤ 0.1
Bacterias aerobias	UFC/ml	≤ 100

- Agua Para Inyectables: se utiliza para la producción de medicamentos de administración por vía parenteral. Los parámetros necesarios que debe cumplir son los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de la Norma Farmacopea Europea para el Agua para Inyectables. (BWT Holding GmbH., 2021).

Farmacopea Agua para Inyectables Ph Eur		
Parámetro	Unidades	Valor
TOC	ppm C	≤ 0.50
Conductividad	μS/cm	≤ 1.1 (20°C)
Nitratos (NO ₃)	ppm	≤ 0.2
Endotoxinas aerobias	I.U.	≤ 0.25
Bacterias aerobias	UFC/100ml	≤ 10

Como se ha explicado anteriormente, la empresa utiliza para la fabricación de productos el agua purificada. Sin embargo, la empresa quiere ampliar su gama de productos y fabricar preparados estériles destinados a administración por vía parenteral, para esto es necesario un agua todavía más purificada y que cumpla con la Norma Farmacopea Europea para Inyectables.

Para la realización de este trabajo se va a considerar el parámetro de conductividad como más relevante para cumplir con dicha norma.

2.3. TECNOLOGÍAS PARA LA PURIFICACIÓN DEL AGUA EN LA INDUSTRIAL

En este apartado se describen algunas de las principales tecnologías para la purificación del agua que más se utilizan en las industrias actualmente. Se van a explicar desde pretratamientos para el agua hasta tratamientos finales de pulido.

- **Carbón Activado.**

El carbón activo consiste en unos poros de pequeño tamaño, alrededor de 500-1000 nm, que permiten la adsorción de las impurezas orgánicas del agua y la descomposición del cloro libre. Suelen utilizarse en el pretratamiento de la purificación. En la Figura 2 se muestra una imagen de un filtro de carbón activo.

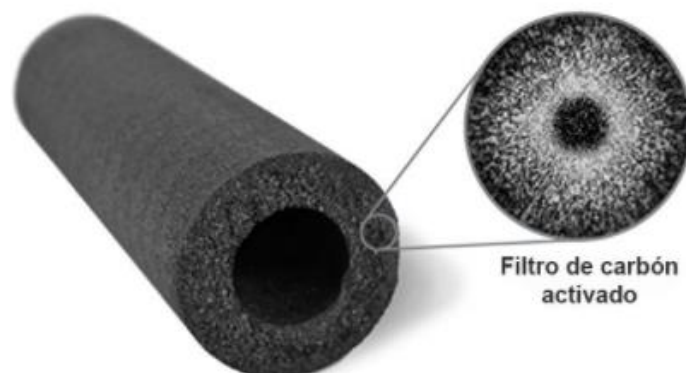


Figura 2. Filtro de carbón activo para el pretratamiento del agua. (Aquaprof, 2018).

- **Filtración convencional.**

Esta tecnología suele utilizarse en el pretratamiento y consiste en la separación mecánica de los sólidos en suspensión. El tamaño del poro es $\geq 10 \mu\text{m}$. Se aplica principalmente para reducir la turbidez o el color, además de eliminar bacterias o virus. Este tipo de filtración consta generalmente de varias etapas que son:

1. Coagulación/floculación: para facilitar la formación de grumos o flóculos más grandes y así se puedan retirar con mayor facilidad.
2. Sedimentación: las partículas posteriormente se dejan sedimentar en el fondo del agua y se separan de ella a causa de la fuerza de la gravedad, posteriormente se tienen que retirar.
4. Filtración: se pasa el agua por los filtros que suelen ser de tierras diatomeas o antracita para eliminar las partículas en suspensión restantes.

- **Ultravioleta.**

La radiación ultravioleta inactiva a los microorganismos que hay en el agua evitando su reproducción. Esta tecnología suele utilizarse como pretratamiento y postratamiento. En la Figura 3 se muestra el esquema de un ultravioleta para el tratamiento del agua.



Figura 3. Esquema del tratamiento del agua mediante luz ultravioleta. (Hidroserver, 2013)

- **Precipitación química.**

Este tipo de tratamiento sirve para la separación de una sustancia disuelta en una disolución. Se utiliza principalmente para la separación de metales tóxicos en el agua como, por ejemplo, la precipitación de hidróxidos, donde se forman hidróxidos metálicos (precipitado) con la adición de hidróxido de calcio (precipitante).

- **Evaporación.**

Este tratamiento consiste en transformar el agua en vapor logrando separarla de un gran porcentaje de los contaminantes que hay en ella. Posteriormente el vapor se conduce a otro recipiente donde condensa y se transforma ya en el agua purificada. Por otro lado, se quedan los contaminantes separados del agua que forman el rechazo. En este proceso se obtiene alrededor de un 95% de agua destilada y un 5% de rechazo. Hay distintos sistemas de evaporación como la evaporación multietapa, la evaporación por efectos múltiples y la evaporación por compresión de vapor.

- **Electrodiálisis (ED).**

Se trata de una tecnología de membranas que utiliza la electricidad, y membranas de intercambio iónico para eliminar los iones del agua. Como se muestra en la Figura 4 el agua no tratada entra al módulo y los iones atraviesan las membranas catiónicas o aniónicas intercambiándose por iones H^+ y OH^- . Se consiguen dos corrientes de agua, una concentrada y otra purificada.

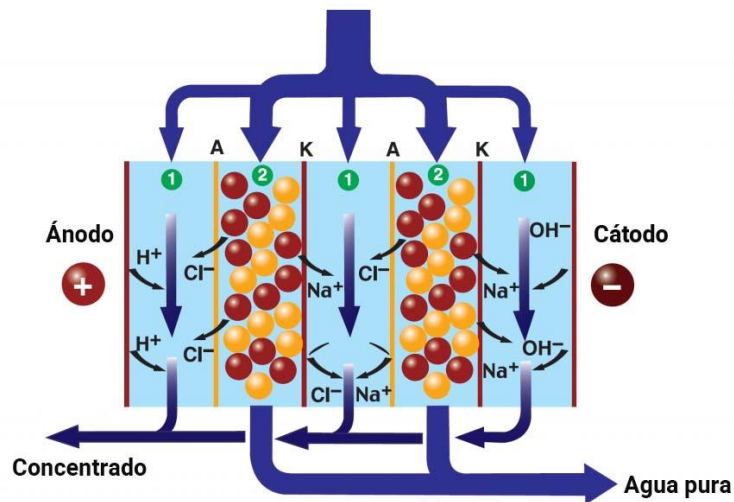


Figura 4. Módulo de Electrodesionización (EDI). (Blue Gold, 2021)

- **Procesos de membrana impulsados por presión.**

Estos procesos se basan en que la fuerza impulsora la cual produce el paso de sustancias a través de la membrana es el gradiente de presión. Los cuatro procesos principales que funcionan de este modo son:

- Microfiltración: separación mecánica de sólidos en suspensión, el tamaño de poro es de $0,1 \mu m - 10 \mu m$.
- Ultrafiltración: separación mecánica de sólidos en suspensión, coloides y macromoléculas, el tamaño de poro es de $0,001 \mu m - 0,1 \mu m$.
- Nanofiltración: separación mediante la aplicación de presión de sustancias orgánicas, microorganismos y algunas sales multivalentes. El tamaño del poro es de $0,1 nm - 0,001 \mu m$.
- Ósmosis inversa: retiene las moléculas más pequeñas de partículas ($< 0,001 \mu m$) y hasta las sales monovalentes. Se separan los solutos mediante la difusión a través de la membrana, es decir, mediante la interacción entre las moléculas del agua, los solutos y las membranas.

A continuación, en la Figura 5 se muestra una imagen donde se ve un esquema de los distintos tipos de filtración y qué solutos pueden separar.

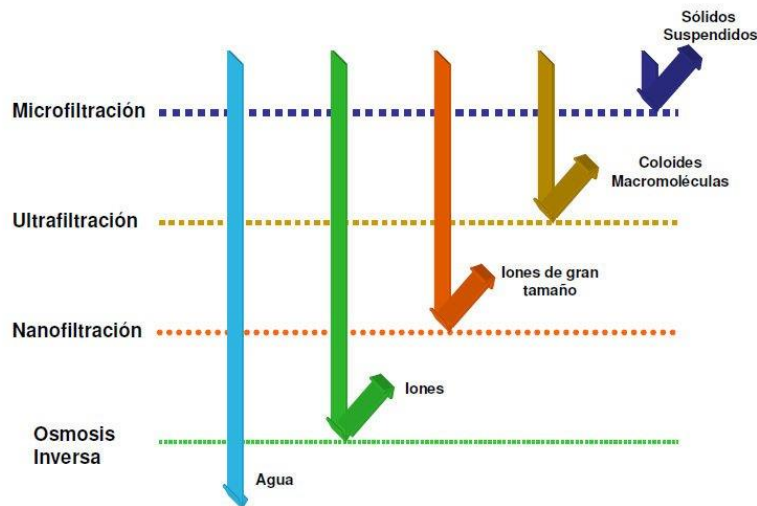


Figura 5. Esquema de los distintos tipos de filtración. (Condorchem Envitech, 2021)

- **Intercambio iónico.**

El intercambio iónico se basa en la eliminación de iones disueltos en el agua mediante resinas aniónicas o catiónicas. Estas son sustancias insolubles con forma de perla, las cuales absorben iones de una disolución intercambiándolos por otros de igual carga eléctrica. Una vez las resinas no intercambian más iones se encuentran agotadas y ya no pueden operar, para ello, se regeneran mediante una disolución regenerante, habitualmente HCl o NaOH. Una vez ya están regeneradas vuelven a estar operativas para volver a utilizarse.

El presente Trabajo Fin de Grado se va a centrar en la ósmosis inversa y el intercambio iónico para conseguir los objetivos deseados. Por ello, a continuación se van a explicar más detalladamente estos dos procesos para la purificación del agua.

2.4. FUNDAMENTOS DE LA ÓSMOSIS INVERSA (OI)

La ósmosis inversa es el principal tratamiento del agua de la actual planta y con el que se quiere conseguir el objetivo del presente Trabajo Fin de Grado, por eso se van a explicar sus fundamentos teóricos.

2.4.1. Ósmosis y ósmosis inversa

Para entender mejor la ósmosis inversa primero hay que entender que es la ósmosis. Este fenómeno ocurre cuando hay dos corrientes de distinta concentración separadas por una membrana semipermeable, la corriente de menor concentración pasa a la de mayor, produciéndose una diferencia de niveles que genera una presión hidrostática hasta llegar al equilibrio. Se puede observar en la Figura 6 cómo pasa el agua de la disolución diluida (C1) a la más concentrada (C2), aumentando el nivel de esta última.

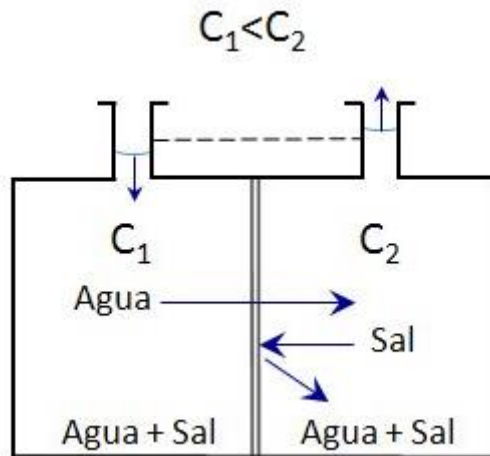


Figura 6. Representación de ósmosis. (Condorchem Envitech, 2021)

La presión osmótica es la presión necesaria para hacer que se detenga el flujo de agua de la disolución menos concentrada a la más concentrada. Se puede observar en la Figura 7 como las dos disoluciones han llegado al equilibrio y la diferencia de los niveles es igual a la presión osmótica.

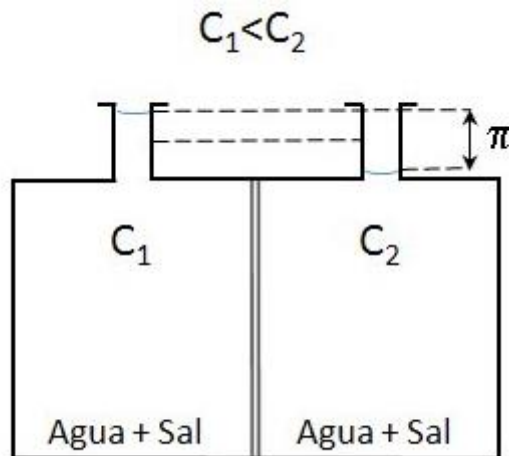


Figura 7. Estado de las dos disoluciones en equilibrio produciéndose una diferencia de nivel. (Condorchem Envitech, 2021)

Una vez ya se entienden las definiciones de ósmosis y presión osmótica ya se puede explicar el concepto de ósmosis inversa. Cuando la presión es mayor que la presión osmótica, el flujo se invierte y el agua va de la disolución más concentrada a la menos concentrada atravesando la membrana semipermeable como se muestra en la Figura 8. El resultado es una disolución más pura y otra muy concentrada.

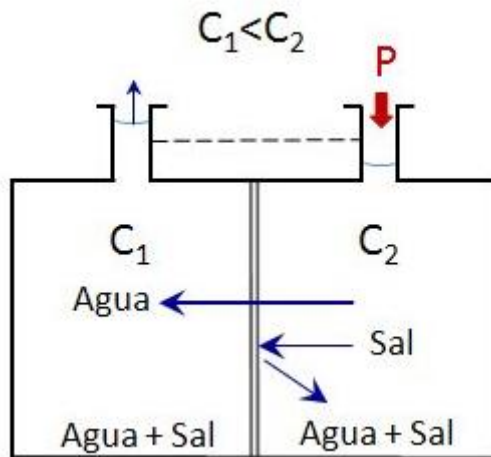


Figura 8. Representación de ósmosis inversa. (Condorchem Envitech, 2021)

2.4.2. Membranas

Las membranas son uno de los elementos imprescindibles en la ósmosis inversa ya que permiten el paso del disolvente (agua), pero no de los solutos (sales). Son las responsables de la separación de alrededor de un 99% de las sales disueltas en el agua. Se pueden encontrar membranas de distintos tipos, materiales y tamaños.

Las principales corrientes que componen un proceso de membranas se pueden observar en la Figura 9 y son las siguientes:

- Alimentación: el agua pretratada que entra al sistema.
- Producto o permeado: el agua permeada por la membrana que ha sufrido una disminución de sales.
- Concentrado: el agua de rechazo con una gran concentración de sales.

