Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
NAZIOARTEKO BIKAINTASUN CAMPUSA
CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CENTRO: ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION. SANTANDER

DISEÑO DE UNA PLANTA DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA PARA RIEGO AGRÍCOLA

DESIGN OF A SEAWATER DESALINATION PLANT BY REVERSE OSMOSIS FOR AGRICULTURAL IRRIGATION

TRABAJO FIN DE MÁSTER (TFM)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA QUIMICA
POR LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Y LA UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO/EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA

Alumno: Juan Maíllo González

Fecha: 19/09/2024

Firma:

Director: Ignacio Fernández Olmo **Curso Académico:** 2023/2024

RESUMEN

El agua es un recurso esencial cuya escasez es uno de los principales desafíos del siglo XXI, especialmente en regiones áridas. La agricultura, que depende en gran medida del riego, requiere fuentes alternativas y sostenibles de agua, como la ósmosis inversa para la desalación y reutilización del agua. En el sur de España, una cooperativa agrícola planea utilizar agua de mar de un pozo costero para el riego de cultivos, proponiendo una planta de desalación con capacidad de 500 m^3/día. El diseño de la planta incluye la selección de membranas y el dimensionado de componentes clave, como filtros y bombas, optimizando el proceso mediante el simulador Q+ de LG.

Se simularon diversas configuraciones de membranas y tasas de recuperación, determinando que una tasa de recuperación del 45% es óptima en términos de calidad del agua, consumo energético y estabilidad. La disposición híbrida de membranas, con una combinación de alto rechazo, rechazo común y ahorro energético, resulta la más adecuada para mantener bajos niveles de sólidos disueltos y eficiente rechazo de boro. Posteriormente se diseñaron los equipos de filtración y bombas de presión necesarios para el correcto funcionamiento de la planta.

Finalmente, se evaluó el impacto de varias variables operativas en el rendimiento de la planta, tales como la temperatura y el pH del agua de alimentación. Los resultados mostraron que un incremento en la temperatura del agua conduce a una disminución de los costes operativos, ya que reduce la presión requerida para el proceso de ósmosis inversa. Sin embargo, este beneficio viene acompañado de un aumento en la concentración de sólidos disueltos en el agua permeada, lo cual puede afectar a la calidad final del agua. Por otro lado, se observó que un pH más elevado contribuye significativamente a la reducción de los niveles de boro en el agua desalinizada, lo que es crucial para cumplir con los requisitos de calidad del agua destinada al riego de cultivos sensibles al boro. Esta simulación permitió identificar y balancear estas variables para optimizar tanto la eficiencia operativa como la calidad del agua producida, garantizando un funcionamiento más sostenible de la planta a largo plazo.

ABSTRACT

Water is an essential resource, and its scarcity is one of the main challenges of the 21st century, especially in arid regions. Agriculture, which heavily depends on irrigation, requires alternative and sustainable water sources, such as reverse osmosis for desalination and water reuse. In southern Spain, an agricultural cooperative plans to use seawater from a coastal well for crop irrigation, proposing a desalination plant with a capacity of 500 m^3/day. The plant design includes the selection of membranes and the sizing of key components, such as filters and pumps, optimizing the process using the Q+ simulator from LG.

Various membrane configurations and recovery rates were simulated, determining that a recovery rate of 45% is optimal in terms of water quality, energy consumption, and operational stability. The hybrid membrane configuration, with a combination of high rejection, standard rejection, and energy-saving membranes, was found to be the most suitable for maintaining low levels of dissolved solids and efficient boron rejection. Subsequently, the filtration equipment and pressure pumps necessary for the proper functioning of the plant were designed.

Finally, the impact of several operational variables on plant performance, such as temperature and pH of the feedwater, was evaluated. The results showed that an increase in temperature leads to a decrease in operating costs, as it reduces the pressure required for the reverse osmosis process. However, this benefit is accompanied by an increase in dissolved solids concentration in the permeated water, which may affect the final water quality. On the other hand, a higher pH was observed to significantly contribute to the reduction of boron levels in the desalinated water, which is crucial to meet the quality requirements for water intended for irrigating crops sensitive to boron. This simulation helped to identify and balance these variables to optimize both operational efficiency and the quality of the produced water, ensuring a more sustainable long-term operation of the plant.

Índice

Lista de Figuras .....

Lista de Tablas .....

1. Planteamiento 1

1.1. Contexto General 1

1.1.1. Importancia del Agua en el Siglo XXI 1

1.1.2. Necesidades del Agua para Diferentes Usos 1

1.2. Ósmosis y Ósmosis Inversa: Conceptos Básicos 4

1.2.1. Definición de Ósmosis 4

1.2.2. Principio de la Ósmosis Inversa 4

1.2.3. Diferencias entre Ósmosis Directa e Inversa 5

1.3. Historia de la Ósmosis Inversa 5

1.3.1. Orígenes y Descubrimientos Iniciales 5

1.3.2. Desarrollo de la Tecnología en el Siglo XX 6

1.3.3. Evolución Reciente y Avances Recientes 7

1.4. Componentes y Tecnología de la Ósmosis Inversa 7

1.4.1. Tipos de Membranas 7

1.4.2. Recuperadores de Energía 8

1.4.3. Sistemas de Pretratamiento 10

1.5. Aplicaciones de la Ósmosis Inversa 10

1.5.1. Desalación de Agua de Mar 10

1.5.2. Tratamiento de Aguas Residuales 11

1.5.3. Producción de Agua Potable 12

1.5.4. Uso en la Agricultura 13

1.6. Desafíos y Futuro de la Ósmosis Inversa 13

1.6.1. Retos Técnicos y Operacionales 13

1.6.2. Impacto Ambiental y Sostenibilidad 14
1.6.3. Innovaciones y Tendencias Futuras 15
1.7. Antecedentes 15
1.8. Objetivos 16
2. Metodología 17
2.1. Diseño de la planta 17
2.1.1. Selección del Software de Simulación 17
2.1.2. Elección de los parámetros de diseño 17
2.1.3. Elección de las variables para el análisis del rendimiento de la planta 17
2.1.4. Simulación de Configuraciones Híbridas 18
2.1.5. Selección de la Configuración Óptima 18
2.1.6. Dimensionamiento de los Componentes Principales 18
2.1.7. Documentación del Diseño 19
2.2. Estudio de la operatividad de la planta 20
2.2.1. Definición de las principales variables durante la operación 20
2.2.2. Análisis del efecto de las variables de operación en el desempeño de la planta 20
3. Resultados 21
3.1. Diseño de la planta de ósmosis inversa 21
3.1.1. Necesidad de la planta y especificaciones de diseño 21
3.1.2. Impacto de la Tasa de Recuperación en el Sistema 25
3.1.3. Elección de la disposición de las membranas 28
3.1.4. Diseño del lecho de filtración 31
3.1.5. Diseño de la microfiltración 37
3.1.6. Diseño del sistema de Aclarado/CIP 40
3.1.7. Diseño de las tuberías 42

3.1.8. Diseño de las bombas 44

3.2. Estudio del efecto de diferentes variables en el comportamiento de la ósmosis inversa 48

3.2.1. Impacto de la temperatura del agua de alimentación 48

3.2.2. Impacto del pH del agua de alimentación 51

4. Conclusiones 53

5. Bibliografía 55

Lista de Figuras

Figura 1. Efecto del empleo de diferentes membranas en la presión de operación. . 23

Figura 2. Efecto del empleo de diferentes membranas en la concentración de sales del permeado. 23

Figura 3. Efecto del empleo de diferentes membranas en el coste de operación. 24

Figura 4. Efecto del empleo de diferentes membranas en la caída de presión del rechazo. 25

Figura 5. Efecto de la Tasa de recuperación en la presión de operación. 25

Figura 6. Efecto de la tasa de recuperación en la cantidad de sólidos disueltos el permeado y en el rechazo. 26

Figura 7. Efecto de la tasa de recuperación en el caudal de alimentación necesario para producir el permeado requerido y en la caída de presión en los tubos. 27

Figura 8. Efecto de la tasa de recuperación en el SEC. 28

Figura 9. Presión de operación en los diferentes casos estudiados. 29

Figura 10. TDS del permeado en los diferentes casos estudiados. 30

Figura 11. Flujo que atraviesa cada membrana para los 5 casos estudiados. 30

Figura 12. Evolución del flujo por membrana a lo largo del tubo de presión en los mejores casos estudiados. 31

Figura 13. Esquema de válvulas para el funcionamiento y lavado de los filtros. 36

Figura 14. Figura aportada por un fabricante de cartuchos de microfiltración donde calcular la caída de presión estimada. 39

Figura 15. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la presión de operación 48

Figura 16. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la cantidad de sólidos disueltos en el permeado y en el rechazo. 49

Figura 17. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la caída de presión del rechazo. 50

Figura 18. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en el SEC. 50

Figura 19. Efecto del pH del agua de alimentación en la cantidad de sólidos disueltos en el permeado y en el rechazo. 51

Figura 20. Efecto del pH del agua de alimentación en la cantidad de boro disuelto en el permeado. 52

Lista de Tablas

Tabla 1. Analítica del agua bruta extraída del pozo costero. 21

Tabla 2. Requerimientos del agua solicitada por el cliente. 22

Tabla 3. Identificación de las membranas en cada posición del tubo de presión para cada uno de los casos estudiados. 29

Tabla 4. Resumen del diseño de la planta propuesta 32

Tabla 5. Estado de las válvulas durante los diferentes modos de operación. 36

Tabla 6. Caracterización de las corrientes y tuberías. 44

1. Planteamiento

1.1. Contexto General

1.1.1. Importancia del Agua en el Siglo XXI

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo sostenible. En el siglo XXI, su importancia ha cobrado una relevancia crítica debido a la creciente demanda y al impacto del cambio climático, que afecta su disponibilidad y calidad. Estudios recientes indican que el estrés hídrico global se está incrementando, especialmente en regiones áridas y semiáridas, lo que puede llevar a conflictos por recursos en el futuro próximo (Gleick, 2019).

El uso del agua no se limita al consumo humano directo, sino que también es fundamental para la producción de alimentos, la generación de energía y el mantenimiento de los ecosistemas naturales. La agricultura, que consume aproximadamente el 70% del agua dulce disponible, es especialmente vulnerable a las fluctuaciones en la disponibilidad de agua, lo que ha sido analizado en estudios sobre seguridad hídrica en regiones agrícolas críticas (Foley *et al.*, 2011). Además, la demanda industrial de agua sigue aumentando, impulsada por el crecimiento económico y la expansión de la población (Hoekstra and Mekonnen, 2012).