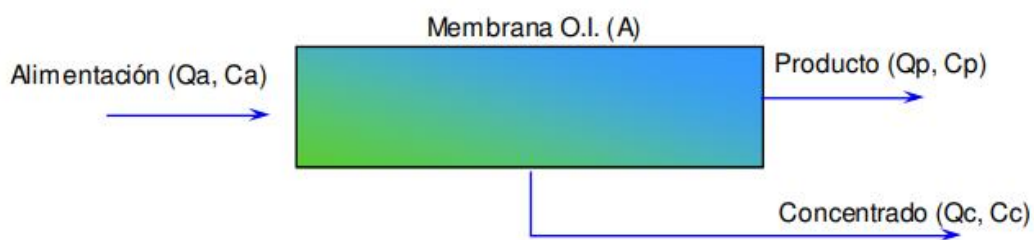


Figura 9. Corrientes principales en una membrana de ósmosis inversa. (Salas, 2015)

Siendo,

Q_a = caudal de alimentación en m^3/h ; C_a = concentración de los iones del caudal de alimentación en ppm (mg/L); Q_p = caudal del agua permeada en m^3/h ; C_p = concentración de iones del agua permeada en ppm; Q_c = caudal de concentrado o rechazo de la membrana en m^3/h ; C_c = concentración de iones del agua rechazada en ppm.

Las primeras membranas en utilizarse para la ósmosis inversa fueron las de Acetato de Celulosa las cuales tenían una alta permeabilidad y selectividad. Sin embargo, más tarde empezaron a usarse las de Poliamida Aromática en las cuales era más fácil controlar el tamaño de poro y la permeabilidad.

Uno de los principales problemas en las membranas de ósmosis inversa es el ensuciamiento de estas. Los motivos principales por los cuales se ensucian son los siguientes:

- Incrustaciones de componentes como el carbonato cálcico o los silicatos, esto depende mucho de la composición del agua de alimentación.
- Sedimentos de partículas como coloides.
- El bioensuciamiento, es decir, el crecimiento de microorganismos en la superficie de la membrana.
- Compuestos orgánicos o grasas de las aguas residuales.

Para evitar que el ensuciamiento repercuta en gran medida al agua tratada se realizan limpiezas de las membranas con agentes químicos o esterilizando. Además, se realiza un pretratamiento en el agua de entrada para disminuir el ensuciamiento lo máximo posible.

Usualmente, la vida de una membrana es de entre 2-3 años, dependiendo siempre de un uso y mantenimiento correctos.

2.4.3. Módulos de membrana

Para su aplicación industrial, las membranas se configuran en módulos. Existen distintos tipos de configuraciones de las membranas según el objetivo que se desee conseguir. Las principales disposiciones son las siguientes:

- Módulos tipo placa-bastidor: su configuración es parecida a los filtros-prensa. Las membranas se sitúan en bastidores separados por placas por donde circula la alimentación impulsada por una bomba como se muestra en la Figura 10.

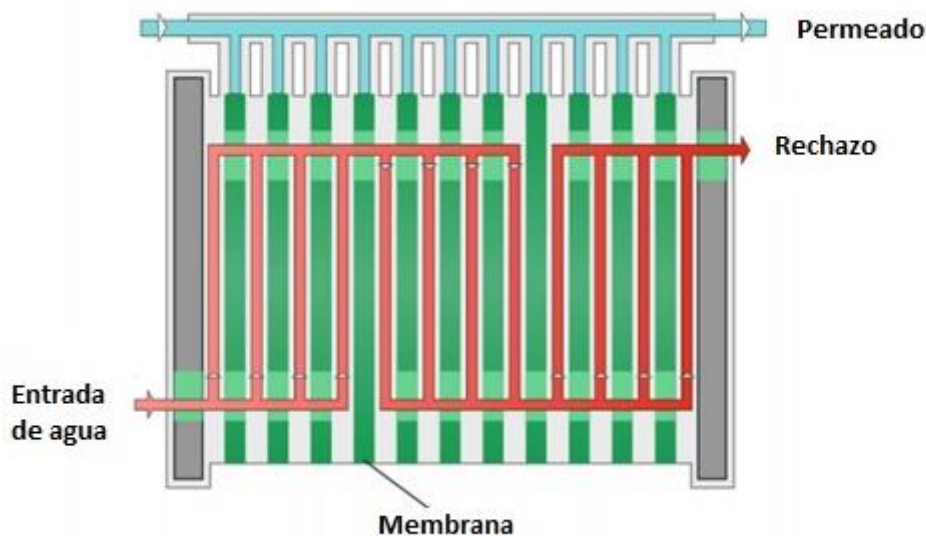


Figura 10. Módulo placa-bastidor (mod. de CITME, 2006)

- Módulos de membranas tubulares: la alimentación de estos módulos es impulsada por el interior de las membranas que se depositan dentro de carcasas cilíndricas. Se produce un flujo lateral del permeado que es recogido por la carcasa como se puede observar en la Figura 11.

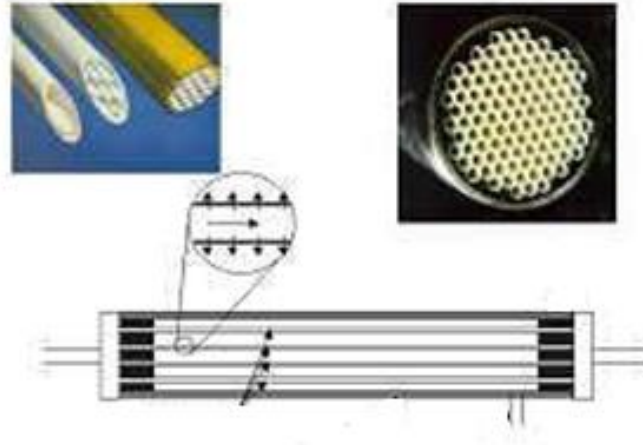


Figura 11. Membrana tubular. (Lenntech B.V., 2021)

- Módulos de membranas enrolladas en espiral: como se observa en la Figura 12 se enrollan membranas planas de distintos tejidos sobre un tubo central perforado por el cual pasa el agua permeada. El alimento entra de forma paralela al tubo y atraviesa la membrana en sentido perpendicular hasta llegar al tubo perforado. Es una de las principales configuraciones para el tratamiento de ósmosis inversa y se usa en la planta de ósmosis inversa actual que se va a estudiar.

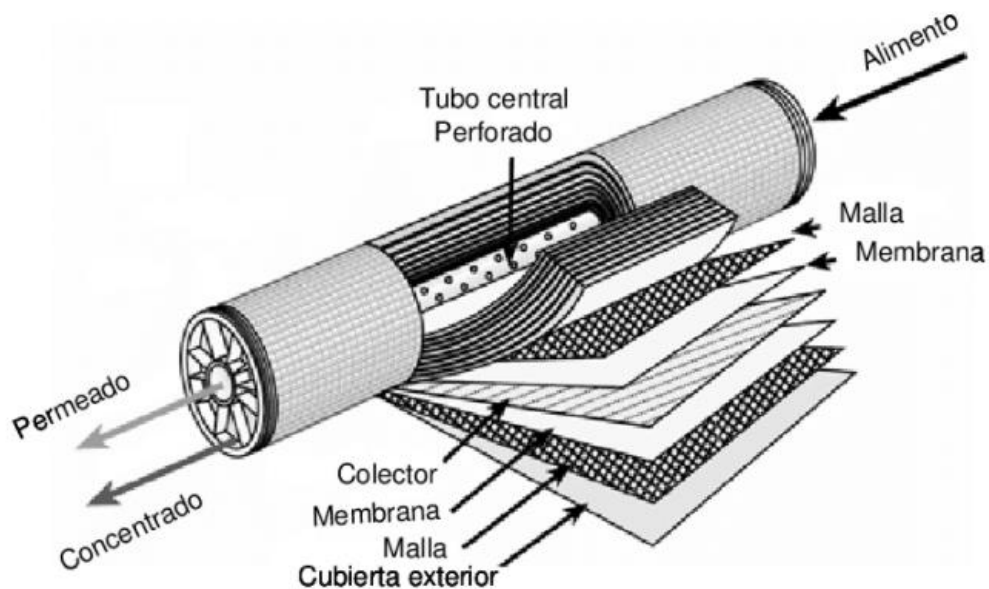


Figura 12. Módulo de membrana enrollada en espiral. (Sotto, 2008)

- Módulos de fibra hueca: fibras muy delgadas se insertan por ambos extremos de un soporte. La alimentación puede circular por el interior o el exterior de las fibras. En la Figura 13 se muestra un ejemplo.

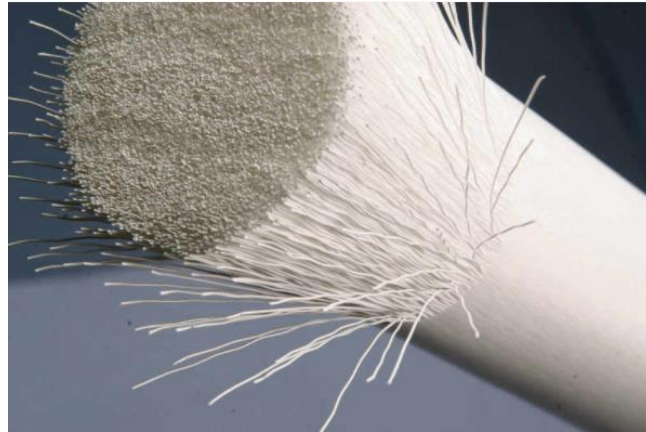


Figura 13. Membrana de fibras huecas. (EOZ, 2021).

2.4.4. Elementos principales de un sistema de ósmosis inversa.

Además de las membranas que ya han sido comentadas, existen otros elementos que no pueden faltar en una planta ósmosis inversa, y que son los mostrados en la Figura 14:

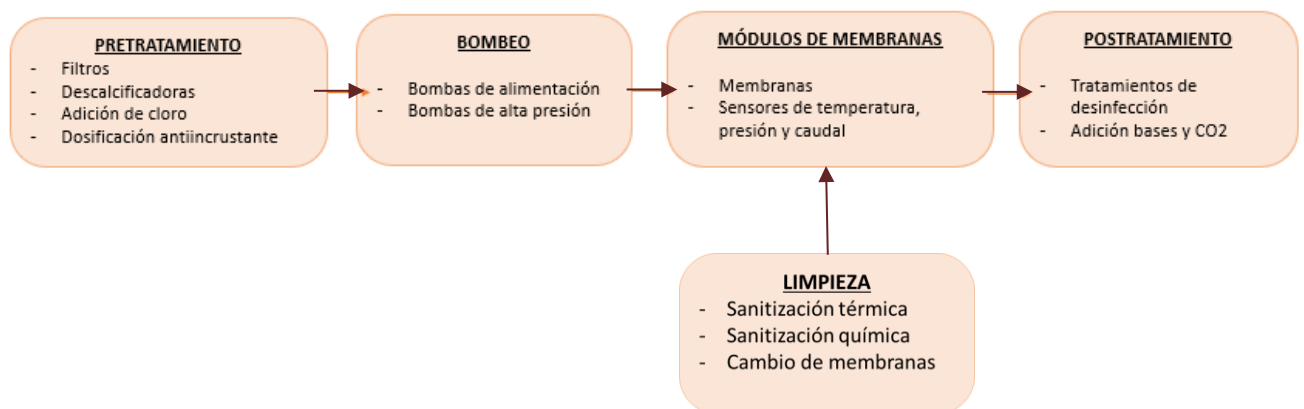


Figura 14. Diagrama de bloques con las etapas principales en un sistema de ósmosis inversa.

1. Pretratamiento: El pretratamiento se basa en adecuar el agua para que las membranas puedan trabajar lo mejor posible. El agua bruta pasa por distintos tipos de filtros como los Silex o de propileno hilado de 5 micras. En algunos casos, el agua puede pasar por una descalcificadora previa para evitar en mayor medida que se incrusten las membranas posteriormente. Además, se suele realizar la adición de hipoclorito sódico o de antiincrustante para evitar la reproducción de bacterias y las incrustaciones, respectivamente.

2. Bombeo: Las bombas son uno de los elementos necesarios. Pueden haber de varios tipos, las de alimentación que simplemente bombean el agua a la entrada de la planta y las de alta presión que son las necesarias para superar la presión osmótica y generar una mejor tasa de permeado.

3. Módulos de membrana: Se han explicado anteriormente en el punto 2.4.3. Es muy importante tener sensores que puedan mostrar la presión, la temperatura y el caudal para saber si el proceso está funcionando correctamente.

4. Postratamiento: Es muy importante mantener el agua en las condiciones correctas una vez sale de la planta de ósmosis inversa y se deposita en tanques. Por eso, se suelen aplicar tratamientos de desinfección para evitar el crecimiento de microorganismos, y adición de bases y CO₂ para recuperar la alcalinidad del permeado y alcanzar el equilibrio iónico para el caso de uso para consumo.

5. Limpieza: Cada cierto tiempo, según indiquen las especificaciones de las membranas y según el proceso que se realice, es necesario una limpieza. La limpieza puede ser de tipo ácido o básico, según el tipo de ensuciamiento de las membranas. Dentro de la limpieza también se contempla el cambio de las membranas una vez agoten su vida útil, también especificada por el fabricante.

Según las necesidades que se requieran se pueden adicionar otros elementos al sistema para mejorar la calidad del permeado.

2.4.6. Parámetros de operación del proceso

A continuación, se describen los principales parámetros de operación de un sistema de ósmosis inversa.

- **Densidad de flujo o Flux “J”:**

El flux hace referencia a la cantidad de agua permeada por unidad de área membrana, y se calcula según la ecuación 1.

$$J = \frac{Q_p}{A} \quad (1)$$

Siendo,

J = densidad de flujo o “flux” en L/(m²·h); Q_p = caudal volumétrico del permeado en L/h y A = área superficial de la membrana en m².

- **Índice de rechazo de sales “R(%)”:**

Este parámetro hace referencia a el porcentaje del soluto que no pasa a través de la membrana.

$$R (\%) = \frac{C_a - C_p}{C_a} \cdot 100 \quad (2)$$

Siendo,

R (%) = el porcentaje de rechazo de soluto o la retención que soportan las membranas en %. Ca y Cp se han descrito anteriormente.

Algunos parámetros como la temperatura, el pH o la presión pueden afectar al porcentaje de rechazo iónico.

- **Recuperación o conversión "Y(%)":**

La recuperación o conversión de una membrana es la relación entre el caudal de permeado producido y el de alimento a la misma, de acuerdo con la expresión de la ecuación (3):

$$Y(\%) = \frac{Q_P}{Q_A} \cdot 100 \quad (3)$$

Siendo,

Y(%) = recuperación o conversión (%), Qp = caudal de permeado en m³/h y Qa = caudal de alimentación en m³/h.

El porcentaje de recuperación es un dato importante ya que las membranas están limitadas en la concentración de las sales disueltas, ya que cuando aumente el TDS (Total de Sólidos Disueltos) los minerales que sean menos solubles podrían precipitar sobre la superficie de la membrana, provocando una pérdida de sus propiedades permeoselectivas. Por ello, la recuperación de una membrana está limitada entre 10-20%, y para alcanzar mayores rendimientos en la instalación se emplean las configuraciones que se describen en el siguiente apartado.

2.4.6. Configuraciones de un sistema de ósmosis inversa.

Los tubos que contienen las membranas se pueden configurar de distintos modos según el resultado que se quiera obtener y el agua que se quiera tratar. En un tubo de una planta de ósmosis inversa las membranas se colocan en serie dentro de este para poder conseguir un valor más alto de conversión. Como se muestra en la Figura 15 al estar colocadas en serie el rechazo que se produce en la primera membrana es el alimento de la segunda y por lo tanto se consigue disminuir el rechazo y aumentar el permeado.



Figura 15. Ejemplo de membranas en serie dentro de un tubo de ósmosis inversa. (Culling Water Projects, 2017)

Las principales configuraciones para diseñar una planta de ósmosis son las siguientes:

- Etapas: las etapas son alimentadas con el concentrado de la etapa anterior y los dos permeados de las etapas (producto 1 y producto 2) son mezclados para obtener un permeado promedio (producto mezcla) con un caudal Qm y una concentración de sales Cm, como se muestra en la Figura 16.

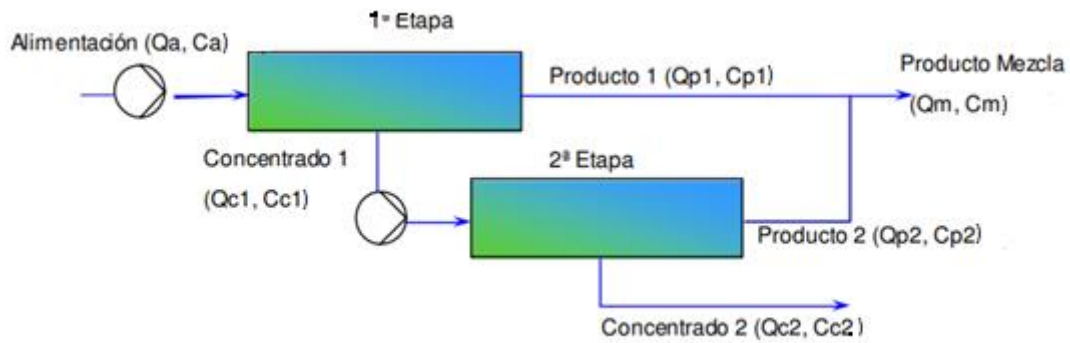


Figura 16. Ejemplo de configuración de ósmosis inversa con dos etapas. (Salas, 2015)

- Pasos: es la configuración básica con las corrientes de alimentación, permeado y concentrado como se muestra en la Figura 17. Si se añade un segundo paso, su alimentación será el permeado del primero (producto paso 1, en la figura). Esta configuración se emplea cuando se quiere conseguir un agua más purificada, es decir, con una menor conductividad y una concentración de los iones más baja.

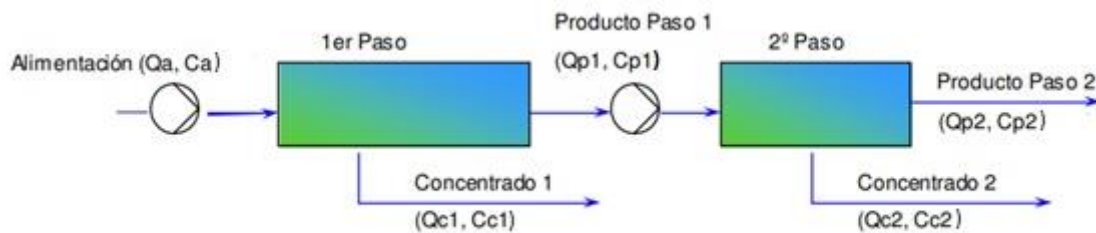


Figura 17. Ejemplo de configuración de ósmosis inversa con doble paso. (Salas, 2015)

Dentro de cualquiera de las configuraciones anteriores, se pueden añadir recirculaciones y/o bypass, como se muestra en la Figura 18, para optimizar el proceso y modificar o ajustar el valor de concentración de alguna corriente.

- Recirculaciones: se basan en recircular el concentrado a la alimentación de alguno de los pasos. Es una manera de reducir el concentrado neto de la planta y poder aprovechar para purificar una mayor cantidad de agua.
- Bypass: se basa en llevar parte del alimento de una etapa o un paso como producto final. Usualmente, se añade al sistema porque el agua permeada ya ha llegado a la consigna que se requiere.

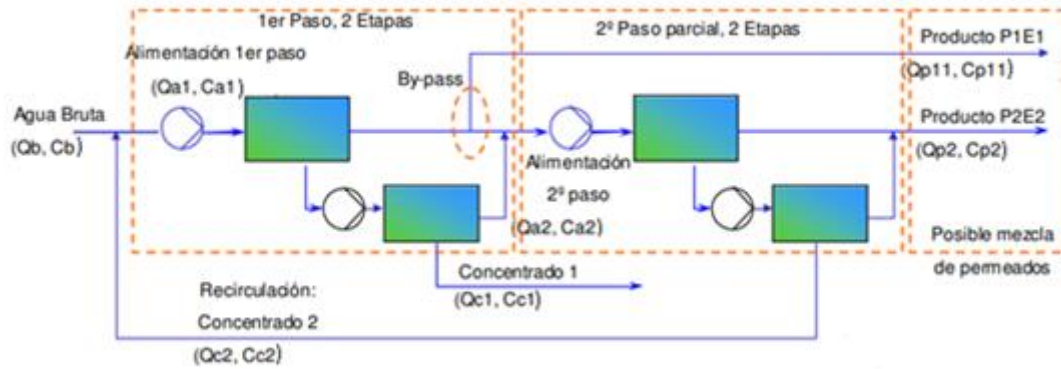


Figura 18. Ejemplo de configuración de ósmosis inversa con recirculación y bypass. (Salas, 2015)

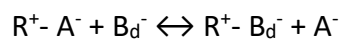
2.5. FUNDAMENTOS DEL INTERCAMBIO IÓNICO (II)

El intercambio iónico es una operación de separación a partir de la transferencia de materia entre un fluido y un sólido. Los iones de la fase fluida pasan al sólido intercambiándose por iones de la misma carga que están unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. Los sólidos están formados generalmente por resinas sintéticas. La estructura de la resina consta de un ion fijo que es neutralizado por un contra-ion de carga opuesta, este último es el móvil y el que realiza el intercambio con la disolución.

2.5.1. Tipos de resina.

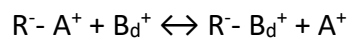
La resina puede ser de dos tipos según los iones que intercambia:

- **Aniónica:** capaz de retener e intercambiar los iones cargados negativamente.



Siendo R^+ el catión fijo, A^- el anión intercambiable del sólido y B_d^- el anión que pasa de la disolución a la resina.

- **Catiónica:** capaz de retener e intercambiar los iones cargados positivamente.



Siendo R^- el anión fijo, A^+ el catión intercambiable del sólido y B_d^+ el catión que pasa de la disolución a la resina.

Las resinas también se pueden dividir dependiendo de su grupo funcional según Dardel (2019):

- **SAC:** Resinas de intercambio catiónico fuertemente ácidas, su grupo funcional es el ácido sulfúrico ($-SO_3H$).
- **WAC:** Resinas de intercambio catiónico débilmente ácidas, su grupo funcional es el ácido carboxílico ($COOH$).

- **SBA:** Resinas de intercambio aniónico fuertemente básicas, su grupo funcional es una sal de amonio cuaternario (R_4N^+).
- **WBA:** Resinas de intercambio aniónico débilmente básicas, sus grupos funcionales son aminas primarias ($-NH_2$), secundarias ($-NHR$) y terciarias ($-NR_2$).
- **Resinas quelantes:** el grupo funcional tiene las propiedades de un reactivo específico, forman quelatos selectivamente. Los más comunes son nitrógeno, azufre, oxígeno y fósforo.

2.5.2. Etapas en el proceso de Intercambio Iónico.

Las resinas están diseñadas para que trabajen dentro de una columna vertical a través de la cual pasa la disolución que se quiere tratar. A continuación, se explican las distintas etapas del proceso (Hidalgo y Guamán, 2006):

1. **Empaquetamiento de la columna:** se introduce la resina o resinas elegidas dentro de la columna realizando previamente un lavado.
2. **Acondicionamiento:** se adecua la resina a las condiciones que requiere el proceso, como, por ejemplo, modificando el contraión de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada. Posteriormente, se elimina el exceso con un lavado.
3. **Carga:** se introduce la disolución que se quiere tratar produciéndose el intercambio de iones. Son muy importantes los parámetros de operación como la velocidad, el pH o la temperatura para optimizar el proceso. Estos dependen de la resina utilizada. Al principio del intercambio, la transferencia de materia se produce en la entrada de la disolución, y a medida que transcurre el tiempo, el lecho se va saturando y la zona de transferencia de materia va cambiando como se muestra en la imagen de la Figura 19.

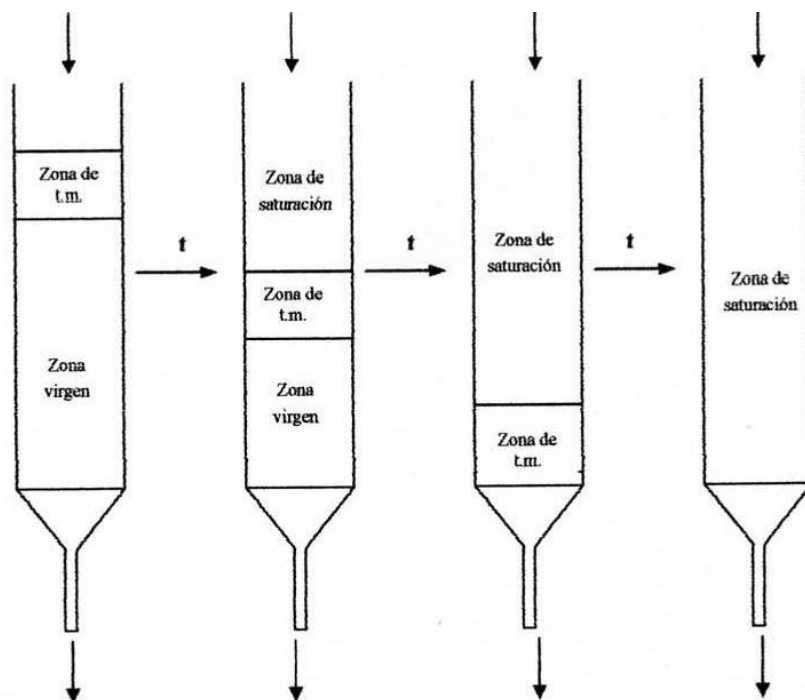


Figura 19. Evolución de la concentración en un lecho de intercambio iónico. (Belén, 2007)

Una vez la resina llega a saturarse completamente y se observa un aumento de los iones en la disolución de salida significa que el tratamiento ya no es eficiente, y se le llama punto de ruptura. La resina ha agotado su capacidad de intercambio iónico, por lo tanto, hay que pasar a la siguiente fase.

La capacidad se puede definir como el valor de la concentración en iones que pueden ser retenidos por unidad de peso de resina. Es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el diseño de un intercambiador iónico.

4. Etapas de regeneración: esta etapa consiste en devolver la resina a su estado inicial una vez está saturada. Son importantes parámetros como la velocidad de flujo, la concentración y el volumen del regenerante.

2.5.3. Modos de operación.

Hay distintos modos de trabajar en las columnas de intercambio iónico (Dardel, 2015):

- Co-flujo

En las etapas de carga y de regeneración el flujo se introduce por la parte superior. Dicha forma de regeneración no es la óptima, ya que las resinas fuertemente ácidas o básicas no se regeneran correctamente en las capas inferiores del lecho. Cuando se inicia la carga hay una fuga debida al desplazamiento de los iones contaminantes (H^+ o OH^-). Es necesario una mayor cantidad de regenerante.

- Contra-corriente:

En este caso, el regenerante se introduce en la dirección opuesta a la disolución de la carga. Hay varios casos dependiendo de las direcciones de los flujos:

- Carga de flujo ascendente y regeneración descendente (procesos Amberpack y lecho flotante).
- Carga de flujo descendente y regeneración ascendente (procesos Upcore y UDF)

Una de las ventajas de la regeneración a contra-corriente frente la co-flujo es que el agua tratada está mucho más purificada ya que la fuga es muy baja. Además, se requiere menos regenerante debido a que los iones contaminantes no son empujados a través de todo el lecho.

2.6. TRATAMIENTO ACTUAL DEL AGUA EN LA EMPRESA

Se va a detallar todo el proceso que sigue el agua municipal que alimenta a la empresa desde su entrada sin tratar hasta su purificación. Para ello, como se ha comentado anteriormente, es muy importante un buen pretratamiento que adapte el agua de entrada para que no perjudique a las membranas de la ósmosis inversa. Todo el proceso detallado del tratamiento del agua se puede observar en el Plano 1 del Documento PLANOS del presente TFG.

2.6.1. Pretratamiento.

El agua de red proviene del municipio donde se encuentra la empresa y va pasando por una serie de tratamientos para conseguir que sea segura y de buena calidad.

Primero de todo el agua atraviesa por un filtro que retiene sólidos de gran tamaño como piedras, ramas u hojas. A continuación, se le añade dióxido de cloro para desinfectarla y almacenarla. Seguidamente, pasa por una descalcificadora para eliminar el calcio y el magnesio que lleva consigo el agua. Y como último paso, entra en un filtro SILEX compuesto por diversas granulometrías para filtrar las materias en suspensión.

Una vez pasa por todos los tratamientos anteriores se dirige a la planta de ósmosis inversa para disminuir la conductividad y conseguir un agua purificada.