En este contexto, la gestión sostenible del agua se convierte en una prioridad global (Elimelech and Phillip, 2011). La implementación de tecnologías avanzadas, como la ósmosis inversa, y la adopción de políticas integradas de gestión de recursos hídricos son esenciales para garantizar la disponibilidad y calidad del agua para las futuras generaciones (Shannon *et al*., 2008)

1.1.2. Necesidades del Agua para Diferentes Usos

El agua desempeña un papel crucial en diversas actividades humanas, y cada uso tiene necesidades específicas en términos de cantidad y calidad. A continuación, se exploran tres de los principales usos del agua: consumo humano, riego agrícola y uso industrial.

Consumo Humano

El agua potable es esencial para la supervivencia y la salud humana. La investigación indica que cada persona necesita, al menos, entre 50 y 100 litros de agua al día para

satisfacer sus necesidades básicas de consumo, higiene y preparación de alimentos (Gleick, 1996). Sin embargo, la disponibilidad de agua potable es desigual en el mundo, y millones de personas carecen de acceso a fuentes seguras. Un análisis de las disparidades en el acceso a agua potable muestra una correlación significativa entre el acceso limitado al agua y las tasas elevadas de enfermedades hídricas en comunidades vulnerables (Hunter *et al.*, 2010)

La calidad del agua para consumo humano debe cumplir con estrictos estándares sanitarios. Contaminantes como bacterias, virus y compuestos químicos representan graves riesgos para la salud si no se controlan adecuadamente (Elimelech and Phillip, 2011). La ósmosis inversa se ha convertido en una tecnología clave para garantizar la purificación del agua, eliminando impurezas y asegurando su viabilidad para uso humano (Lee *et al*., 2011)

El acceso al agua potable también tiene un impacto directo en la reducción de enfermedades y la mejora de la calidad de vida. Estudios han demostrado que la mejora en el acceso al agua potable reduce significativamente la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua y mejora los indicadores de salud pública en general (Qadir *et al*., 2003).

Riego Agrícola

El riego agrícola es el mayor consumidor de agua a nivel mundial, representando aproximadamente el 70% del uso global de agua dulce (Qadir *et al*., 2003). La irrigación permite la producción de alimentos en regiones donde las precipitaciones son insuficientes, lo que es crucial para la seguridad alimentaria. Sin embargo, el uso excesivo de agua en la agricultura puede llevar a la sobreexplotación de recursos hídricos, disminuyendo la disponibilidad de agua para otros usos y afectando los ecosistemas (Hoekstra and Mekonnen, 2012)

La eficiencia en el uso del agua para riego es un desafío constante. Se han desarrollado diversas tecnologías para mejorar la eficiencia hídrica, como los sistemas de riego por goteo y las técnicas de captación de agua de lluvia. Estas innovaciones pueden mejorar significativamente la eficiencia en el uso del agua, reduciendo el consumo, aumentando

la productividad agrícola y evitando la eutrofización de los sistemas acuáticos (Fereres and Soriano, 2007).

El uso de agua reciclada y tratada mediante procesos como la ósmosis inversa también está ganando popularidad en la agricultura. Esta práctica no solo reduce la presión sobre los recursos de agua dulce, sino que también ofrece una solución sostenible para la gestión de aguas residuales (Qadir *et al*., 2003).

Uso Industrial

El agua es un recurso indispensable en la industria, utilizada en procesos de fabricación, generación de energía, y como medio de refrigeración, entre otros usos. La demanda industrial de agua representa aproximadamente el 20% del consumo global, aunque esta cifra varía significativamente según la región y el tipo de industria (Mekonnen and Hoekstra, 2011). La industria manufacturera, en particular, es uno de los mayores consumidores, necesitando grandes volúmenes de agua para procesos como la limpieza, el enfriamiento y la disolución de productos (Pfister *et al.*, 2009).

La calidad del agua requerida en la industria varía según el proceso específico. Por ejemplo, la industria alimentaria y farmacéutica requiere agua de alta pureza, mientras que otras industrias pueden utilizar agua de menor calidad para procesos de enfriamiento o limpieza (Shannon *et al*., 2008). La ósmosis inversa se ha convertido en una tecnología fundamental para el tratamiento del agua en la industria, permitiendo la purificación y reutilización del agua, lo que contribuye a la sostenibilidad y a la reducción de costos operativos (Elimelech and Phillip, 2011).

En respuesta a las crecientes preocupaciones ambientales, muchas industrias están adoptando prácticas de gestión del agua más sostenibles, como la reducción del consumo, el reciclaje del agua y la implementación de tecnologías de tratamiento más eficientes. Estos cambios están impulsados por la necesidad de cumplir con regulaciones más estrictas y por la creciente presión social para adoptar prácticas industriales más sostenibles (Hoekstra and Mekonnen, 2012).

1.2. Ósmosis y Ósmosis Inversa: Conceptos Básicos

1.2.1. Definición de Ósmosis

La ósmosis es un proceso fundamental en la biología y la química, en el cual el agua se mueve a través de una membrana semipermeable desde una región de menor concentración de solutos a una de mayor concentración, con el fin de equilibrar las concentraciones a ambos lados de la membrana. Este proceso es crucial en diversas funciones celulares, incluyendo la regulación del volumen celular y el transporte de nutrientes (Kleinzeller, 1999).

El concepto de ósmosis ha sido ampliamente estudiado en biología celular y molecular, y es esencial para comprender cómo las células mantienen la homeostasis. Por ejemplo, la ósmosis juega un papel vital en la absorción de agua por las raíces de las plantas, lo que permite el transporte de agua y nutrientes a través de la xilema hasta las hojas. Este proceso es igualmente importante en organismos acuáticos, donde la ósmosis regula la entrada y salida de agua, manteniendo el equilibrio osmótico (Haines, 1994)

1.2.2. Principio de la Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa (OI) es un proceso que invierte el flujo natural de la ósmosis aplicando presión a una solución concentrada para forzar el paso de agua a través de una membrana semipermeable hacia una solución menos concentrada. Este proceso es ampliamente utilizado en la purificación de agua, especialmente en la desalación de agua de mar y el tratamiento de aguas residuales (Elimelech and Phillip, 2011).

A diferencia de la ósmosis natural, donde el agua se mueve de una zona de menor concentración de solutos a una de mayor concentración, en la ósmosis inversa, el flujo se fuerza en la dirección opuesta. Esto permite la eliminación de sales, minerales y otras impurezas del agua, produciendo agua pura en el lado de baja concentración. Este proceso es especialmente importante en regiones donde el acceso al agua dulce es limitado (Greenlee *et al.*, 2009)

El desarrollo de membranas de alta eficiencia ha sido clave para la viabilidad de la ósmosis inversa a gran escala. Estas membranas están diseñadas para ser altamente selectivas, permitiendo el paso de moléculas de agua mientras bloquean la mayoría de los solutos disueltos. Las investigaciones continúan mejorando la durabilidad y eficiencia

de estas membranas, lo que podría reducir los costos energéticos y aumentar la accesibilidad de esta tecnología en el futuro (Fritzmann *et al.*, 2007)

1.2.3. Diferencias entre Ósmosis Directa e Inversa

La ósmosis directa y la ósmosis inversa son procesos relacionados, pero con diferencias clave. Mientras que la ósmosis directa ocurre de manera natural sin la intervención de una fuente externa de presión, la ósmosis inversa requiere la aplicación de presión para invertir el flujo de agua a través de una membrana semipermeable (McCutcheon *et al*., 2006).

En la ósmosis directa, el movimiento de agua es impulsado por la diferencia de concentración de solutos entre dos soluciones, lo que hace que el agua se mueva hacia la solución con mayor concentración de solutos. Este proceso es fundamental en muchas funciones biológicas y no requiere aporte energético externo, lo que lo diferencia de la ósmosis inversa, que sí necesita energía para superar la presión osmótica y permitir el flujo inverso del agua (Cath *et al*., 2006).

La ósmosis inversa, por su parte, es una tecnología crítica para la producción de agua potable a partir de agua de mar o aguas residuales. Aunque requiere un aporte energético significativo, la eficiencia de las membranas y los avances en la recuperación de energía han hecho de la ósmosis inversa una solución viable y cada vez más sostenible para la crisis global del agua (Elimelech and Phillip, 2011).

1.3. Historia de la Ósmosis Inversa

1.3.1. Orígenes y Descubrimientos Iniciales

La ósmosis inversa, como tecnología, tiene sus raíces en principios científicos descubiertos a lo largo del siglo XIX. Uno de los primeros experimentos documentados sobre ósmosis fue realizado por el químico francés Jean-Antoine Nollet en 1748, quien observó el flujo de agua a través de una membrana semipermeable. Sin embargo, no fue hasta el siglo XX que estos principios comenzaron a aplicarse en la separación de solutos y disolventes a escala industrial, particularmente en el desarrollo de procesos de desalación (Baker, 2023)

El avance significativo en la ósmosis inversa ocurrió en la década de 1950, cuando investigadores de la Universidad de California, Los Ángeles (UCLA) lograron desarrollar

las primeras membranas capaces de realizar desalación a través de este proceso. Este desarrollo fue crucial, ya que abrió las puertas para la producción de agua potable a partir de agua de mar y otras fuentes salobres, marcando el comienzo de una nueva era en la tecnología de tratamiento de agua (Loeb and Sourirajan, 1962).

A medida que se perfeccionaban las membranas, la ósmosis inversa comenzó a ganar reconocimiento como una tecnología viable para la purificación de agua. En las décadas posteriores, el enfoque se centró en mejorar la eficiencia y la durabilidad de las membranas, lo que permitió la expansión de su uso en diversas aplicaciones industriales y municipales en todo el mundo (Elimelech and Phillip, 2011).

1.3.2. Desarrollo de la Tecnología en el Siglo XX

Durante la segunda mitad del siglo XX, la ósmosis inversa experimentó un crecimiento exponencial, impulsado por la necesidad global de fuentes de agua potable fiables. El desarrollo de membranas de acetato de celulosa en la década de 1960 fue un hito importante, ya que estas membranas ofrecían una mayor selectividad y resistencia química, permitiendo una operación más eficiente y duradera en condiciones industriales (Luftig, 1971).