2.6.2. Tratamiento con ósmosis inversa.

La planta de ósmosis inversa actual consta de los siguientes elementos:

- Dosificación de antiincrustante y bisulfito.
- Prefiltración de 5 filtros de 1 micra.
- 1 intercambiador de calor.
- 1 bomba de aporte y 2 de alta presión.
- 2 equipos ultravioletas (entrada y salida).
- 1 sistema de ósmosis inversa de doble paso.
- Varios sensores de presión, temperatura, caudal y nivel.
- Varias sondas redox y de conductividad.

Una vez el agua llega al sistema de ósmosis inversa, antes de pasar por las membranas, es necesario una serie de pretratamientos para que las estas puedan trabajar correctamente y tarden más en ensuciarse. Se van a describir las distintas fases por las cuales pasa el agua.

1. Depósito.

El agua de entrada se almacena en un depósito donde se mezclan varias corrientes recirculadas, que se explicarán a continuación.

2. Adición de antiincrustante y bisulfito sódico.

La adición de estos dos compuestos se produce cuando el agua sale del depósito. Por un lado, el antiincrustante secuestra las sales Ca^{2+} y Mg^{2+} , de esta forma se elimina la dureza que puede contener el agua y así se evitan futuras incrustaciones en las membranas. Por otro lado, el bisulfito sódico se añade para neutralizar el cloro proveniente del agua de red, ya que las membranas son de poliamida y no toleran el cloro libre en continuo por encima de 0 '1 ppm.

3. Prefiltración.

El agua pasa por 5 filtros de 1 micra para retener la mayor parte de los sólidos suspendidos antes de entrar en las membranas.

4. Intercambiador de calor.

La temperatura es uno de los parámetros más importantes de la planta de ósmosis inversa, ya que está diseñada para una temperatura de 20°C. Por lo tanto, el intercambiador de calor adecua la temperatura del agua de entrada a la que requiere el sistema.

5. Ultravioleta de entrada y de salida.

Los ultravioletas son otro elemento de purificación del agua, ayudan a eliminar contaminantes como virus, bacterias y microbios. Uno se encuentra antes del primer paso y otro después del segundo paso por donde sale el agua osmotizada, para eliminar si queda un mínimo resto de contaminación.

6. Ósmosis inversa.

El sistema de ósmosis inversa consta de dos pasos. El primer paso consta de dos tubos en serie con 3 membranas cada uno, en el cual se reduce la conductividad de 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aproximadamente. El permeado pasa al segundo paso y el rechazo se divide en dos flujos, uno va al inicio de la bomba del primer paso y el otro se desecha a desagüe. El segundo paso consta de un único tubo con 4 membranas, en el que se reduce la conductividad hasta 4-5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aproximadamente. En este paso, el rechazo también se divide en dos, una parte va al inicio del segundo paso, antes de la bomba y el otro va al depósito inicial juntándose con el agua de red que entra, ya que la conductividad del rechazo del segundo paso es menor a la del agua de entrada. El material de las membranas es de poliamida, concretamente son el modelo HSRO-390-FF de la marca DUPONT Water Solutions.

Finalmente, el agua saliente de la planta de ósmosis inversa ya purificada se almacena en diversos depósitos, lista para poder utilizarse en la fabricación o en las limpiezas que lo requieran.

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es la modificación de la planta de ósmosis inversa actual de una empresa del sector cosmético para adecuarse a la normativa europea en el agua tratada. Por otro lado, también es objetivo disminuir el caudal de rechazo para conseguir una mayor sostenibilidad de la gestión del agua en la empresa.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Estudiar la posible modificación de las condiciones de operación y/o configuración de la planta actual de OI para adaptar el agua tratada a la normativa europea.
- Estudiar la adición de un sistema de intercambio iónico alimentado por el permeado de la planta actual de OI para adaptar el agua tratada a la normativa europea.
- Seleccionar la alternativa más adecuada para conseguir los parámetros deseados del permeado con una buena rentabilidad.
- Definir las actuaciones necesarias sobre la planta modificada para reducir el caudal de rechazo a gestionar.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio de la planta de ósmosis inversa se va a utilizar un software comercial para simular distintos casos y analizar posteriormente los resultados. El programa con el que se van a realizar las simulaciones es el que ofrece el fabricante de las membranas que hay actualmente en la planta, se llama WAVE y pertenece a la empresa “DUPONT Water Solutions”.

En el programa WAVE hay integradas tres tecnologías: la ultrafiltración, la ósmosis inversa y el intercambio iónico, de las cuales se utilizarán las dos últimas.

Para entender mejor cuál es el procedimiento que se va a seguir en el presente TFG, se muestra en la Figura 20 un diagrama de bloques con las respectivas simulaciones que más adelante se explicarán.

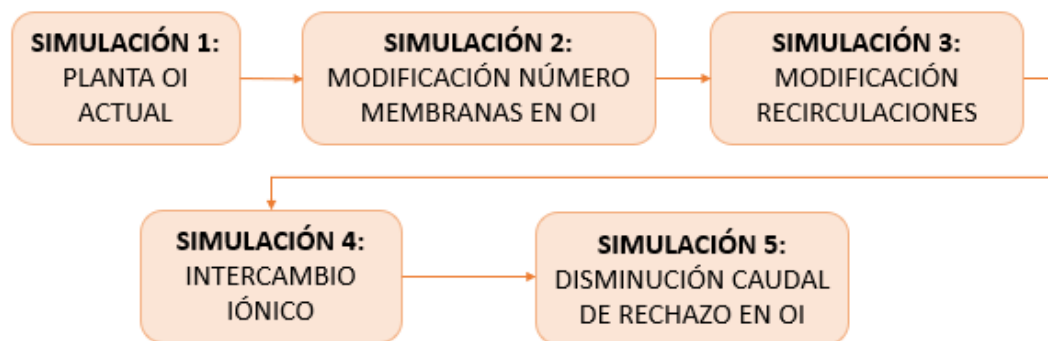


Figura 20. Diagrama de bloques del procedimiento de las simulaciones.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE EMPLEADO

En primer lugar, se procede a explicar el funcionamiento general del software y más tarde se explicará detalladamente cada simulación, ya que los procesos que se van a simular son distintos y, por lo tanto, el procedimiento no es el mismo.

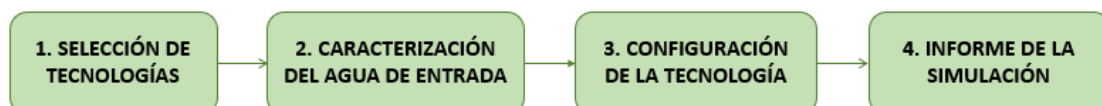


Figura 21. Diagrama de bloques de los pasos generales en el programa.

La secuencia a seguir en el programa WAVE de simulación es la mostrada en la Figura 21, y consiste en las siguientes fases:

1. Selección de tecnologías.

Se escoge la tecnología que se va a querer utilizar para purificar el agua, hay distintas opciones, entre ellas la ósmosis inversa, el intercambio iónico y la ultrafiltración.

Se especifica el caudal de entrada o de producto del agua y el tipo de agua a tratar, escogiendo entre permeado, municipal, suavizada, residual, etc. En la Figura 22 se muestra una captura de la pantalla de selección de tecnología del programa.

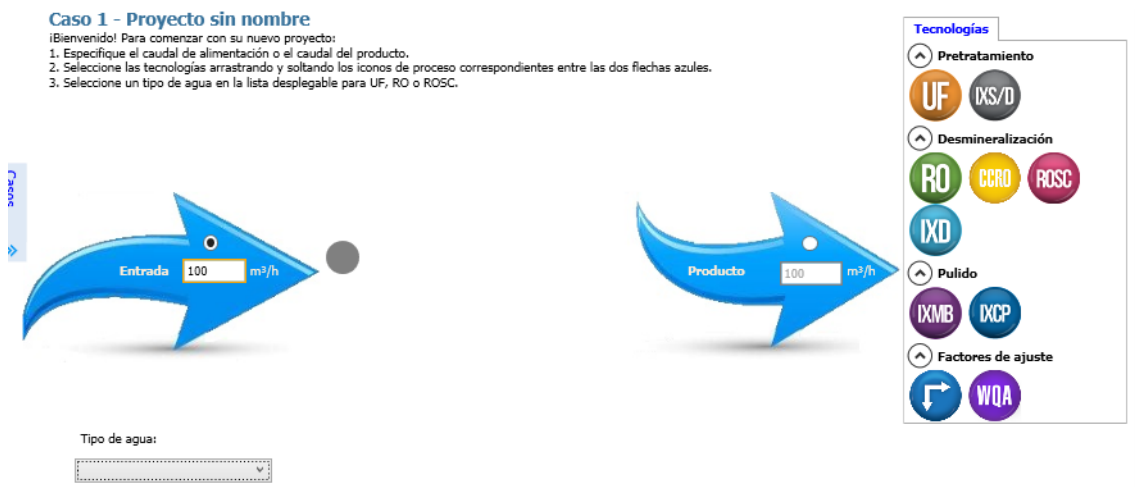


Figura 22. Captura de pantalla de inicio del programa WAVE.

2. Caracterización del agua de alimentación.

Se detalla el agua que va a entrar al sistema añadiendo los parámetros de alimentación (tipo y sub-tipo de agua), el contenido de sólidos como la turbidez, los sólidos suspendidos totales (SST), el índice de densidad sedimentos (SDI) y el contenido orgánico (TOC), la temperatura (máxima, mínima y de diseño) y el pH. También se puede añadir el contenido concreto de cada ion para especificar con más detalle el agua de entrada. En la Figura 23 se muestra una captura de pantalla del programa donde se añaden todos los datos descritos anteriormente.

Proyecto de modificación de una planta de ósmosis inversa industrial de una empresa del sector cosmético.

Definición de corriente
Corriente 1 100,00 %
Añadir corriente

Agua de alimentación - Corriente 1

Parámetros de alimentación

Tipo de agua:
Sub-tipo de agua:

Contenido de sólidos

Turbidez: 0,00 NTU
Sólidos suspendidos totales (SST): 0,00 mg/L
SDI₁₅: 0,00
Contenido orgánico
Orgánicos (TOC): 0,00 mg/L

Temperatura
10,0 °C 25,0 °C 40,0 °C
Mínimo Diseño Máximo
pH @25,0°C: 7,00 pH @25,0°C: 7,00
Información adicional sobre el agua de alimentación

Cationes

Símbolo	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
NH ₄ ⁺	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,000
Na	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000
Ca	0,000	0,000	0,000
Sr	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000
Total cationes:	0,000		0,000

Aniones

Símbolo	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
CO ₂	0,000	0,000	0,000
HCO ₂ ⁻	0,000	0,000	0,000
NO ₂ ⁻	0,000	0,000	0,000
Cl	0,000	0,000	0,000
F	0,000	0,000	0,000
SO ₄ ⁻	0,000	0,000	0,000
Br	0,000	0,000	0,000
PO ₄ ⁻	0,000	0,000	0,000
Total aniones:	0,000		0,000

Neutros

Símbolo	mg/L
SiO ₂	0,000
B	0,000
CO ₂	0,000
Total neutros:	0,000

Sólidos Totales Disueltos (TDS): 0,000 mg/L
Balance de carga: 0,000000 meq/L
Conductividad estimada: 0,00 µS/cm

Figura 23. Captura de pantalla de la caracterización del agua del programa WAVE.

El programa calcula automáticamente con los datos que se han añadido, la conductividad del agua de entrada, los sólidos disueltos totales (TDS) y el balance de cargas que se ajustará dándole al botón de “Ajustar todos los iones”, tal y como se muestra en la Figura 24.

Ajustar solutos

Ajustar cationes Ajustar aniones Ajustar todos los Iones

Ajustar CO₂/HCO₃/CO₃ total

Ajuste del balance de cargas

Figura 24. Captura de pantalla de Ajuste de solutos en el programa WAVE.

3. Configuración de la tecnología

En la siguiente fase se configura el sistema de la forma que se desea, especificando todos los parámetros necesarios. Se va a desarrollar por separado la elección de la ósmosis inversa y el intercambio iónico.

- **Ósmosis inversa**

1. Pasos y etapas: se escogen el número de pasos que tiene la planta y el número de etapas.
2. Factor de flujo: se especifica el factor de flujo, este dato se refiere a la pérdida de flujo debido a la suciedad de las membranas, es decir, hace referencia al ensuciamiento. El rango de valores va de 0 a 1, el programa especifica que para membranas completamente nuevas el valor adecuado es 1, mientras que para membranas ya usadas y que son antiguas es de 0.6; y para el resto de las membranas, que ya llevan un tiempo trabajando el valor es de 0.85.

3. Membranas: se selecciona el número de tubos que hay por etapa y el número de elementos que hay por tubo, es decir, el número de membranas que hay en cada uno, además del tipo de membrana comercial que se va a utilizar.

4. Presión: el programa al simular mostrará las presiones idóneas para el sistema, por lo tanto, hay que inicializarlas con el valor de 0, menos la presión por pérdidas en las tuberías, que es de 0,34 bar y la añade por defecto el programa para realizar los cálculos.

En la Figura 25 se muestra una captura de pantalla con todos los parámetros a añadir ya descritos.

Configuración del paso de osmosis inversa
Configuration for Pass 2

Número de etapas: 1 2 3 4 5

Factor permeabilidad:

Temperatura: °C

Contrapresión de paso: bar

Caudales

Caudal alimentación: m³/h

Conversión: %

Caudal permeado: m³/h

Flujo: LMH

Caudal recirculación: m³/h

Bypass: m³/h

Etapas	
Etapa 1	
Nº. Tubos/Etapa	1
Nº. Elementos/Tubo	4
Tipo de elemento	HSRO-390-FF
Especificaciones	
Nº. Elementos/Etapa	4
Pre-stage ΔP (bar)	0,34
Stage Back Press (bar)	0,00
Boost Press (bar)	N/A
Feed Press (bar)	0
% de conc. a alim.	0,00
Factor permeabilidad	0,85

Figura 25. Captura de pantalla de la configuración de la ósmosis inversa en el programa WAVE.

5. Caudales y corrientes: para la configuración de los caudales de permeado y de rechazo de los pasos, se irán añadiendo en forma de conversión en cada paso, como se muestra en la Figura 26. Además, se pueden añadir recirculaciones, bypass y separación de permeado.

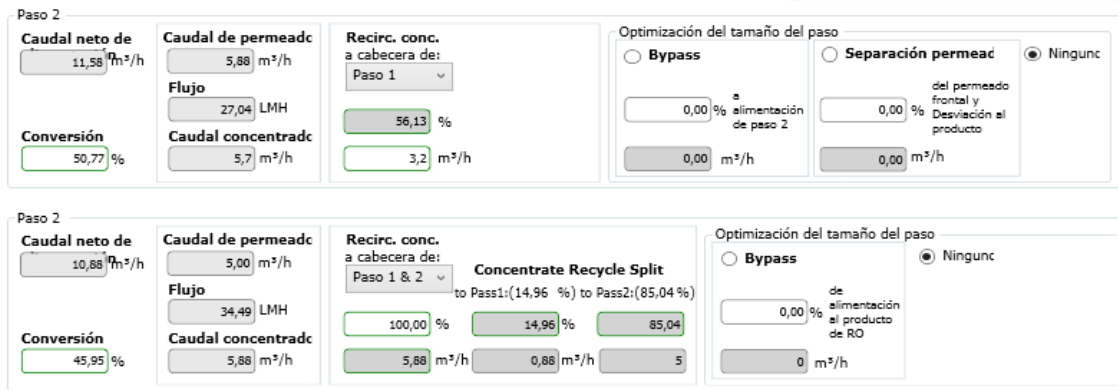


Figura 26. Captura de pantalla de la configuración de los caudales y corrientes de la ósmosis inversa en el programa WAVE.

El software WAVE a la vez que va configurando el sistema que se quiere crear va mostrando un diagrama de flujo, en el que se incluyen las distintas corrientes, las etapas y/o los pasos y las bombas. Así pues, se puede ir comprobando visualmente que la configuración que se está añadiendo es la correcta. En la Figura 27 se muestra un ejemplo de diagrama de flujo que ofrece el programa.

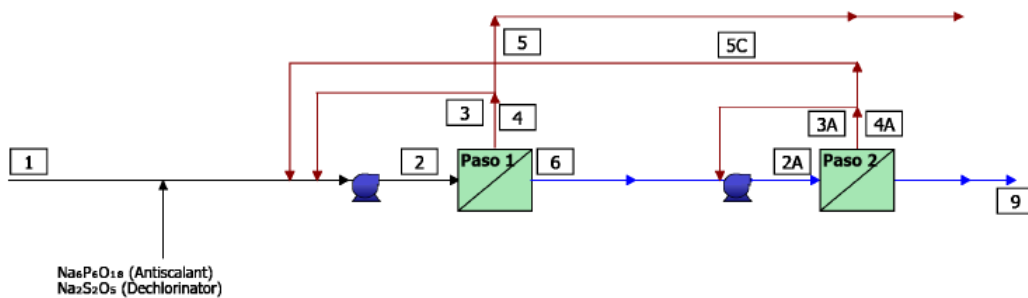


Figura 27. Ejemplo del diagrama de flujo ofrecido por el software WAVE.

- **Intercambio iónico**

1. Inicialización del Intercambio Iónico

Primero de todo, se definen los trenes que van a estar operando y los que van a estar en espera. También se especifica la velocidad específica o carga volúmica a la que se va a operar en BV/h (1 BV/h = 1 m³ de agua por m³ de resina por hora). Los valores de esta velocidad dependen de la configuración del intercambiador iónico y del resultado que se quiere conseguir, generalmente, el valor ronda sobre 5 y 50 BV/h. En la Figura 28 se muestra la captura de pantalla del programa para agregar los datos.

Inicialización de IX

Objetivo de la modelización

- Diseño de planta nueva
- Evaluar planta existente
- Conversión de planta a UPCORE™

Configuración del tren

trenes operando:

trenes en espera:

N.º total de trenes:

% Desviación:

Caudal producto de IX

Automático: m³/h

Frecuencia de regeneración

- Duración ciclos operación: Horas
- Definir velocidad específica: BV/h

IX - Desmineralización

Desmineralización

Figura 28. Captura de la Inicialización del Intercambio Iónico en el programa WAVE.

2. Selección del tanque y del sistema de regeneración.

Seguidamente se selecciona el tipo de resinas que se van a utilizar pudiendo elegir individualmente o en conjunto entre WAC, SAC, SBA y WBA. También se especifica el tipo de regeneración (co-corriente o contracorriente) y si se quiere utilizar un desgasificador para ayudar a la eliminación del CO₂ tal y como se muestra en la Figura 29.

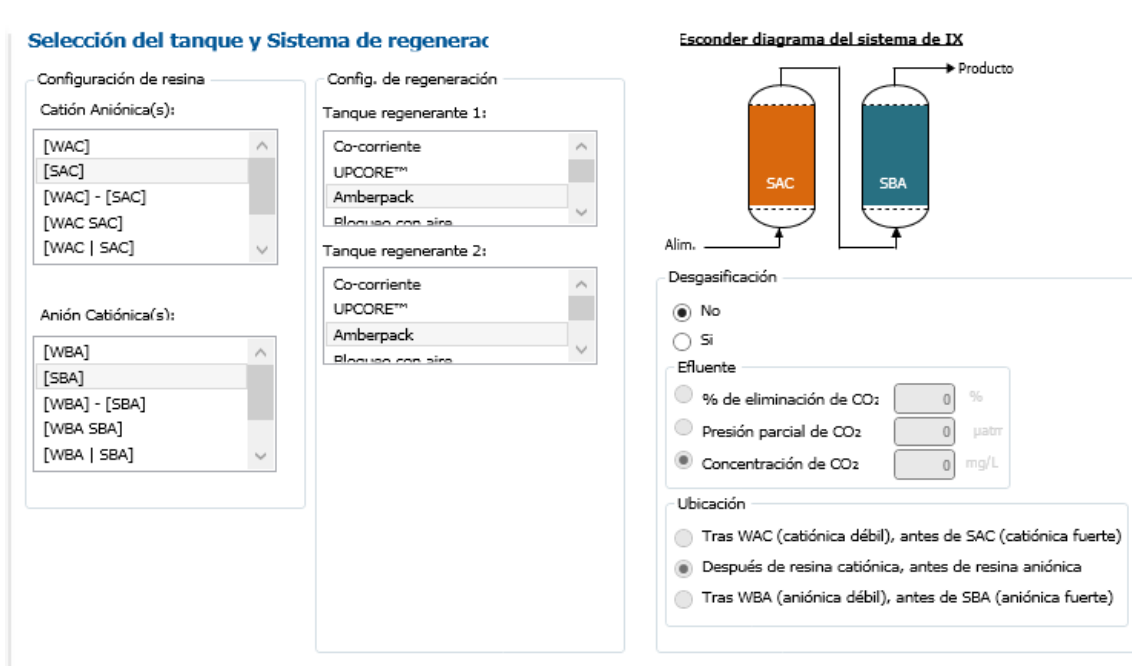


Figura 29. Captura de pantalla de la selección del tanque y sistema de regeneración del Intercambio Iónico en el programa WAVE.

3. Selección de resinas.

En este paso se seleccionan el modelo de resina comercial que se quiere utilizar en el proceso pudiendo elegir la forma iónica de suministro y los m³ de resina por paquete. En la Figura 30 se puede observar cómo el programa da la opción de elegir diferentes resinas dentro del catálogo comercial del fabricante.

Selección de resina

Marca preferida

DOWEX™ AMBERLITE™/AMBERJET™/AMBERSEP™ DUOLITE™

Resina

Inerte	Inerte
Ninguno	Ninguno
AmberLite™ 14i	AmberLite™ 14i

SAC	SBA
AmberLite™ HPR1200 H	AmberLite™ HPR4200 OH
AmberLite™ HPR1300 H	AmberLite™ HPR4700 OH
AmberLite™ HPR1600 H	AmberLite™ HPR4800 OH

Forma iónica de suministro

Na H

OH Cl

m3 resina/paquete m³

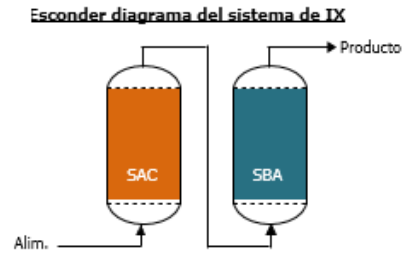


Figura 30. Captura de pantalla de la selección de las resinas del Intercambio Iónico en el programa WAVE.

4. Elección del regenerante.

Se configura el tipo de regenerante para cada resina, la concentración y la dosificación. También se selecciona el tipo de agua que se va a utilizar, tal y como se muestra en la Figura 31.

Regeneración

Condiciones de la resina catiónica

Regenerante

HCl (32)
H₂SO₄(98)

Temperatura 20,0 °C Diseño

	Concentración	Dosificación
<input checked="" type="checkbox"/> Paso 1	4 %	100 %
<input type="checkbox"/> Paso 2	0 %	0 %
<input type="checkbox"/> Paso 3	0 %	0 %

Agua de Servicio

Contralavado Regen

Agua de alimentación
 Agua desmineralizada

Condiciones de la resina aniónica

Regenerante

NaOH (50)

Temperatura 20,0 °C Diseño

	Concentración	Dosificación
<input checked="" type="checkbox"/> Paso 1	4 %	100 %
<input type="checkbox"/> Paso 2	0 %	0 %
<input type="checkbox"/> Paso 3	0 %	0 %

Agua de Servicio

Contralavado Regen

Agua de alimentación
 Agua desmineralizada

Figura 31. Captura de pantalla de la selección del regenerante en el Intercambio Iónico en el programa WAVE.

5. Calidad del producto.

En este paso se especifica la calidad que se requiere para el agua purificada, añadiendo parámetros como la conductividad o la eficiencia de eliminación de orgánicos en el punto medio y final. Además, se añade el factor de seguridad, que corresponde al valor mínimo aceptado que añade el usuario, una vez se compile el programa recalculará este factor con el mismo nivel de seguridad o mayor. También se pueden añadir los g/L de la dosis del regenerante, aunque el mismo programa ya los calcula. Por otro lado, está la opción de neutralizar el efluente residual y optimizar la dosificación. Todo ello se puede observar en la captura de pantalla mostrada en la Figura 32.

The screenshot displays a software interface for configuring ion exchange regeneration. It is divided into two main columns: 'Regeneración de la resina catiónica' (left) and 'Regeneración de la resina aniónica' (right). Each column has a 'Calidad de efluente' (Effluent Quality) section and a 'Dosis de regenerante' (Regenerant Dose) section. Below these are three global settings: 'Efluente residual neutralizado', 'Cálculo de sobre agotamiento', and 'Optimización de dosificación'.
Regeneración de la resina catiónica:
- **Calidad de efluente:** Promedio Punto final. Na: 0,072 | 0,093 mg/L. Conductividad: 0,78 | 1,00 µS/cm.
- **Dosis de regenerante:** Factor de seguridad de SA: 0,95. HCl Dosis: 50 g/L.
Regeneración de la resina aniónica:
- **Calidad de efluente:** Promedio Punto final. SiO₂: 0,02 | 0,04 mg/L. Eficiencia en eliminación de orgánicos: 70,00 %.
- **Dosis de regenerante:** Factor de seguridad de SA: 0,95. NaOH Dosis: 45 g/L.
Global Settings:
- **Efluente residual neutralizado:** No requerido Sí
- **Cálculo de sobre agotamiento:** Manual Automático
- **Optimización de dosificación:** No Sí (valores se sobrescribirán)

Figura 32. Captura de pantalla de la selección de la calidad del producto en el Intercambio Iónico en el programa WAVE.

6. Parámetros finales.

Por último, una vez se ha realizado la simulación, se pueden modificar los parámetros finales (ver Figura 33) como el volumen de la resina, el diámetro o la altura del lecho adecuándolos a las necesidades. Una vez se hayan modificado se volverá a compilar el programa para que vuelva a calcular el proceso.

Ajuste de parámetros finales [Mostrar diagrama del sistema de IX](#)

Parámetros de ajuste	Tanque 1 SAC	Tanque 2 SBA
Volumen de resina entregada (m ³)	0,27	0,5
Diámetro exterior del tanque (mm)	500	600
Altura del lecho de resina		
suministrada (mm)	1467,52	1866,61
Altura de referencia (mm)	1358,81	1555,51
regenerada (mm)	1467,52	1866,61
agotada (mm)	1397,64	1777,73
Volumen de resina inerte (m ³)	0	
Altura del lecho de inerte (mm)		
Altura del tanque (mm)	2391	2657
Espesor de pared del tanque (mm)	8	8
Pérdida de car (bar)	0,46	0,3
con cantidad recomendada		
Tamaño del empaquetado de resina (mm)	0,001	0,001

Usar geometría de tanque y valores del volumen
 Usar valores de la geometría del tanque , ignorar valores de
 Ignorar la geometría del tanque y el volumen de resina

Figura 33. Captura de pantalla de los parámetros finales en el Intercambio Iónico en el programa WAVE.

4. Informe de la simulación: el programa simula el sistema creado y ofrece un informe con los resultados, mostrando caudales, temperaturas, conductividades y otros parámetros interesantes para poder elegir la mejor simulación. Estos resultados se detallarán en el apartado 5 del presente Trabajo Fin de Grado.

A continuación, se procede a explicar cada simulación y las configuraciones que se han hecho en el programa.

4.2. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA ACTUAL.

Para poder llevar a cabo la optimización de la planta actual y estudiar la mejora a partir de ella es necesario simularla en el programa. Se van a mostrar todos los datos que se han añadido en la simulación de la planta actual por pasos. El informe se detallará en el apartado 5 de resultados.

1. Selección de tecnologías.

Se escoge el icono de la ósmosis inversa "RO", se especifica un caudal de entrada de 7,5 m³/h y se añade un agua de tipo municipal.

2. Caracterización del agua de alimentación.

En la Tabla 3 se muestran los datos del agua de entrada que se han añadido a la simulación.

Tabla 3. Caracterización del agua de entrada en la Simulación 1.

SIMULACIÓN 1		
Param.	Tipo de agua	Municipal
Alimentación	Sub-tipo de agua	SDI < 3
Contenido de sólidos	SDI	< 3
	Turbidez (NTU)	0,24
	TOC (mg/L)	0,7
Aniones y cationes	Cl (mg/L)	92,4
	HCO ₃ (mg/L)	229,3
	SO ₄ ⁻ (mg/L)	233,6
	NO ₃ ⁻ (mg/L)	10,7
	Na (mg/L)	65,5
	Ca (mg/L)	145,3
	SiO ₂ (mg/L)	25
	CO ₂ (mg/L)	4,74

3. Configuración de la tecnología

En la Tabla 4 se muestra la configuración de la planta y las corrientes con sus respectivos caudales.