La expansión de la tecnología de ósmosis inversa también fue impulsada por el aumento de la inversión en investigación y desarrollo, tanto en el sector privado como en el público. En particular, los gobiernos comenzaron a reconocer la importancia de esta tecnología en regiones afectadas por la escasez de agua, lo que llevó a la construcción de plantas de desalación a gran escala en países como Arabia Saudita, Israel y España (Greenlee *et al.*, 2009).

A finales del siglo XX, las mejoras en la eficiencia energética y la reducción de costos operativos hicieron que la ósmosis inversa se convirtiera en una opción atractiva para el tratamiento de agua, no solo en la desalación, sino también en la reutilización de aguas residuales y en aplicaciones industriales. Estos avances consolidaron la posición de la ósmosis inversa como una de las tecnologías de tratamiento de agua más importantes a nivel mundial (Mulder, 2012).

1.3.3. Evolución Reciente y Avances Recientes

En las últimas décadas, la investigación en ósmosis inversa se ha centrado en mejorar la sostenibilidad y reducir los impactos ambientales asociados con su uso. Un área clave de investigación ha sido la mejora de las membranas, tanto en términos de selectividad como de durabilidad. Los avances en materiales, como las membranas de poliamida y los nuevos compuestos híbridos, han permitido reducir el consumo energético y aumentar la eficiencia de los sistemas de ósmosis inversa (Werber *et al*., 2016).

Otro aspecto importante ha sido la optimización de los sistemas de recuperación de energía, que ha permitido reducir significativamente los costes operativos. Estas innovaciones han sido especialmente importantes en plantas de desalación de gran escala, donde la eficiencia energética es un factor crítico para la viabilidad económica del proceso (Subramani *et al.*, 2015).

Además, la ósmosis inversa ha ampliado su aplicación más allá de la desalación. Actualmente, se utiliza en la producción de agua ultrapura para la industria electrónica, en el tratamiento de aguas residuales industriales y en la recuperación de recursos valiosos de corrientes de residuos. Estas nuevas aplicaciones reflejan la continua evolución y adaptación de la tecnología a las necesidades cambiantes del siglo XXI (Elimelech and Phillip, 2011)..

1.4. Componentes y Tecnología de la Ósmosis Inversa

1.4.1. Tipos de Membranas

Las membranas son el componente central en la tecnología de ósmosis inversa, ya que permiten la separación de los solutos del agua. Existen diferentes tipos de membranas, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para distintas aplicaciones. Las membranas de acetato de celulosa fueron las primeras en desarrollarse para aplicaciones de ósmosis inversa. Este tipo de membrana, aunque menos eficiente en términos de rechazo de sal en comparación con las membranas más modernas, ofrece una buena resistencia química y una vida útil razonable bajo condiciones de operación moderadas (Luftig, 1971).

Con el tiempo, las membranas de poliamida se convirtieron en la opción preferida debido a su mayor eficiencia y capacidad de rechazo de sales. Estas membranas de capa

delgada compuesta (TFC, por sus siglas en inglés) ofrecen una alta selectividad y una mejor resistencia química, lo que permite su uso en aplicaciones más exigentes, como la desalación de agua de mar y el tratamiento de aguas residuales industriales. La investigación continúa mejorando estas membranas para reducir el ensuciamiento (fouling) y mejorar su durabilidad (Subramani *et al.*, 2015).

En los últimos años, se han introducido otras innovaciones en membranas, como las membranas híbridas y las basadas en nanomateriales. Estas nuevas tecnologías están diseñadas para ofrecer una mayor eficiencia energética y resistencia al ensuciamiento, lo que podría reducir los costes operativos y aumentar la viabilidad económica de los sistemas de ósmosis inversa a gran escala. La integración de materiales como el grafeno y las membranas de nanotubos de carbono representa un avance significativo en la ciencia de materiales aplicados a la desalación (Werber *et al*., 2016).

1.4.2. Recuperadores de Energía

Los recuperadores de energía son otro de los componentes clave en las plantas de ósmosis inversa, especialmente en aquellas dedicadas a la desalación de agua de mar, donde los costos energéticos representan una gran parte del costo total del proceso. Los sistemas de recuperación de energía, como los intercambiadores de presión y los turbocompresores, permiten aprovechar la presión residual en el flujo de rechazo (agua salobre) para ayudar a presurizar el agua de alimentación, reduciendo así el consumo energético global del sistema (Subramani *et al.*, 2015).

Turbocompresores

Los turbocompresores, son dispositivos utilizados en sistemas de ósmosis inversa para recuperar energía del flujo de rechazo a alta presión y reutilizarla para presurizar el agua de alimentación. Este mecanismo se basa en el principio de conversión de la energía cinética del flujo de rechazo en energía mecánica, que luego se transfiere directamente al agua de alimentación a través de una rueda de trabajo acoplada. Aunque son menos eficientes que los intercambiadores isobáricos, los turbocompresores han sido ampliamente utilizados debido a su simplicidad y menor coste de mantenimiento. Estudios recientes han mostrado que, a pesar de su menor eficiencia comparativa, los turbocompresores pueden alcanzar eficiencias energéticas de hasta el 80%, lo que los

convierte en una opción viable en instalaciones de tamaño pequeño y mediano (Stover, 2007).

A lo largo de los años, se han realizado mejoras significativas en el diseño de los turbocompresores, incluyendo la optimización aerodinámica de las turbinas y el desarrollo de materiales más duraderos para los componentes internos. Estas mejoras han permitido que los turbocompresores mantengan su relevancia en aplicaciones específicas donde los costes iniciales y la simplicidad operativa son más importantes que la máxima eficiencia energética (Park *et al*., 2020).

Intercambiadores Isobáricos

Los intercambiadores isobáricos representan la tecnología más eficiente actualmente disponible para la recuperación de energía en sistemas de ósmosis inversa. Estos dispositivos funcionan transfiriendo directamente la presión del flujo de rechazo al agua de alimentación sin cambiar significativamente la velocidad de flujo, lo que permite una recuperación de energía que puede superar el 90%. El diseño isobárico ha revolucionado la industria de la desalación al reducir considerablemente el consumo energético y, por ende, los costes operativos (Bitaw *et al*., 2019)

Una de las principales ventajas de los intercambiadores isobáricos es su capacidad para manejar variaciones en el caudal sin pérdida significativa de eficiencia, lo que los hace ideales para grandes instalaciones de desalación donde las fluctuaciones de demanda son comunes. La adopción de intercambiadores isobáricos en la mayoría de las nuevas plantas de desalación es un testimonio de su superioridad tecnológica y económica (Subramani *et al.*, 2015).

Además de mejorar la eficiencia energética, los recuperadores de energía también contribuyen a la sostenibilidad del proceso de ósmosis inversa al reducir la huella de carbono asociada con la producción de agua potable. La optimización de estos sistemas es un área activa de investigación, con el objetivo de desarrollar tecnologías que sean tanto económicamente viables como respetuosas con el medio ambiente (Kim *et al*., 2018).

1.4.3. Sistemas de Pretratamiento

El pretratamiento del agua es una etapa crucial en los sistemas de ósmosis inversa, ya que determina la eficiencia y la vida útil de las membranas. Un pretratamiento adecuado es necesario para eliminar partículas, materia orgánica, y otros contaminantes que podrían causar ensuciamiento y dañar las membranas. La filtración es el primer paso en la mayoría de los sistemas de pretratamiento, y se utilizan diferentes tecnologías, desde filtros de arena hasta microfiltración y ultrafiltración, dependiendo de la calidad del agua de entrada (Greenlee *et al.*, 2009).

La desinfección es otro componente esencial del pretratamiento, especialmente para evitar la proliferación de microorganismos que pueden formar biopelículas sobre las membranas, un problema conocido como biofouling. El uso de cloro y otros agentes desinfectantes es común, aunque es necesario neutralizarlos antes de que el agua entre en contacto con las membranas de poliamida, ya que estos agentes pueden dañarlas (Matin *et al.*, 2011).

Finalmente, el control de la precipitación de sales y el ensuciamiento químico es otra área crítica en el pretratamiento. Se utilizan agentes anti-incrustantes para prevenir la formación de depósitos de sales minerales en las membranas, lo que puede reducir drásticamente la eficiencia del proceso. La selección adecuada de estos productos, junto con un diseño óptimo del sistema de pretratamiento, es esencial para mantener un funcionamiento eficiente y prolongar la vida útil de las membranas de ósmosis inversa (Antony *et al.*, 2011).

1.5. Aplicaciones de la Ósmosis Inversa

1.5.1. Desalación de Agua de Mar

La desalación de agua de mar es una de las aplicaciones más importantes y extendidas de la ósmosis inversa. Este proceso se ha convertido en una solución clave para satisfacer la demanda de agua potable en regiones donde los recursos de agua dulce son limitados o inexistentes. Las plantas de desalación por ósmosis inversa están diseñadas para extraer sal y otros minerales del agua de mar, produciendo agua potable de alta calidad. Actualmente, esta tecnología proporciona agua potable a millones de personas en países

como Arabia Saudita, Israel, y España, que lideran en la implementación de plantas de desalación a gran escala (McCutcheon *et al*., 2006).

El proceso de desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa requiere una gran cantidad de energía, debido a la necesidad de superar la alta presión osmótica del agua salada. Sin embargo, los avances en la eficiencia energética, como el uso de intercambiadores de energía y membranas más eficientes, han reducido significativamente los costos operativos. Estos avances han permitido que la desalación se convierta en una opción económicamente viable, especialmente en zonas costeras con acceso limitado a fuentes de agua dulce (Greenlee *et al.*, 2009).

A pesar de sus beneficios, la desalación por ósmosis inversa también presenta desafíos ambientales, como la gestión de las salmueras resultantes del proceso, que contienen altas concentraciones de sal y otros contaminantes. La disposición adecuada de estas salmueras es crucial para minimizar el impacto ambiental en los ecosistemas marinos. Actualmente se están investigando métodos más sostenibles para el manejo de estos desechos, incluyendo su posible reutilización en aplicaciones industriales (Subramani *et al.*, 2015).

1.5.2. Tratamiento de Aguas Residuales

El tratamiento de aguas residuales mediante ósmosis inversa es otra aplicación vital, especialmente en áreas con escasez de agua o donde se requiere un alto nivel de purificación para la reutilización del agua. Este proceso permite la eliminación de contaminantes orgánicos, sales y otras impurezas, produciendo agua reciclada que puede ser reutilizada en aplicaciones industriales, agrícolas e incluso para consumo humano en algunos casos, siempre que se cumpla con la normativa legal (Shannon *et al*., 2008)

La utilización de ósmosis inversa en el tratamiento de aguas residuales ha ganado importancia debido al creciente enfoque en la sostenibilidad y la conservación de recursos hídricos. En muchas industrias, el agua tratada se reutiliza en procesos de producción, lo que reduce la demanda de agua fresca y disminuye la cantidad de efluentes descargados al medio ambiente. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad,

sino que también puede reducir significativamente los costos operativos para las empresas (Bitaw *et al*., 2020).

Sin embargo, el tratamiento de aguas residuales mediante ósmosis inversa también enfrenta desafíos, como el ensuciamiento de las membranas debido a la acumulación de contaminantes, lo que puede reducir la eficiencia del proceso y aumentar los costos de mantenimiento. El siguiente objetivo en esta área se centra en desarrollar membranas más resistentes al ensuciamiento y en optimizar los procesos de pretratamiento para prolongar la vida útil de las membranas y mejorar la eficiencia general del sistema (Elimelech and Phillip, 2011).

1.5.3. Producción de Agua Potable

La producción de agua potable mediante ósmosis inversa no se limita a la desalación de agua de mar; también se aplica en la purificación de aguas subterráneas, aguas superficiales y otras fuentes de agua que contienen altos niveles de contaminantes. En áreas donde la calidad del agua está comprometida por la contaminación química o biológica, la ósmosis inversa proporciona una barrera efectiva contra una amplia gama de contaminantes, incluyendo metales pesados, nitratos, y microorganismos patógenos (Fritzmann *et al.*, 2007).

El uso de ósmosis inversa para la producción de agua potable ha aumentado significativamente en todo el mundo, especialmente en regiones con fuentes de agua comprometidas. Esta tecnología se ha integrado en plantas de tratamiento de agua municipales, donde complementa otros procesos de tratamiento para garantizar que el agua distribuida cumpla con los estándares de calidad sanitaria. Además, se ha convertido en una solución vital en situaciones de emergencia y en áreas rurales, donde las infraestructuras de tratamiento de agua son limitadas o inexistentes (Greenlee *et al.*, 2009).

A pesar de sus ventajas, la producción de agua potable mediante ósmosis inversa también requiere un manejo cuidadoso de los subproductos, como las aguas concentradas que contienen los contaminantes removidos. El vertido de estos subproductos es un desafío técnico y ambiental, que requiere el desarrollo de soluciones sostenibles para minimizar su impacto en el medio ambiente (Shannon *et al*., 2008).

1.5.4. Uso en la Agricultura

El uso de ósmosis inversa en la agricultura se ha incrementado debido a la necesidad de fuentes de agua limpia y la creciente escasez de agua en muchas regiones agrícolas. Esta tecnología permite la desalación de aguas salobres y la purificación de aguas residuales, produciendo agua adecuada para riego, lo que es crucial en áreas con suelos sensibles a la salinidad. El agua tratada mediante ósmosis inversa no solo mejora la calidad del riego, sino que también contribuye a la sostenibilidad agrícola al reducir la necesidad de agua dulce proveniente de fuentes naturales (Qadir *et al*., 2003).

La implementación de sistemas de ósmosis inversa en la agricultura también ha demostrado ser efectiva en la reducción de la salinidad del suelo, un problema común en regiones áridas y semiáridas. Al utilizar agua desalinizada para el riego, se puede prevenir la acumulación de sales en el suelo, lo que ayuda a mantener la fertilidad del suelo y a mejorar el rendimiento de los cultivos. Este enfoque es especialmente relevante en países donde la agricultura es una parte fundamental de la economía y el acceso al agua dulce es limitado (Bresler *et al.*, 2012).

Sin embargo, el uso de ósmosis inversa en la agricultura no está exento de desafíos. Los altos costos energéticos y la gestión de los residuos generados, como las salmueras concentradas, son aspectos que requieren atención continua (Greenlee *et al.*, 2009).

1.6. Desafíos y Futuro de la Ósmosis Inversa

1.6.1. Retos Técnicos y Operacionales

La ósmosis inversa enfrenta varios retos técnicos y operacionales que limitan su eficiencia y aplicación a gran escala. Uno de los desafíos más significativos es el ensuciamiento de las membranas, conocido como fouling, que ocurre cuando las partículas suspendidas, microorganismos o compuestos orgánicos se adhieren a la superficie de las membranas. Este fenómeno reduce la permeabilidad del agua y aumenta los costos operativos debido a la necesidad de limpiezas frecuentes y reemplazo de membranas (Fritzmann *et al.*, 2007). La investigación actual se centra en desarrollar membranas antifouling y mejorar los procesos de pretratamiento para minimizar este problema.

Otro reto técnico importante es la eficiencia energética del proceso de ósmosis inversa. A pesar de los avances en la recuperación de energía, la desalación de agua de mar sigue siendo un proceso intensivo en energía. Los costos energéticos representan una parte significativa del costo total del agua desalinizada. El desarrollo de membranas con mayor permeabilidad y la optimización de los sistemas de recuperación de energía son áreas clave de investigación para reducir el consumo energético y hacer la ósmosis inversa más sostenible (Elimelech and Phillip, 2011).

Además, la gestión de la salmuera resultante del proceso de desalación presenta desafíos operacionales. La salmuera es una solución concentrada que puede tener efectos adversos en el medio ambiente si no se maneja adecuadamente. Por ello se están desarrollando métodos más sostenibles para la gestión de la salmuera, incluyendo su posible uso en procesos industriales o la recuperación de recursos valiosos y su vertido de forma que la salinidad local aumente lo mínimo posible (Park *et al*., 2020)

1.6.2. Impacto Ambiental y Sostenibilidad

El impacto ambiental de la ósmosis inversa es un tema de creciente preocupación, especialmente en lo que respecta a la gestión de la salmuera y el consumo de energía. La salmuera, que contiene altas concentraciones de sal y otros contaminantes, puede causar daños a los ecosistemas marinos cuando se descarga en el océano. Además, el proceso de desalación puede alterar las corrientes marinas y afectar la biodiversidad local. Para mitigar estos impactos, se están desarrollando nuevas tecnologías y estrategias de gestión que incluyen la dilución de la salmuera antes de su descarga y la exploración de aplicaciones industriales para la salmuera (Subramani *et al.*, 2015).

La sostenibilidad de la ósmosis inversa también está ligada a su eficiencia energética. Aunque se han realizado importantes avances en la reducción del consumo energético mediante la implementación de sistemas de recuperación de energía, el proceso sigue siendo intensivo en energía. Las investigaciones actuales buscan desarrollar fuentes de energía renovable para alimentar las plantas de desalación y mejorar la eficiencia energética de las membranas utilizadas en el proceso (Voutchkov, 2018)

Además, la huella de carbono asociada con la ósmosis inversa es otro aspecto crítico que debe abordarse para garantizar la sostenibilidad a largo plazo. La integración de

tecnologías de captura y almacenamiento de carbono, junto con el uso de energías renovables, se considera una estrategia viable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la desalación (Elimelech and Phillip, 2011).

1.6.3. Innovaciones y Tendencias Futuras

El futuro de la ósmosis inversa está marcado por una serie de innovaciones tecnológicas que buscan mejorar la eficiencia, reducir los costos y minimizar el impacto ambiental. Una de las tendencias más prometedoras es el desarrollo de nuevas membranas basadas en nanomateriales, como el grafeno y los nanotubos de carbono. Estas membranas ofrecen una mayor permeabilidad y resistencia al fouling, lo que podría revolucionar el campo de la desalación y el tratamiento de aguas residuales (Werber *et al*., 2016).

Otra área de innovación es la integración de la ósmosis inversa con otras tecnologías de tratamiento de agua, como la ósmosis directa y la electrodiálisis inversa. Estas tecnologías híbridas tienen el potencial de mejorar la eficiencia del proceso y reducir los costos operativos al combinar las ventajas de diferentes métodos de separación (Lee *et al*., 2011).

Finalmente, el uso de fuentes de energía renovable, como la energía solar y eólica, para alimentar las plantas de ósmosis inversa es una tendencia que está ganando impulso. Estas soluciones no solo reducirían la dependencia de combustibles fósiles, sino que también contribuirían a la sostenibilidad a largo plazo de la desalación de agua (Shannon *et al*., 2008).

1.7. Antecedentes

El agua es un recurso fundamental para la agricultura, y su disponibilidad influye directamente en la productividad de los cultivos. En regiones áridas y semiáridas, donde la precipitación es limitada, el riego se convierte en una práctica esencial para garantizar la producción agrícola. Según datos de la FAO, aproximadamente el 70% del agua dulce disponible en el mundo se utiliza para riego agrícola, y en muchos países en desarrollo, esta cifra alcanza hasta el 90% (FAO, 2020). Sin embargo, el aumento de la demanda de alimentos y el cambio climático han puesto una presión adicional sobre los recursos hídricos, lo que ha incrementado la importancia de gestionar el agua de manera eficiente en el sector agrícola (UN-Water, 2021).

La evolución de la precipitación ha sido uno de los factores clave que ha afectado la disponibilidad de agua para riego a nivel mundial. En las últimas décadas, las tendencias de precipitación han variado significativamente debido al cambio climático, con algunas regiones experimentando un aumento en la intensidad y frecuencia de las lluvias, mientras que otras sufren sequías más prolongadas. Estudios científicos recientes han mostrado que las zonas semiáridas, como el Mediterráneo y partes de África subsahariana, han registrado una disminución significativa en la precipitación anual, lo que ha agravado los problemas de disponibilidad de agua para la agricultura (IPCC, 2021). Esta variabilidad en las precipitaciones hace que sea cada vez más necesario el uso de tecnologías avanzadas de gestión de agua, como la ósmosis inversa, para garantizar el acceso a recursos hídricos seguros para riego (Feng *et al.*, 2013). Es en este contexto en el que se enmarca este TFG, y se definen los objetivos que se describen a continuación.

1.8. Objetivos

- Diseño de una planta de desalación de agua de mar mediante la tecnología de osmosis inversa con capacidad para suministrar 500 m^3/día para regadío.
    - Describir de forma detallada la elección de los equipos y materiales necesarios para el diseño de una planta de osmosis inversa, incluyendo la combinación de membranas más adecuadas para esta planta.
    - Estudiar el efecto de las principales perturbaciones sobre los parámetros más importantes que afectan al funcionamiento de una planta de osmosis inversa mediante simulaciones con el software Q+ de LG.