Tabla 4. Configuración de la ósmosis inversa de la planta actual.

SIMULACIÓN 1	Paso 1	Paso 2
Factor permeabilidad	0,85	0,85
Número de etapas	1	1
Número de elementos	6	4
Tipo de elemento	HSRO-390-FF	HSRO-390-FF
Conversión (%)	50,77	45,95
Caudal de permeado (m ³ /h)	5,88	5
Caudal de concentrado (m ³ /h)	5,7	5,88
Recirculación al paso 1 (m ³ /h)	3,2	0,88
Recirculación al paso 2 (m ³ /h)	-	5

Una vez realizada la simulación, se comprobará que los parámetros de operación y el diagrama de flujo proporcionados por el software coinciden con los de la planta actual.

4.3. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL NÚMERO DE MEMBRANAS.

Para el estudio de la obtención de $1,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ y la disminución del caudal de rechazo se van a realizar varios casos modificando los parámetros actuales de la planta de ósmosis inversa, intentando así conseguir el objetivo final sin necesidad de hacer una inversión.

La simulación sigue el mismo procedimiento que se ha explicado anteriormente para la planta actual.

En esta simulación se van a ir modificando las membranas que hay en los dos pasos, de modo que se observará si se consigue alcanzar la conductividad deseada en el permeado final. El agua de entrada a este sistema es la misma que se ha puesto para la simulación de la planta actual, los parámetros de la cual se muestran en la Tabla 3. Primero se van a disminuir las membranas del paso 1 hasta un mínimo de 4 y posteriormente las del paso 2 hasta un mínimo de 2. Es necesario cambiar conversiones y porcentajes del caudal de recirculación para que no salgan alarmas de diseño y sea un proceso seguro y sin fallos.

4.4. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL CAUDAL DE RECIRCULACIÓN AL PASO 1.

En esta segunda simulación, se van a dejar el mismo número de membranas que hay en la planta actual y se van a modificar los caudales de recirculación. En el paso 1 se realiza una recirculación del 56,13% del rechazo, se va a intentar disminuir este caudal y aumentar el caudal de recirculación del paso 2 a la entrada del paso 1. De esta forma, se recirculará menor cantidad del caudal de rechazo del primer paso y disminuirá la conductividad a la entrada de este, haciendo que la conductividad de entrada sea menor. Se observará si de esta forma se puede conseguir disminuir la conductividad del permeado final.

4.5. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE INTERCAMBIO IÓNICO.

Se va a estudiar el caso de añadir a la planta de ósmosis inversa un intercambiador iónico para conseguir el objetivo de la conductividad. De este modo sí que sería necesaria una inversión por parte de la empresa, por lo que se contemplarán varios escenarios para ver cuál es el óptimo.

Primero se realiza una simulación de un proceso de intercambio iónico a partir del agua permeada de la planta de ósmosis inversa actual. Los datos del agua permeada son los que se muestran en la Tabla 6 y se añadirán en el apartado de "Caracterización del agua de alimentación" en el programa WAVE, posteriormente, se añadirá toda la configuración necesaria para el intercambiador iónico.

4.6. SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA MINIMIZAR EL CAUDAL DE RECHAZO.

En esta simulación se va a intentar reducir el caudal de rechazo que se produce en la planta de ósmosis actual, ya que es un objetivo de este Trabajo Fin de Grado.

Proyecto de modificación de una planta de ósmosis inversa industrial de una empresa del sector cosmético.

El agua de entrada será la misma que le entra a la planta actual, y se van a ir modificando los caudales de entrada, las conversiones y las recirculaciones para intentar disminuir el caudal de rechazo neto que produce la planta, intentando que no varíe mucho el caudal de producción y la conductividad final. Se probarán distintos casos hasta llegar a una conclusión de si es posible o no disminuir dicho caudal de rechazo.

Una vez se han realizado todas las simulaciones correspondientes, se procede a estudiar los resultados de cada una y elegir la mejor opción para la empresa.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA ACTUAL.

En la Tabla 5 se muestran los resultados finales de la simulación de la planta actual comparados con valores reales de la planta y en la Tabla 6 los parámetros finales del agua purificada que van a servir para realizar otras simulaciones. En la Figura 34 se observa el diagrama de flujo que ofrece el programa WAVE de la planta de ósmosis inversa simulada.

Tabla 5. Resultados finales de la OI actual.

	Q entrada (m ³ /h)	Conversión (%)	Q rechazo (m ³ /h)	Q permeado (m ³ /h)	Conductividad permeado (μS/cm)	TDS permeado (ppm)
DATOS SIMULACIÓN	7,5	66,7	2,5	5	3	0,53
DATOS REALES	7,35	67,38	2,56	5,29	3,5	0,76

Tabla 6. Parámetros del agua permeada.

AGUA DEL PERMEADO		
Parámetros	Tipo de agua	Permeado
	Sub-tipo de agua	SDI < 1
	Conductividad (μS/cm)	3
Contenido de sólidos	SDI	< 1
	TDS (ppm)	0,53
Aniones y cationes	Cl (mg/L)	0
	HCO ₃ (mg/L)	0,43
	SO ₄ ⁻ (mg/L)	0
	NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,04
	Na (mg/L)	0,03
	Ca (mg/L)	0,01
	SiO ₂ (mg/L)	0,01
	CO ₂ (mg/L)	4,98

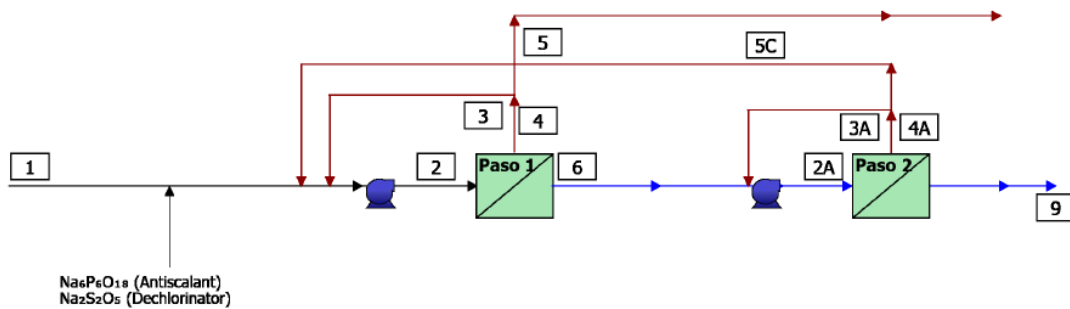


Figura 34. Diagrama de flujo de la planta actual de ósmosis inversa dado por el programa WAVE.

Se ha comprobado que los resultados de la simulación son prácticamente idénticos a los datos reales de la planta actual que hay en la empresa. De esta forma, se puede trabajar a partir de esta simulación con el resto de las simulaciones a realizar y se afirma que el programa funciona adecuadamente para poder hacer las simulaciones planteadas en el presente Trabajo Fin de Grado.

5.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO LAS MEMBRANAS.

En esta simulación, como se ha descrito anteriormente, se han realizado cuatro casos modificando las membranas del paso 1 y del paso 2. En las siguientes tablas se muestran las configuraciones y los resultados de los 4 casos realizados.

Tabla 7. CASO 1: Simulación de la planta actual con 5 y 4 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.

CASO 1		
Paso	P1	P2
Nº membranas	5	4
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	11,62	10,2
Q permeado (m ³ /h)	4,99	4,08
Q rechazo (m ³ /h)	6,63	6,12
Conversión (%)	43	40
Recirculación a P1 (%)	48,33	14,96
Q recirculación a P1 (m ³ /h)	3,2	0,92
Recirculación a P2 (%)	-	85,04
Q recirculación a P2 (m ³ /h)	-	5,2
Conversión RO (%)	54,39	
Conductividad permeado (µS/cm)	7	3
TDS permeado (ppm)	5,8	0,49

Tabla 8. CASO 2: Simulación de la planta actual con 4 y 4 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.

CASO 2		
Paso	P1	P2
Nº membranas	4	4
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	11,77	10,17
Q permeado (m ³ /h)	4,12	3,05
Q rechazo (m ³ /h)	7,65	7,12
Conversión (%)	35	30
Recirculación a P1 (%)	41,84	14,96
Q recirculación a P1 (m ³ /h)	3,2	1,07
Recirculación a P2 (%)	-	85,04
Q recirculación a P2 (m ³ /h)	-	6,06
Conversión RO (%)	40,7	
Conductividad permeado (µS/cm)	6	2
TDS permeado (ppm)	3,37	0,45

Tabla 9. CASO 3: Simulación de la planta actual con 4 y 3 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.

CASO 3		
Paso	P1	P2
Nº membranas	4	3
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	11,58	9,06
Q permeado (m ³ /h)	4,05	3,17
Q rechazo (m ³ /h)	7,53	5,89
Conversión (%)	35	35
Recirculación a P1 (%)	42,51	14,96
Q recirculación a P1 (m ³ /h)	3,2	0,88
Recirculación a P2 (%)	-	85,04
Q recirculación a P2 (m ³ /h)	-	5,01
Conversión RO (%)	42,3	
Conductividad permeado (µS/cm)	6	2
TDS permeado (ppm)	3,88	0,45

Tabla 10. CASO 4: Simulación de la planta actual con 4 y 2 membranas en los pasos 1 y 2, respectivamente.

CASO 4		
Paso	P1	P2
Nº membranas	4	2
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	11,58	9,06
Q permeado (m ³ /h)	4,05	3,17
Q rechazo (m ³ /h)	7,53	5,89
Conversión (%)	35	35
Recirculación a P1 (%)	42,51	14,96
Q recirculación a P1 (m ³ /h)	3,2	0,88
Recirculación a P2 (%)	-	85,04
Q recirculación a P2 (m ³ /h)	-	5,01
Conversión RO (%)	42,3	
Conductividad permeado (µS/cm)	6	2
TDS permeado (ppm)	3,88	0,43

En la Tabla 11 se muestra un resumen de los parámetros más importantes en cada caso para poder deducir si es óptimo o no el proceso con cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 11. Resumen de resultados de las simulaciones de la planta de ósmosis inversa modificando membranas.

CASO	Membranas P1	Membranas P2	Q entrada (m ³ /h)	Conversión (%)	Q rechazo (m ³ /h)	Q permeado (m ³ /h)	Conductividad permeado (µS/cm)	TDS permeado(ppm)
ACTUAL	6	4	7,5	66,7	2,5	5	3	0,53
1	5	4	7,5	54,39	3,42	4,08	3	0,49
2	4	4	7,5	40,7	4,45	3,05	2	0,45
3	4	3	7,5	42,3	4,33	3,17	2	0,45
4	4	2	7,5	42,3	4,33	3,17	2	0,43

Como se puede observar en la Tabla 11, a medida que disminuyen las membranas también lo hace la conductividad y el TDS. Sin embargo, la reducción de la conductividad es muy pequeña y para que no se produzcan alarmas en el diseño la conversión del sistema debe disminuir. Esto produce un aumento en el caudal de rechazo y una disminución en el caudal del permeado haciendo que el cambio poco significativo de la conductividad no merezca la pena.

Otro aspecto que sí que se ha podido comprobar es que del caso 2 al 4, se consiguen datos muy parecidos de conductividad, TDS, caudal de permeado y de rechazo, con un mismo caudal de

entrada. Esto significa que se pueden conseguir los mismos resultados con un menor número de membranas y por lo tanto podría optimizarse la planta actual en esa línea. Sin embargo, en este caso, este aspecto no se va a considerar porque no es objetivo del Trabajo Fin de Grado.

5.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA MODIFICANDO EL CAUDAL DE RECIRCULACIÓN AL PASO 1.

Se van a mostrar los valores añadidos en tres casos distintos descritos en la metodología. Para la modificación de los caudales de recirculación ha sido necesario también modificar conversiones en los pasos para evitar las alarmas de diseño.

El objetivo de esta simulación es intentar aumentar el caudal de recirculación del rechazo del segundo paso al primer paso y disminuir el caudal de recirculación del rechazo del primer paso a la entrada de este. Con esto, se quiere obtener una menor conductividad en el permeado final.

La Tabla 12 pertenece al Caso 1, en el cual las recirculaciones al paso 1 son de 35% y 50% del paso 1 y el paso 2, respectivamente. Ha disminuido la conductividad del permeado, sin embargo, ha disminuido la conversión y, por lo tanto, ha aumentado el caudal de rechazo.

Tabla 12. CASO 1: Modificación del caudal de recirculación al paso 1 en 35% y 50% del paso 1 y 2, respectivamente.

CASO 1		
Paso	P1	P2
Nº membranas	6	4
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	12,83	8,81
Q permeado (m ³ /h)	5,9	3
Q rechazo (m ³ /h)	6,93	5,81
Conversión (%)	46	34
Recirculación a P1 (%)	35	50
Q recirculación a P1 (m ³ /h)	2,43	2,91
Recirculación a P2 (%)	-	50
Q recirculación a P2 (m ³ /h)	-	2,91
Conversión RO (%)	39,94	
Conductividad permeado (µS/cm)	5	2
TDS (ppm)	3,48	0,41

En el Caso 2, mostrado en la Tabla 13, las recirculaciones al paso 1 son de 20% y 40% del paso 1 y el paso 2, respectivamente. Sucede exactamente lo mismo que en el caso 2, la conductividad disminuye, pero la conversión también lo hace.

Tabla 13. CASO 2: Modificación del caudal de recirculación al paso 1 en 20% y 40% del paso 1 y 2, respectivamente.

CASO 2		
Paso	P1	P2
Nº membranas	6	4
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	11,15	8,65
Q permeado (m ³ /h)	5,02	2,59
Q rechazo (m ³ /h)	6,13	6,06
Conversión (%)	45	30
Recirculación a P1 (%)	20	40
Q recirculación a P1 (m ³ /h)	1,23	2,42
Recirculación a P2 (%)	-	60
Q recirculación a P2 (m ³ /h)	-	3,63
Conversión RO (%)	34,6	
Conductividad permeado (µS/cm)	6	2
TDS (ppm)	3,7	0,42

El Caso 3 que se describe en la Tabla 14 tiene una recirculación al paso 1 de 30% y 60% del paso 1 y 2, respectivamente. También sucede lo mismo que en el Caso 1 y el Caso 2.

Tabla 14. CASO 3: Modificación del caudal de recirculación al paso 1 en 30% y 60% del paso 1 y 2, respectivamente.