2. Metodología

2.1. Diseño de la planta

2.1.1. Selección del Software de Simulación

Para la realización de las simulaciones, se seleccionó el software **Q+** de LG, especializado en la simulación de plantas de ósmosis inversa. Este programa es reconocido por su capacidad para modelar y optimizar el rendimiento de sistemas de ósmosis inversa, permitiendo ajustar y evaluar múltiples variables operativas y condiciones de entrada.

2.1.2. Elección de los parámetros de diseño

A partir de las especificaciones del cliente, se especificó un caso base, y se llevaron a cabo diversas simulaciones en las que se variaron sistemáticamente los siguientes parámetros:

- Tipos de Membranas: Se probaron diferentes membranas disponibles en la base de datos del software, considerando sus características particulares como el rechazo de solutos, la resistencia a incrustaciones y el flujo de permeado.
- Tasa de Recuperación: Se modificó la tasa de recuperación para entender cómo variaciones en este parámetro influyen en el rendimiento de la planta, incluyendo el consumo energético y la calidad del permeado. La tasa de recuperación es el coeficiente entre el caudal de permeado obtenido y el caudal de alimentación a la planta.
- Configuración de las membranas: Se probaron diferentes configuraciones para analizar que superficie de membrana convenía, así como los tipos de membrana más adecuados.

2.1.3. Elección de las variables para el análisis del rendimiento de la planta

Los resultados de cada simulación se compararon con los obtenidos en el caso base, evaluando el rendimiento en términos de:

- Rechazo de solutos: Porcentaje de solutos rechazados en cada simulación, comparando la efectividad de cada configuración.
- Presión de operación: Estudio de la presión necesaria para superar la presión osmótica y lograr un flujo a través de las membranas.

- Consumo energético: Evaluación del consumo energético asociado a cada condición operativa, lo cual es crítico para determinar la viabilidad económica del sistema. Se estudiará a través de la energía empleada para obtener $1m^3$ de permeado (SEC, por sus siglas en inglés).
- Calidad del permeado: Análisis de la calidad del agua producida, particularmente en términos de conductividad y concentración de contaminantes residuales.
- Caída de presión: Evaluación de la caída de presión sufrida en la salmuera al atravesar los tubos de presión.
- Permeabilidad del boro: Estudio de la capacidad del sistema para rechazar el boro presente en el agua de alimentación y cuya concentración puede generar problemas en cultivos poco tolerantes.

2.1.4. Simulación de Configuraciones Híbridas

Se llevaron a cabo múltiples simulaciones para explorar el impacto de diversas configuraciones híbridas. Estas configuraciones combinan diferentes tipos de membranas, tecnologías y etapas de tratamiento con el fin de optimizar el rendimiento del sistema y mejorar la calidad del agua tratada.

Durante estas simulaciones, se evaluaron parámetros como la eficiencia de rechazo de solutos, la minimización de la incrustación de las membranas y el consumo energético.

2.1.5. Selección de la Configuración Óptima

Después de analizar los resultados de las simulaciones, se seleccionó la configuración híbrida que ofreció el mejor rendimiento global, considerando tanto la eficiencia operativa como la viabilidad económica. Se denomina configuración híbrida al empleo de distintos tipos de membrana en los tubos de presión. La configuración elegida se caracterizó por un balance óptimo entre la calidad del agua tratada, el consumo energético, y la estabilidad operativa.

2.1.6. Dimensionamiento de los Componentes Principales

Una vez seleccionada la configuración óptima, se procedió al dimensionamiento de los componentes principales de la planta:

- Filtros de Arena y Antracita: Se calculó el tamaño necesario de los filtros de arena y antracita, considerando la carga de sólidos suspendidos en el agua de alimentación y el caudal de diseño. El dimensionamiento se basó en las tasas de filtración recomendadas y la capacidad de retención de partículas.
- Microfiltraciones: Se dimensionaron los sistemas de microfiltración para asegurar la protección de las membranas de ósmosis inversa, minimizando el riesgo de fouling. El diseño incluyó la selección de cartuchos o módulos de microfiltración, considerando tanto la eficiencia de retención de partículas como el caudal requerido.
- Tanques de Almacenamiento y Mezcla: Se determinaron las capacidades de los tanques necesarios para el almacenamiento de agua pretratada y permeada, así como para la mezcla y dosificación de químicos. El dimensionamiento consideró el tiempo de retención necesario para cada etapa y la demanda máxima del sistema.
- Bombas de Alta Presión y Alimentación: Se seleccionaron y dimensionaron las bombas requeridas para asegurar un flujo constante y adecuado a través de todas las etapas del sistema, incluyendo las bombas de alta presión necesarias para la etapa de ósmosis inversa. El dimensionamiento se realizó en función del caudal de diseño y la presión requerida por el sistema, asegurando un balance entre eficiencia energética y rendimiento.
- Membranas necesarias: Cada membrana empleada tiene 8 pulgadas de diámetro y 440 pies cuadrados. Estas dimensiones están estandarizadas por los fabricantes y facilitan el diseño. En la ficha técnica de las membranas se especifica un flujo recomendado de entre 12 y 14 lmh. Dado que el caudal viene determinado por la recuperación, se busca un numero de membranas que permita la mejor calidad del agua y menor consumo cumpliendo con las recomendaciones del fabricante.

2.1.7. Documentación del Diseño

Finalmente, se documentó el diseño completo de la planta, incluyendo todos los cálculos de dimensionamiento, las especificaciones técnicas de los componentes seleccionados,

los esquemas de flujo del proceso, y las recomendaciones para la operación y mantenimiento del sistema.

2.2. Estudio de la operatividad de la planta

2.2.1. Definición de las principales variables durante la operación

- Temperatura del agua de alimentación: Se simularon distintas condiciones de temperatura para evaluar su impacto en el rendimiento de la ósmosis inversa. La temperatura influye directamente en la viscosidad del agua y, por ende, en la eficiencia del proceso de separación.

- pH del agua de alimentación: Se realizaron ajustes en el pH del agua para analizar su efecto sobre la capacidad de rechazo de sales y el desempeño general de las membranas. El pH puede afectar la carga superficial de las membranas y la solubilidad de ciertos compuestos. Además, es especialmente influyente en la permeabilidad del boro.

2.2.2. Análisis del efecto de las variables de operación en el desempeño de la planta

Se elaboraron conclusiones basadas en los resultados de las simulaciones, destacando los escenarios resultantes bajo diferentes condiciones operativas.

3. Resultados

3.1. Diseño de la planta de ósmosis inversa

3.1.1. Necesidad de la planta y especificaciones de diseño

Una cooperativa agrícola del sur de España necesita una fuente fiable y constante de agua para regadío. Sus requerimientos son de 500 m^3/día y captación de pozo costero. Para el diseño de la planta, se otorgó una analítica en donde se especifican los principales iones y sólidos disueltos totales (TDS , por sus siglas en inglés)

Tabla 1. Analítica del agua bruta extraída del pozo costero.

	Valor	**Unidad**
TDS	36.000,00	mg/L
Amonio (NH_4^+)	0,00	mg/L
Sodio (Na^+)	10.905,94	mg/L
Potasio (K^+)	503,52	mg/L
Magnesio (Mg^{2+})	1.338,24	mg/L
Calcio (Ca^{2+})	431,37	mg/L
Estroncio (Sr^{2+})	7,37	mg/L
Bario (Ba^{2+})	0,01	mg/L
Fluoruro (F^-)	1,29	mg/L
Cloruro (Cl^-)	19.951,37	mg/L
Sulfato (SO_4^{2-})	3.055,05	mg/L
Nitrato (NO_3^-)	0,00	mg/L
Carbonato (CO_3^{2-})	5,11	mg/L
Bicarbonato (HCO_3^-)	157,63	mg/L
Boro (B)	4,78	mg/L
Presión Osmótica	26,46	Bar

Dado que el agua será destinada a riego, no será necesario remineralizar el agua. No obstante, será importante atender a la concentracion final de boro ya que las plantas presentan una tolerancia reducida al mismo.

El cliente especifica que el agua será empleada para irrigación de plantas de tomate. Por ello, informa de algunas características necesarias que ha de tener el agua destinada a riego, Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos del agua solicitada por el cliente.

	Valor	**Unidad**
TDS	< 1.500	mg/L
Potasio (K^+)	< 400,00	mg/L
Fluoruro (F^-)	< 0,80	mg/L
Cloruro (Cl^-)	< 875,00	mg/L
Nitrato (NO_3^-)	< 300,00	mg/L
Boro (B)	< 1,50	mg/L

Además de aportar esta información, incide en la relevancia de los límites del boro y cloruros dada su capacidad de envenenamiento.

Impacto de la elección de membranas

Para el estudio del efecto de la selección de las membranas se han escogido 7 diferentes tipos. Las membranas SW 440 Rejection y SW 440 Rejection G2 (que son una versión de segunda generación respecto a las clásicas), SW440 Great Rejection y SW440 Great Rejection G2, SW440 Super Rejection y SW440 Super Rejection G2 y las SW440 Energy Saving. Cada una de ellas tiene unas propiedades diferentes que se pueden apreciar en las siguientes figuras.

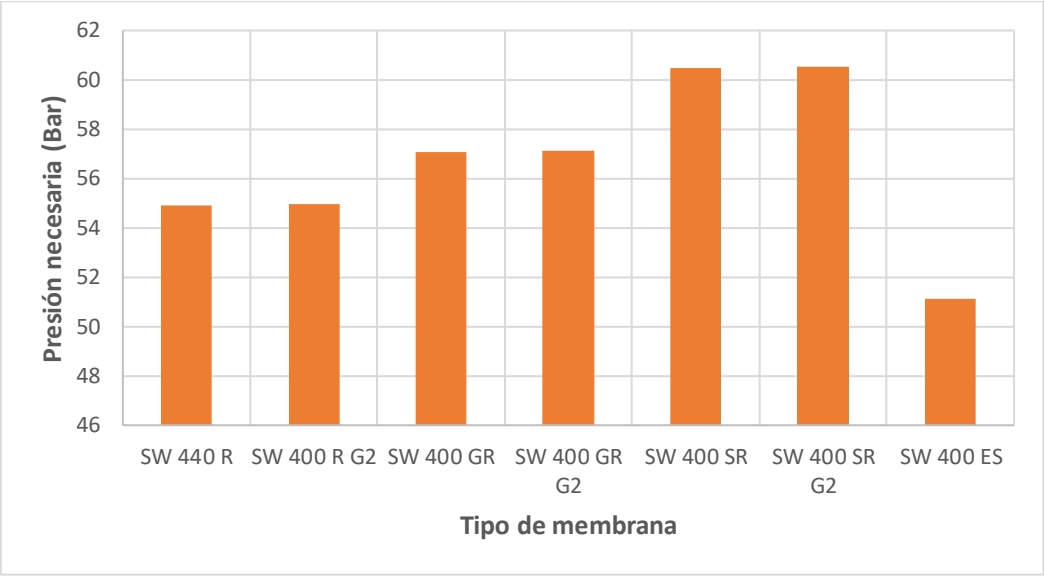

Figura 1. Efecto del empleo de diferentes membranas en la presión de operación.