CASO 3		
Paso	P1	P2
Nº membranas	6	4
Q alimentación RO (m ³ /h)	7,5	
Q alimentación neto (m ³ /h)	13,1	8,19
Q permeado (m ³ /h)	5,9	2,46
Q rechazo (m ³ /h)	7,2	5,73
Conversión (%)	54	30
Recirculación a P1 (%)	30	60
Q recirculación al P1 (m ³ /h)	2,16	3,44
Recirculación a P2 (%)	-	40
Q recirculación al P2 (m ³ /h)	-	2,29
Conversión RO (%)	32,75	
Conductividad permeado (µS/cm)	5	2
TDS (ppm)	3,15	0,4

A continuación, en la Tabla 15 se muestra un resumen de los resultados de la simulación de la planta de OI modificando caudales de recirculación del rechazo para intentar conseguir una disminución en la conductividad a la salida del proceso, y en comparación con los resultados reales y actuales de la planta de ósmosis inversa.

Tabla 15. Resumen de resultados de los casos de la simulación de OI con modificaciones en los caudales de rechazo.

CASO	Q entrada (m ³ /h)	Q recirculación del P1 (%) al		Q recirculación del P2 (%) al		Conversión (%)	Q rechazo (m ³ /h)	Q permeado (m ³ /h)	Conductividad permeado (μS/cm)	TDS permeado (ppm)
		P1	P2	P1	P2					
ACTUAL	7,5	56,13	-	14,96	85,04	66,7	2,5	5	3	0,53
1	7,5	35	-	50	50	39,94	4,5	3	2	0,41
2	7,5	20	-	40	60	34,6	4,5	2,59	2	0,42
3	7,5	30	-	60	40	32,75	5,04	2,46	2	0,40

El objetivo que se ha planteado no es posible porque al tener el mismo caudal alimento para todos los casos, si se modifican las recirculaciones hay que modificar las conversiones para que el diseño del software no de alarmas.

La planta actual contaba con un caudal de recirculación de rechazo del primer paso a la entrada de este de 56,13%. Se puede observar que conforme se disminuye este porcentaje y se aumenta el de rechazo del paso 2 al primer paso la conversión va disminuyendo. Esto es debido a que los valores de conversión deben reajustarse para el correcto funcionamiento del sistema, garantizando un caudal de permeado adecuado y un mínimo caudal de rechazo que no implique un alto potencial de precipitación de sales sobre las membranas.

En resumen, en estos tres casos, se ha comprobado que mediante la modificación de las recirculaciones tampoco se consigue el objetivo deseado de disminuir la conductividad y, sin embargo, se aumenta el caudal de rechazo, que es todo lo contrario al segundo objetivo perseguido.

5.4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE INTERCAMBIO IÓNICO.

En este caso, se ha utilizado una tecnología distinta para intentar obtener el objetivo de bajar la conductividad, aunque suponga una inversión para la empresa, ya que se ha comprobado que mediante la planta de ósmosis inversa actual no es posible alcanzar el objetivo deseado.

Se va a detallar el sistema de intercambio iónico que se ha elegido para purificar el agua de permeado de la planta de ósmosis inversa.

1. Inicialización del sistema.

En la Tabla 16 se muestra la inicialización del sistema de intercambio iónico. Como se puede observar está formado por dos trenes (1 operando y el otro en espera).

Tabla 16. Inicialización del proceso de Intercambio Iónico.

Inicialización del sistema	
Trenes operando	1
Trenes en espera	1
Velocidad específica (Bv/h)	20
Caudal de producto (m ³ /h)	5

2. Selección del tanque y del sistema de regeneración.

En este paso se han seleccionado dos tanques, el primero con una resina SAC (resina de intercambio catiónico fuertemente ácida) y el segundo con una resina SBA (resinas de intercambio aniónico fuertemente básica) sin desgasificador. La tecnología de regeneración de ambos tanques es la anteriormente comentada "Amberpack" que se basa en que el flujo de la disolución transcurre de abajo hacia arriba y se regenera al contrario, de arriba hacia abajo. A continuación, se muestra una imagen del sistema mostrando el flujo de la disolución a tratar.

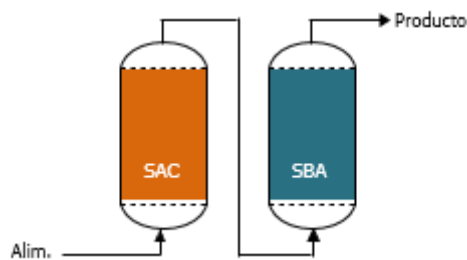


Figura 35. Diagrama de flujo del Intercambio iónico con resinas SAC y SBA.

3. Selección de resinas.

Para el primer tanque se escoge la resina catiónica Amberlite HPR1200 H y para el segundo tanque se escoge la resina aniónica Amberlite HPR4200 OH. En las especificaciones de las resinas recomendaban utilizarlas juntas por su óptimo rendimiento.

4. Elección del regenerante.

En la resina SAC se escoge un regenerante de HCl con una concentración de un 4% y un 100% de dosificación y en la resina SBA se escoge NaOH al 4% y con un 100% de dosificación.

5. Especificación del producto.

Por último, se especifican las condiciones que se quieren conseguir. En este caso se ha especificado la conductividad de salida que se requiere. Las dosis de los regenerantes y los factores de seguridad los añade el programa automáticamente.

Tabla 17. Parámetros de calidad del efluente del Intercambio Iónico.

CALIDAD DEL EFLUENTE		
PARÁMETRO	Promedio	Punto final
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,78	1
Na (ppm)	0,072	0,093
SiO ₂ (ppm)	0,02	0,04
Eficiencia en eliminación de orgánicos (%)	70	

En las siguientes tablas se muestran un resumen de los parámetros que se han utilizado para el intercambiador iónico y los resultados del agua purificada.

Tabla 18. Resumen parámetros de diseño del Intercambio Iónico.

Tipo de resina	SAC	WAC
Sistema regeneración	Amberpack	Amberpack
Flujo diseño (m^3/h)	5	5
Nombre resina	AmberLite HPR1200 H	AmberLite HPR4200 OH
Volumen resina (m^3)	0,27	0,28
Forma iónica	H	OH
Diámetro exterior del tanque (mm)	500	500
Altura del lecho (mm)	1.468	1.522
Velocidad específica (Bv/h)	20	21
Velocidad lineal (m/h)	27	27

Tabla 19. Resumen de resultados finales del sistema de Intercambio Iónico.

Conversión del sistema (%)	99,7
Tiempo estimado en operación (h)	141,09
Tiempo estimado en regeneración (h)	1,75
Conductividad (a 25°C) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1
Na (ppm)	0,093
SiO ₂ (ppm)	0,04

En la Tabla 19 se observa cómo el valor de la conductividad en el agua purificada alcanza el objetivo que es $1,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C . En este caso, el valor está diseñado para 25°C , pero la conductividad disminuye al disminuir la temperatura, por lo tanto, el valor a 20°C será menor y podrá dar un rango de seguridad en el caso que por algún problema aumente la conductividad.

Hay que recordar que el diseño de intercambio iónico se añadiría después de la planta de ósmosis inversa actual, consiguiendo el objetivo de disminuir la conductividad para cumplir la Norma Farmacopea Europea del Agua para Inyectables.

Sin embargo, solo se ha cumplido uno de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado, para cumplir con la disminución del caudal de rechazo se van a plantear los resultados de la siguiente simulación y se observará si es posible o no.

5.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA MINIMIZAR EL CAUDAL DE RECHAZO.

Una vez alcanzado el objetivo de reducir la conductividad del agua tratada hasta el valor exigido por la Normativa Farmacopea Europea, se plantea una nueva simulación para tratar de disminuir la cantidad de rechazo de la planta de ósmosis. Para ello, se plantea la modificación de los caudales de rechazo recirculados para aumentar la conversión de la planta, dado que se puede obtener un permeado de mayor salinidad al tener el sistema de intercambio iónico posterior.

Concretamente, lo que se ha planteado es la modificación de la recirculación del rechazo del primer paso a la alimentación de este, que se ha aumentado de un 56,13% a un 80%, consiguiendo así un menor número de rechazo neto producido, ya que, en el paso 2, todo el caudal rechazado se recircula. En este caso, las recirculaciones del caudal de rechazo del paso 2 se han modificado con el fin de conseguir que no haya ninguna alarma en el diseño. Además, el caudal de alimentación a la planta se ha disminuido de 7,5 a 6 m³/h para ajustarse a las alarmas de diseño y aumentar la conversión.

En la Tabla 20 se muestran todos los parámetros de la simulación, remarcando los más importantes, y en la Tabla 21 un resumen de estos comparándolos con los de la planta actual.

Tabla 20. Datos de la simulación de OI para disminuir el caudal de rechazo.

Simulación OI		
Paso	P1	P2
Nº membranas	6	4
Q alimentación RO (m ³ /h)	6	
Q alimentación neto (m ³ /h)	11,48	11,07
Q permeado (m ³ /h)	5,57	4,82
Q rechazo (m ³ /h)	5,91	6,25
Conversión (%)	48,5	43,5
Recirculación del P1 al (%)	80	-
Q recirculación del P1 al (m ³ /h)	4,73	-
Recirculación del P2 al (%)	12	88
Q recirculación del P2 al (m ³ /h)	0,75	5,51
Conversión RO (%)	80,29	
Conductividad permeado (µS/cm)	15	3
TDS permeado (ppm)	10,71	0,7

Tabla 21. Resultados de la simulación de OI para la disminución del caudal de rechazo total.

	Q entrada (m ³ /h)	Conversión (%)	Q permeado (m ³ /h)	Q rechazo (m ³ /h)	Conductividad permeado (µS/cm)	TDS permeado (ppm)
ACTUAL	7,5	66,7	5	2,5	3	0,53
SIMULACIÓN	6	80,29	4,82	1,18	3	0,7

En los resultados de esta simulación se puede observar como el caudal de rechazo disminuye notablemente. Mediante la ecuación (4) se calcula el porcentaje de reducción conseguido.

$$\%Disminución\ de\ rechazo = \frac{2,5-1,18}{2,5} \cdot 100 = 52,8\% \quad (4)$$

Como se muestra en la fórmula se ha conseguido disminuir el caudal de rechazo en un 52,8%. Además, se ha disminuido el caudal de agua bruta en la entrada. Sin embargo, el TDS ha aumentado un poco en relación con la planta actual, aunque aparentemente la conductividad se mantiene constante debido a que el programa no muestra decimales en dicho dato. El caudal del producto ha disminuido de 5 m³/h a 4,82 m³/h. A pesar del pequeño cambio en los parámetros de la conductividad, el TDS y el caudal de producto final, se ha conseguido una simulación muy adecuada para el objetivo que se estaba buscando.

En esta simulación se ha conseguido el objetivo de reducir el caudal de rechazo neto de la planta de ósmosis inversa consiguiendo unos valores muy parecidos de agua permeada a los de la planta actual, con los que ya se había comprobado que se conseguía alcanzar el objetivo de conductividad deseado con el sistema de intercambio iónico diseñado. Así, se considera válido utilizar el permeado de la planta modificada para disminuir el rechazo, como entrada al intercambiador, consiguiendo los mismos resultados que con los datos de entrada de la planta actual.

Para poder integrar el nuevo sistema de intercambio iónico en la instalación actual de la empresa, se plantea un cambio en el uso de los depósitos de agua tratada. En la empresa existen 3 depósitos de almacenamiento del agua que están conectados a la planta de ósmosis inversa, los volúmenes de los cuales son de 10, 40 y 60 m³. Actualmente, estos tres depósitos están llenos del agua permeada de la planta. Para poder implementar en nuevo sistema, en los depósitos de 10 y 60 m³ se va a almacenar el agua permeada de la planta de ósmosis y de estos se cogerá el caudal necesario cuando se ponga en funcionamiento el intercambiador iónico. Por otro lado, el agua purificada del intercambiador iónico se almacenará en el depósito de 40 m³.

5.6. PROPUESTA DE MEJORA DE LA INSTALACIÓN ACTUAL.

Una vez realizadas todas las simulaciones y descritos todos los resultados se concluye que con la simulación de la planta del intercambio iónico alimentada por el agua permeada de la planta de ósmosis inversa actual y con la simulación de disminución del caudal de rechazo de la planta de ósmosis inversa actual se pueden llegar a cumplir los dos objetivos principales.

En base a ello, la propuesta de mejora de la instalación actual seguiría los siguientes pasos, los cuales se pueden observar en el Plano 2 del Documento PLANOS del presente TFG.

1. Entrada del agua bruta a la planta de ósmosis inversa modificada para la disminución del caudal de rechazo con los resultados mostrados en el apartado 5.5.
2. Intercambiador iónico formado por una resina SAC y una resina SBA con un tren operando y otro en espera como se muestra en el apartado 5.4.
3. Regeneración de las resinas cuando estas se agoten, usando un tanque con dosificación de HCl para la resina SAC y otro tanque con dosificación de NaOH para la resina SBA.

Proyecto de modificación de una planta de ósmosis inversa industrial de una empresa del sector cosmético.

Con esta instalación el agua producto del intercambiador cumpliría con el objetivo de $1,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ y el caudal de rechazo se reduciría en $1,18 \text{ m}^3/\text{h}$ cumpliendo con los dos objetivos principales del TFG.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el presente TFG se han llevado a cabo distintas simulaciones con el software comercial WAVE, habiéndose alcanzado los objetivos planteados. Concretamente, se puede establecer las siguientes conclusiones:

- En la planta de ósmosis inversa actual de la empresa cosmética no se puede realizar ninguna mejora de los parámetros para reducir la conductividad de salida del agua purificada.
- Para cumplir con el objetivo de adecuarse a la Normativa Farmacopea Europea ha sido necesario la adición de un sistema de intercambio iónico con el fin de realizar un pulido del agua del permeado de la ósmosis inversa consiguiendo llegar al valor deseado de conductividad de 1,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- El sistema de intercambio iónico necesario consta de una resina SAC y una resina SBA con un tren operando y otro en espera, y las resinas deberán regenerarse mediante un regenerante de HCl con una concentración de un 4% para la resina SAC y en la resina SBA se utilizará un regenerante de NaOH al 4%.
- La incorporación del sistema de intercambio iónico ha permitido reducir el caudal de rechazo de la planta de OI un 52,5%, mediante la modificación de los caudales de recirculación en la planta actual y el caudal de entrada de agua bruta, consiguiendo así, aumentar la conversión del sistema.
- La inversión necesaria por parte de la empresa asciende a un total de ciento noventa y nueve mil trescientos noventa y seis euros con noventa y siete céntimos.