En la figura 1 se puede apreciar cómo cuanto más restrictiva es una membrana al paso de las sales mayor es la presión de operación que se ha de ejercer. Esto se debe a que cuanto mayor es el rechazo de sales más densa es la estructura. Esta estructura más densa y especializada impide que los solutos pasen a través de ella. No obstante, entre las membranas de primera y generación no se aprecia un cambio significativo.

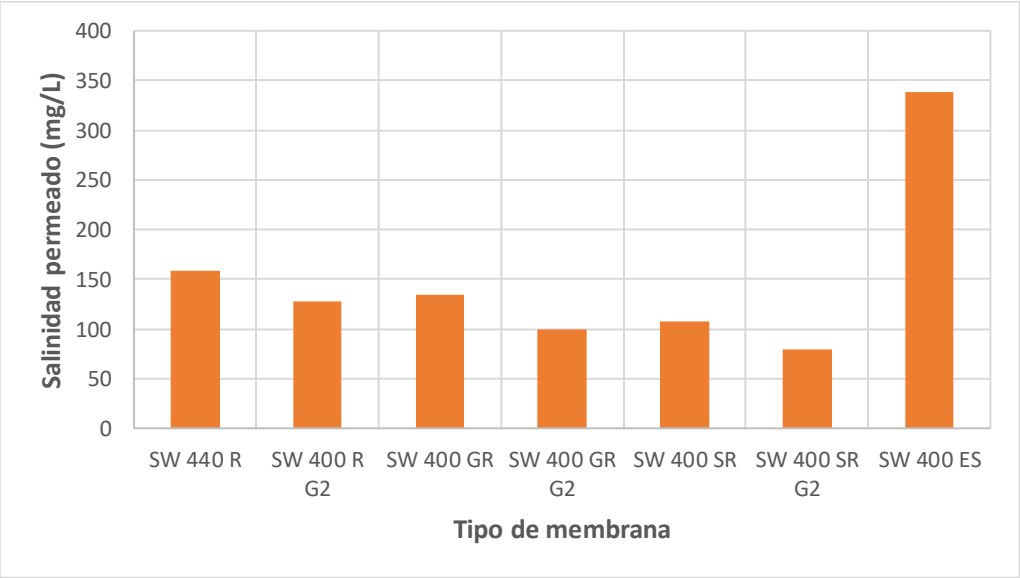

Figura 2. Efecto del empleo de diferentes membranas en la concentración de sales del permeado.

En la figura 2 se puede ver una tendencia opuesta a la de la presión. Si bien todas las membranas nos permiten alcanzar una salinidad adecuada, incluso apta para el

consumo humano, las membranas “Super Rejection” son las que presentan una mayor capacidad de eliminación de sales. Respecto a las “Energy Saving”, pese a permitir un paso mayor de sales sustancial, necesitan de una presión de operación mucho menor por lo que, si los requerimientos de las características del agua no son tan estrictos, su empleo sería lo más aconsejado. Esta afirmación se respalda en la figura 3.

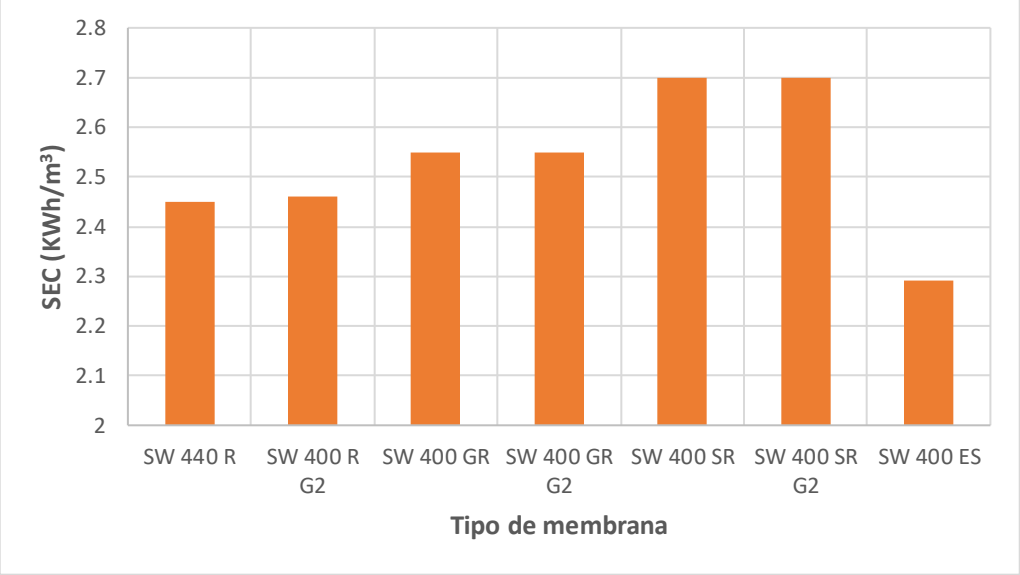

Figura 3. Efecto del empleo de diferentes membranas en el coste de operación.

Como se puede apreciar cuanto mayor es el rechazo de sales mayor es la energía por metro cúbico que hay que consumir. Dado que el objetivo de una planta de desalación es lograr un agua apta para el uso del consumidor, las membranas que hay que elegir son aquellas qué, con el menor gasto energético posible, cumplan los requisitos para su uso. Si bien es cierto que las de segunda generación consumen más, el permeado que producen es de mayor calidad.

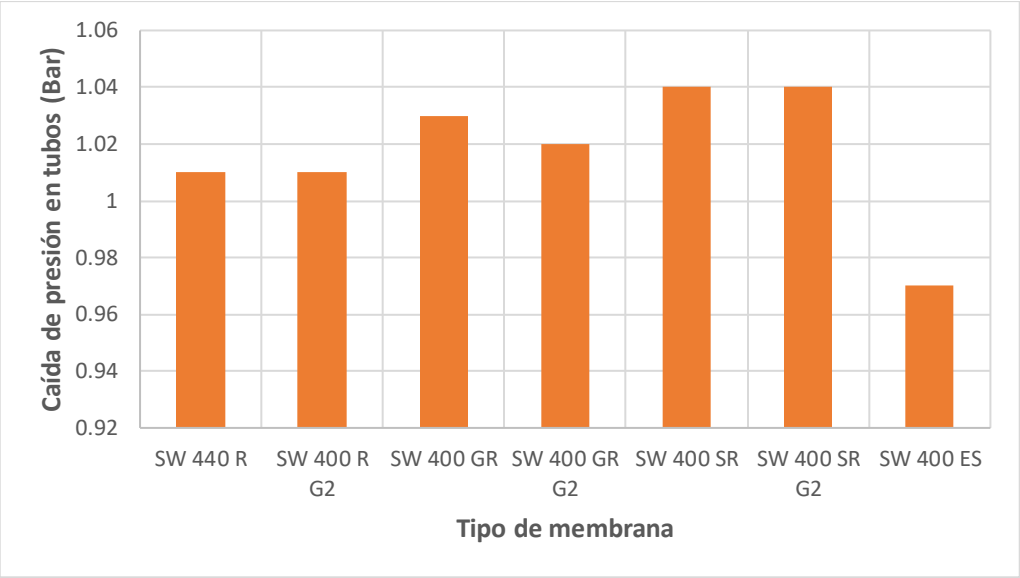

Figura 4. Efecto del empleo de diferentes membranas en la caída de presión del rechazo.

Sin embargo, Las diferencias en la caída de presión no es sustancial entre las membranas. Si bien es cierto que las "Energy Saving" presentan una caída ligeramente menor, no se puede considerar relevante este parámetro a la hora de elegir las membranas.

3.1.2. Impacto de la Tasa de Recuperación en el Sistema

Se realizaron simulaciones variando la tasa de recuperación de la ósmosis desde **el 20% hasta el 45%**. En cada caso, se midieron los parámetros descritos en la metodología y se obtuvieron los siguientes resultados:

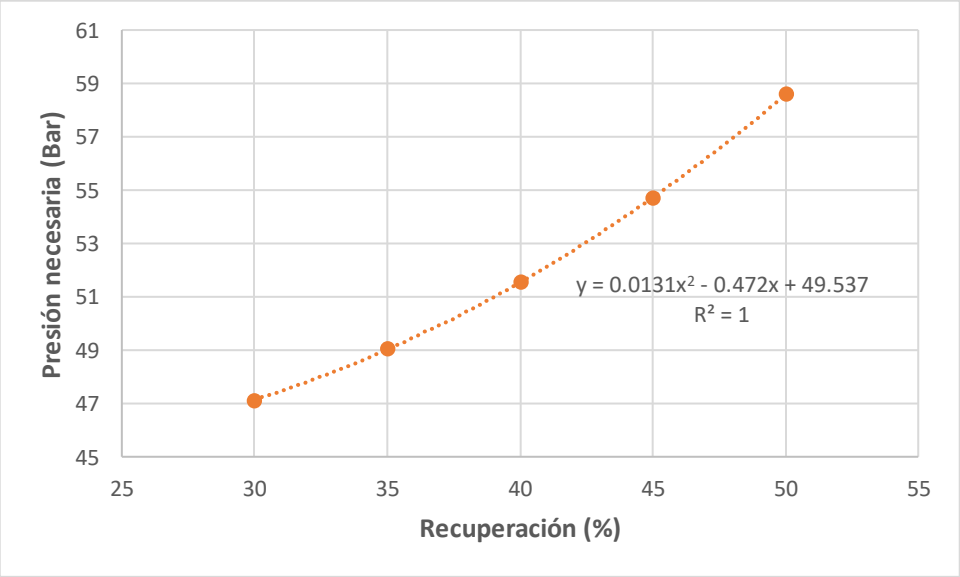

Figura 5. Efecto de la Tasa de recuperación en la presión de operación.

Como se puede observar en la figura, la tasa de recuperación afecta sustancialmente a la presión de operación siguiendo una tendencia parabólica. Con tasas de recuperación menores, la concentración resultante en el rechazo es menor, por lo que la presión osmótica también lo es. Dado que para conseguir un flujo de permeado se ha de superar la presión osmótica, cuanto menor sea, menor será la presión que se necesita aplicar para superarla.

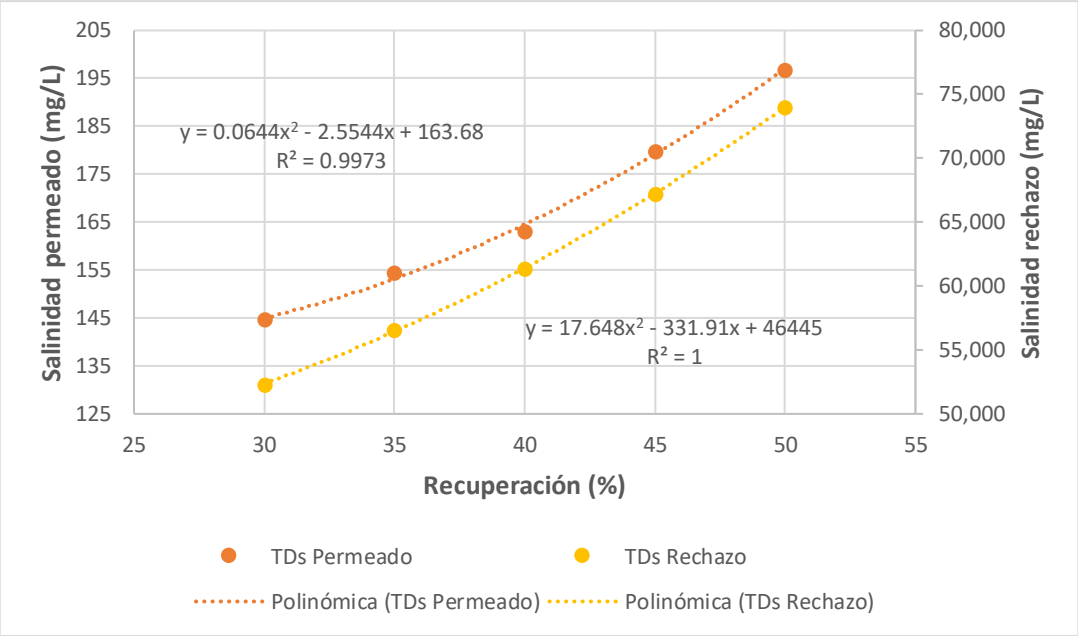

Figura 6. Efecto de la tasa de recuperación en la cantidad de sólidos disueltos el permeado y en el rechazo.

En la figura 6 se aprecia que el aumento de la tasa de recuperación supone un aumento parabólico de la concentración de solutos en el permeado, así como en el rechazo. En cuanto al permeado, una mayor concentración en el lado del rechazo generara un mayor paso de soluto.

$$J_s = B \cdot (\Delta C) \qquad \text{(EC 1)}$$

Donde:

- J_s es el flujo de soluto (mol/m²·s).
- B es la permeabilidad de la membrana al soluto (m/s).
- ΔC es la diferencia de concentración del soluto a través de la membrana (mol/m³).

Por otro lado, en el rechazo, la salinidad aumenta ya que el caudal disminuye y las sales disueltas se concentran. El efecto de la tasa de recuperación sobre el caudal de alimentación necesario se puede ver en la figura siguiente:

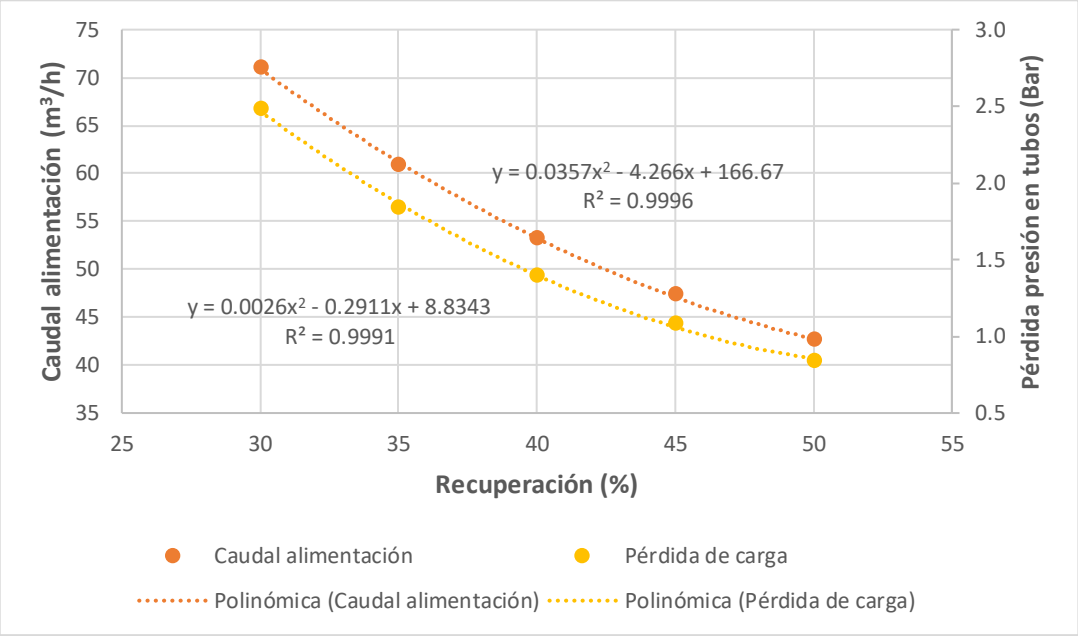

Figura 7. Efecto de la tasa de recuperación en el caudal de alimentación necesario para producir el permeado requerido y en la caída de presión en los tubos.

Se puede deducir de la figura una tendencia claramente parabólica decreciente. No se puede reducir más la recuperación ya que, con esta configuración, el flujo por tubo superaría los 17m^3/h recomendados por el fabricante. Tampoco se puede superar el 45% de recuperación ya que el caudal de concentrado resultante sería inferior a 3m^3/h por tubo. Además, una subida excesiva de la recuperación puede derivar en problemas de polarización e incrustación.

Analizando la figura 7 se observa que la caída de presión presenta una tendencia similar al caudal que circula. Al ser un tubo de diámetro fijo, cuanto mayor es el caudal, mayor es la pérdida de carga de un fluido por circular en su interior.

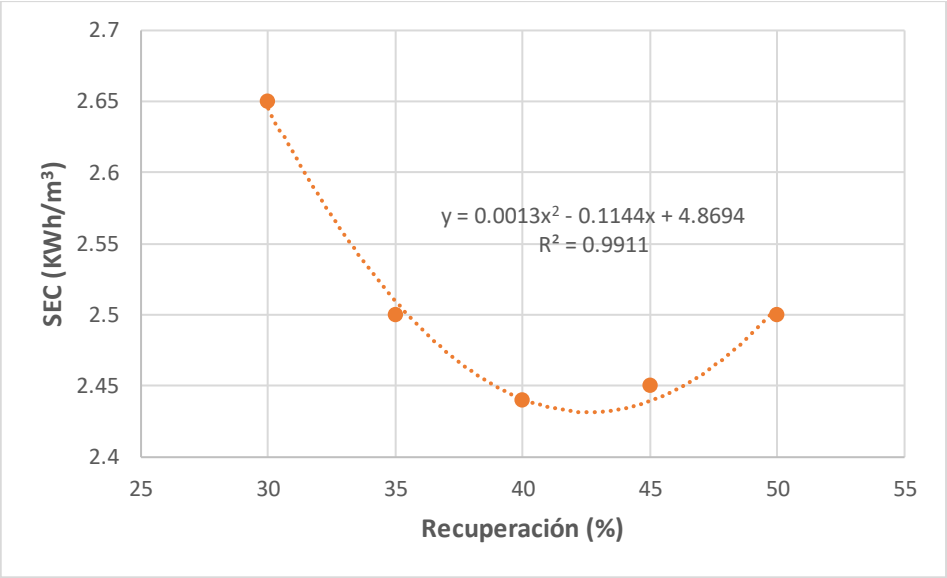

Figura 8. Efecto de la tasa de recuperación en el SEC.

El coste de operación estimado reflejado en la figura 8, presenta una tendencia parabólica con un punto mínimo entre el 40 y 45% de recuperación. Por este motivo, se va a considerar una recuperación de la planta del 45%. De esta forma se aprovecha mejor el agua procedente del pozo y el SEC se mantiene en valores próximos al óptimo.

3.1.3. Elección de la disposición de las membranas

En la simulación realizada con el programa LG Plus, se probaron diversas configuraciones de membranas para identificar la más adecuada en términos de eficiencia y calidad del agua producida. Los principales parámetros considerados fueron la presión de operación, la salinidad del permeado y el flujo a través de las membranas.

Cada tubo de presión dispone de espacio para 7 membranas. Por ello se han probado diferentes configuraciones para el diseño de la planta.

Las condiciones de partida para el diseño de la planta son una temperatura del agua de entrada de 20 ºC, una recuperación del 45%, un pH de 8 y una disposición de una etapa de 6 tubos con 7 membranas en cada tubo.