Con todo ello, la empresa contaría con un sistema de purificación del agua que cumpliría la Norma Farmacopea Europea del Agua para Inyectables cumpliendo los parámetros necesarios de conductividad para la fabricación de fármacos o inyectables, y que le permitiría reducir el caudal de rechazo a gestionar consiguiendo así una mayor sostenibilidad de la instalación.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aquaprof. (2018). *Filtros de carbón activado* [Figura]. Recuperado el 5 de junio de 2021, de <https://www.aquaprof.es/info/osmosis/mantenimiento/filtros/carbon-activado/>
- Belén Molina, C. (2007). *Intercambio iónico*. Recuperado el 19 de junio de 2021, de <file:///C:/Users/Paula/Downloads/Intercambioionico2006.pdf>
- Blue Gold. (16 de Febrero de 2021). *Análisis de la tecnología del sistema de electrodesionización EDI* [Figura]. Recuperado el 5 de junio de 2021, de <https://www.bluegold.es/analisis-de-la-tecnologia-del-sistema-de-electrodesionizacion-edi/>
- BWT Holding GmbH. (2021). *Requisitos del agua purificada*. Recuperado el 5 de junio de 2021, de <https://www.bwt-pharma.com/es/agua-purificada/?Country=ES>
- CITME. (2006). *Informe de vigilancia tecnológica: Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales* [Figura]. Recuperado el 26 de junio de 2021, de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Filtraci%C3%B3n+en+membrana+y+%C3%B3smosis+inversa.pdf/c6e09095-3730-c07e-42e8-3f9db4f7e28b>
- Condorchem Envitech. (2021). *Filtración mediante membranas para el tratamiento aguas residuales* [Figura]. Recuperado el 5 de junio de 2021, de <https://condorchem.com/es/blog/membranas-tratamiento-aguas-residuales/>
- Condorchem Envitech. (2021). *La ósmosis inversa y sus diferentes aplicaciones* [Figura]. Recuperado el 5 de junio de 2021, de <https://condorchem.com/es/blog/la-osmosis-inversa-y-sus-diferentes-aplicaciones/>
- Culling Water Projects. (2017). *Como obtener más cantidad de permeado en un equipo de ósmosis inversa* [Figura]. Recuperado el 1 de septiembre de 2021, de <http://www.tratamientoyfiltrosdeagua.com/noticias/434-como-obtener-m%C3%A1s-cantidad-de-permeado-en-un-equipo-de-osmosis-inversa.html>
- Dardel, F. (2019, 5 febrero). *Ion Exchange Resin Types*. Ion Exchange. Recuperado el 26 de junio de 2021, de http://dardel.info/IX/resin_types.html
- EOZ. (2021). *Filtro de fibras huecas* [Figura]. Recuperado el 26 de junio de 2021, de <https://www.agualimpia.mx/pages/tecnologia>
- Hidalgo Domínguez, F. E., & Guamán Pérez, M. V. (2006). Tesis. Recuperado el 25 de junio de 2021, de <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/746>
- Hidroserver. (2013). *Desinfección del agua con luz Ultravioleta* [Figura]. Recuperado el 5 de junio de 2021, de <https://www.hidroserver.com/desinfeccion-ultravioleta/>
- Lenntech B.V. (2021). *Membranas tubulares* [Figura]. Recuperado el 26 de junio de 2021, de <https://www.lenntech.es/membranas-tubulares.htm>

- Salas, J. (13 de Marzo de 2015). *Análisis de Configuraciones del Proceso O.I. en Desalación* [Figura]. Recuperado el 26 de junio de 2021, de https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/19S5-P1-Jorge_Salas-PPTACC.pdf
- Sotto, A. (2008). *Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos*. Recuperado 26 de junio de 2021, de https://www.researchgate.net/figure/Figura-29-Representacion-de-un-modulo-de-membrana-en-espiral_fig2_48989441
- Valquer Laboratorios S.L. (7 de Enero de 2014). *La importancia del agua purificada en cosmética*. Recuperado 5 de junio de 2021, de <https://www.valquer.com/agua-purificada/>

DOCUMENTO II. PRESUPUESTO

**PROYECTO DE MODIFICACIÓN DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS
INVERSA INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA DEL SECTOR
COSMÉTICO: ADAPTACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA
TRATADA A LA NORMATIVA EUROPEA DE APLICACIÓN, Y
DISMINUCIÓN DEL CAUDAL DE RECHAZO.**

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

E.T.S.I.I.

Autora: Paula Moreno Jorge

Tutora: María Pino Sancho Fernández

Tutora externa: Estefanía Benavent Adelantado

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. PRESUPUESTO.....	3
2.1. Costes de materiales y equipos.....	3
2.2. Costes de mano de obra	4
CAPÍTULO 3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO	5

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costes de materiales y equipos	3
Tabla 2. Costes de accesorios e instalación eléctrica estimados... ..	3
Tabla 3. Suma de costes de materiales y equipos.....	4
Tabla 4. Costes de mano de obra de la instalación.....	4
Tabla 5. Presupuesto de Ejecución Material (PEM).....	5
Tabla 6. Presupuesto Total.....	5

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del siguiente documento es realizar el presupuesto de la ampliación de la planta de ósmosis inversa actual de la empresa con un depósito intermedio y un intercambiador iónico formado por una resina SAC y otra SBA. Es muy importante la realización de este documento para que la empresa pueda valorar la inversión que tienen que hacer para conseguir el objetivo propuesto y estudiar si es viable o no.

En el presupuesto se aplicarán los costes de la instalación y la mano de obra. Se descompone en los siguientes apartados:

- Capítulo 01. Materiales y Equipos.
- Capítulo 02. Mano de obra.

CAPÍTULO 2. PRESUPUESTO

2.1. COSTES DE MATERIALES Y EQUIPOS

Los precios se han encontrado en las páginas web y catálogos de distintas marcas comerciales de los productos utilizados para diseñar la propuesta final. Primero se realiza el cálculo del coste de los equipos principales (intercambiador iónico y depósito intermedio).

Tabla 1. Costes de materiales y equipos.

COSTES MATERIALES					
Número	Ud	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Total (€)
01.01	L	Resina de intercambio catiónica Amberlite HPR1200 H	540	68,16	36.806,40 €
01.02	L	Resina de intercambio aniónica Amberlite HPR4200 OH	560	68,16	38.169,60 €
01.03	Ud	Columna para intercambio catiónico	2	5000	10.000,00 €
01.04	Ud	Columna para intercambio aniónico	2	5000	10.000,00 €
01.05	Ud	Tanque de regenerante de HCl de 300L	1	228,69	228,69 €
01.06	Ud	Tanque de regenerante de NaOH de 300L	1	228,69	228,69 €
				Subtotal (C _E)	95.433,38 €

Posteriormente, se calculan los costes de las tuberías y los accesorios, así como los equipos eléctricos mediante un método estimativo que supone una fracción del coste de los equipos.

- Costes de tuberías, bombas y accesorios: se define como un 33% de los costes materiales de la instalación.
- Costes de instalación eléctrica: se define como un 10% de los costes materiales de la instalación.

Tabla 2. Costes de accesorios e instalación eléctrica estimados.

Número	Descripción	Total (€)
01.07	Coste de tuberías, bombas y accesorios (C _E ·0,33)	31.493,02 €
01.08	Coste de instalación eléctrica (C _E ·0,1)	9.543,34 €

Tabla 3. Suma de costes de materiales y equipos.

COSTES TOTALES DE MATERIALES Y EQUIPOS	136.469,73 €
---	---------------------

2.2. COSTES DE MANO DE OBRA

Para la instalación y ejecución de la propuesta de mejora del presente Trabajo Fin de Grado (TFG) es necesario una mano de obra cualificada.

Tabla 4. Costes de mano de obra de la instalación.

Capítulo 02. COSTES DE MANO DE OBRA					
Número	Ud	Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	Total (€)
2.01	h	Oficial 1º fontanero	30	12	360,00 €
2.02	h	Ayudante fontanero	30	9	270,00 €
2.03	h	Oficial 1º electricista	15	12	180,00 €
2.04	h	Técnico de calidad	30	15	450,00 €
2.05	h	Ingeniero químico	30	25	750,00 €
Subtotal (C_M)					2.010,00 €

CAPÍTULO 3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

En la siguiente tabla (Tabla 5) se muestra un resumen del presupuesto de ejecución material (PEM) para la propuesta de mejora de la planta de ósmosis inversa.

Tabla 5. Presupuesto de Ejecución Material (PEM).

Capítulo 01	MATERIALES Y EQUIPOS	136.469,73 €
Capítulo 02	MANO DE OBRA	2.010,00 €
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)		138.479,73 €

El presupuesto de ejecución material asciende a CIENTO TREINTA Y OCHO MIL CUATROCIENTOS SETENTA Y NUEVE EUROS CON SETENTA Y TRES CÉNTIMOS.

En la Tabla 6 se calcula el presupuesto de ejecución por contrata donde se añaden los gastos generales (GG) que suponen un 13% del PEM y el beneficio industrial (BI) que supone un 6% del PEM. Por último, se añade un 21% de I.V.A al PEC y se obtiene el presupuesto total de la propuesta de mejora para la empresa.

Tabla 6. Presupuesto Total.

Presupuesto de Ejecución Material (PEM)	138.479,73 €
Gastos Generales (13%)	18.002,37 €
Beneficio Industrial (6%)	8.308,78 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEM+GG+BI)	164.790,88 €
I.V.A (21%)	34.606,09 €
PRESUPUESTO TOTAL	199.396,97 €

El presupuesto total es de CIENTO NOVENTA Y NUEVE MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON NOVELTA Y SIETE CÉNTIMOS.

DOCUMENTO III. PLANOS

**PROYECTO DE MODIFICACIÓN DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS
INVERSA INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA DEL SECTOR
COSMÉTICO: ADAPTACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA
TRATADA A LA NORMATIVA EUROPEA DE APLICACIÓN, Y
DISMINUCIÓN DEL CAUDAL DE RECHAZO.**

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

E.T.S.I.I.

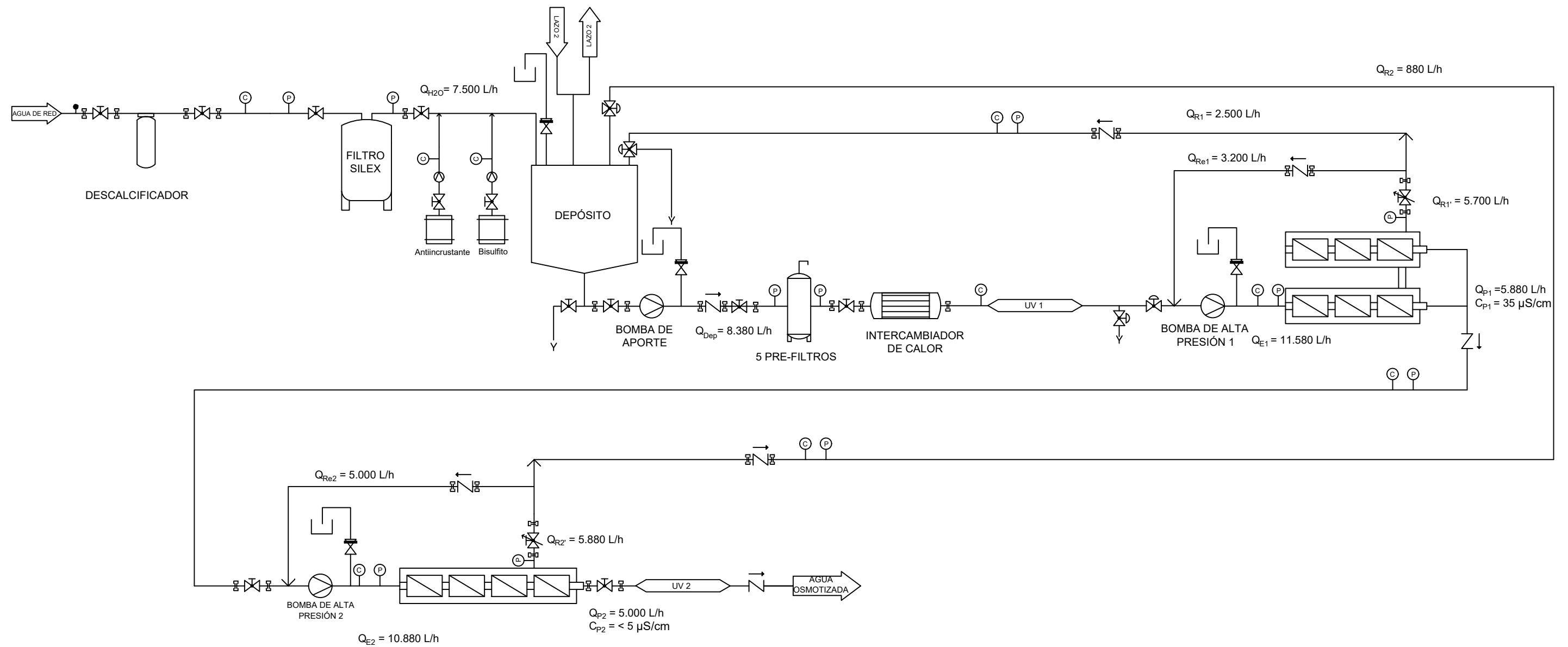
Autora: Paula Moreno Jorge

Tutora: María Pino Sancho Fernández

Tutora externa: Estefanía Benavent Adelantado

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. DIAGRAMA DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA ACTUAL
2. DIAGRAMA DE LA PROPUESTA DE MEJORA (ÓSMOSIS INVERSA + INTERCAMBIO IÓNICO)



LEYENDA

Válvula de regulación	Válvula mariposa	Y Desagüe	T Control manual	⊙ Caudalímetro	⌘ Junta
Válvula de 3 vías	Válvula antiretorno	Bomba	⤴ Control automático	⊙ Manómetro	Válvula de seguridad

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



ESCUELA
TÉCNICA
SUPERIOR
INGENIERÍA
INDUSTRIAL
VALENCIA

Proyecto: **PROYECTO DE MODIFICACIÓN DE UNA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA DEL SECTOR COSMÉTICO**

Plano: **Diagrama de flujo de la planta de ósmosis inversa actual**

Autor: **Paula Moreno Jorge**

Fecha: **Septiembre 2020**

Escala: **NP**

Nº Plano:

1