Se probaron los siguientes casos:

Tabla 3. Identificación de las membranas en cada posición del tubo de presión para cada uno de los casos estudiados

Posición	1	2	3	4	5	6	7
Caso 1	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2
Caso 2	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES
Caso 3	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES
Caso 4	SW 440 SR G2	SW 440 SR G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 400 ES	SW 400 ES	SW 400 ES
Caso 5	SW 440 SR G2	SW 440 SR G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 440 R G2	SW 400 ES	SW 400 ES

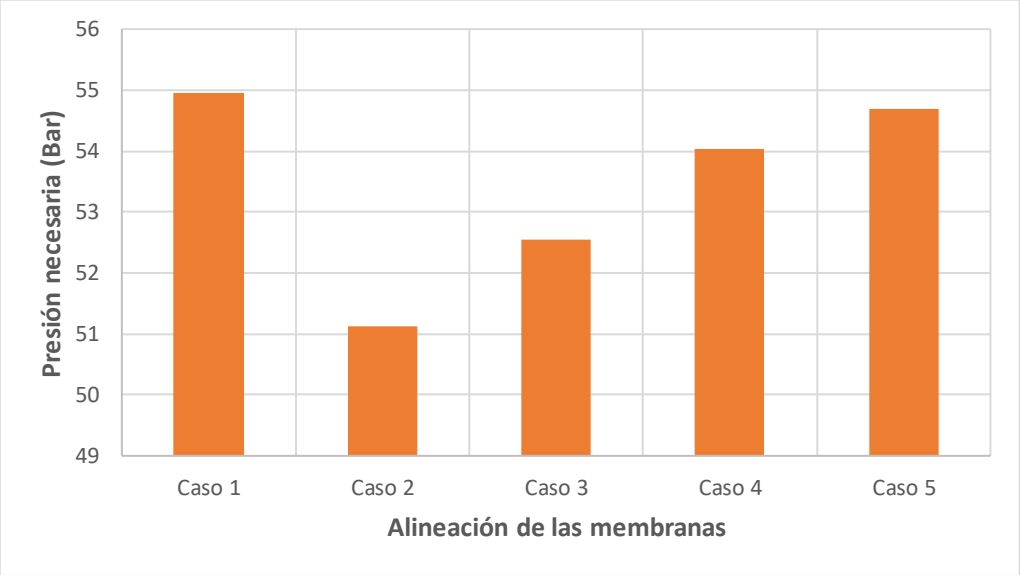

Figura 9. Presión de operación en los diferentes casos estudiados.

Analizando la presión de operación necesaria vemos como el caso 2 es el que menos presión requiere mientras que el caso 1 es el que más (ver Figura 9). Esto es esperable ya que las membranas "Energy Saving" están pensadas para operar a menor presión. No obstante, en la figura 10, analizando los sólidos disueltos totales resultantes en el permeado, se puede ver como el caso 2 es el menos eficaz.

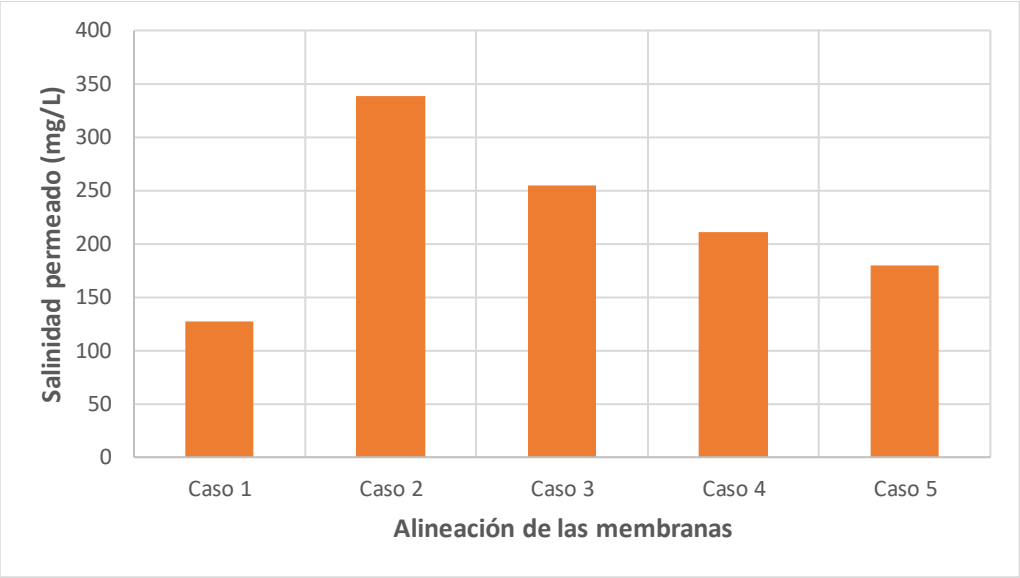

Figura 10. TDS del permeado en los diferentes casos estudiados.

Si bien el caso 1 podría ser una buena disposición, al analizar el flujo por membrana podemos observar una descompensación muy grande entre la primera membrana y la última (ver Figura 11).

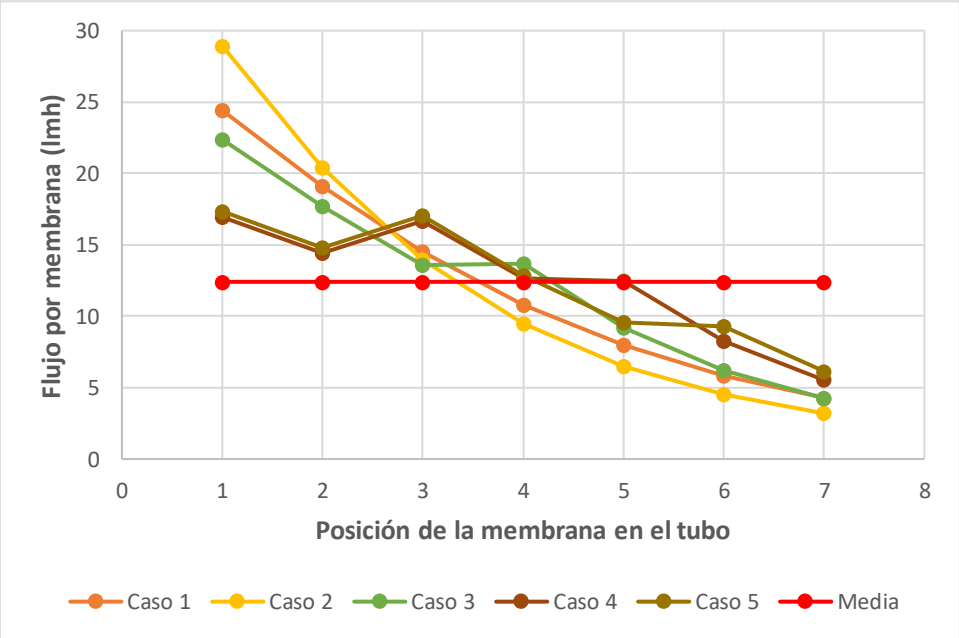

Figura 11. Flujo que atraviesa cada membrana para los 5 casos estudiados.

Para ver mejor la diferencia, en la figura 12 se puede comparar el flujo entre el caso 1 y el 5.

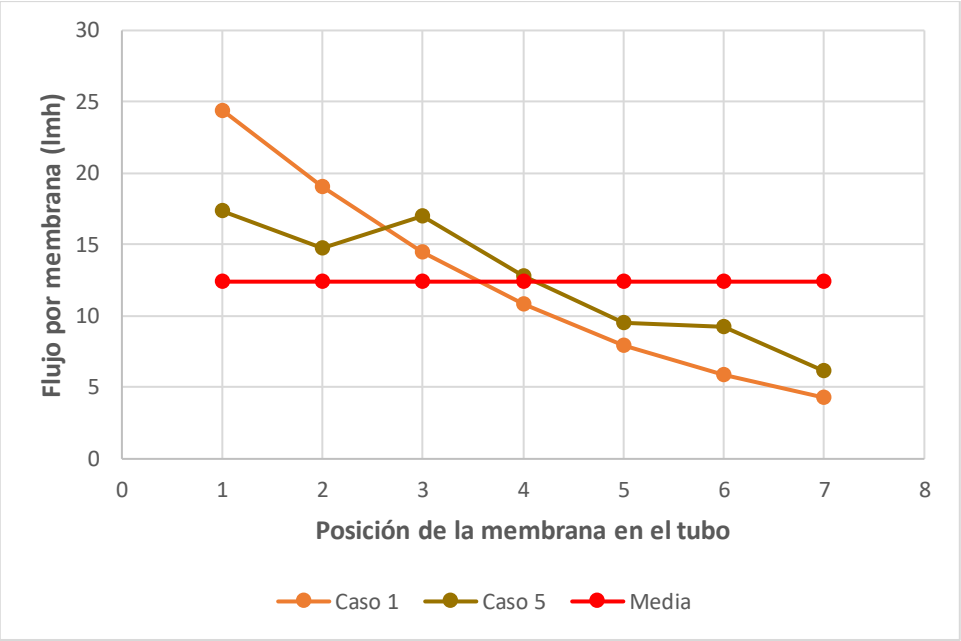

Figura 12. Evolución del flujo por membrana a lo largo del tubo de presión en los mejores casos estudiados.

Como se puede apreciar, el caso 5 presenta una distribución del flujo mucho más uniforme y cercano a la media. Esto es una ventaja importante ya que la distribución descompensada del flujo en las membranas lleva a problemas de incrustación y de degradación prematura de aquellas expuestas a mayor flujo.

Por estos motivos, la distribución de las membranas que se va a aceptar como óptima es la reflejada en el caso 5. Las primeras dos membranas permiten un mayor rechazo y un menor flujo cuando la presión osmótica es menor. A medida que el rechazo avanza por el tubo se encuentra con membranas cada vez más permisivas al paso del agua, por lo que el flujo se mantiene equilibrado a lo largo del tubo.

El resumen de las condiciones de diseño de la planta propuesta se muestra en la Tabla 4

3.1.4. Diseño del lecho de filtración

El agua que se alimenta a las membranas de OI debe de estar lo más limpia posible. La presencia de turbidez o partículas en suspensión podría ocasionar ensuciamiento. Este, provoca una disminución en la permeabilidad, lo que significa que se requiere mayor presión para lograr el mismo caudal de permeado. Además, aumenta la frecuencia y la intensidad de las limpiezas de la membrana, conocidas como limpiezas químicas (CIP, por sus siglas en inglés). Estas limpiezas, si son demasiado frecuentes, pueden deteriorar

la membrana, reduciendo su vida útil y aumentando los costes operativos debido a la necesidad de reemplazar las membranas con mayor frecuencia.

Tabla 4. Resumen del diseño de la planta propuesta

Parámetro	**Valor**	**unidades**
Caudal alimentación	47,33	m^3/h
T alimentación	20	°C
Recuperación	45	%
P operación	56,18	bar
TDS permeado	125,17	mg/L
TDS rechazo	67.220,02	mg/L
SEC	2,51	Kwh/ m^3
Flujo medio	12,41	lmh
Nº Tubos de presión	6	Tubos
Nº Membranas/Tubo	7	Membranas

Para evitar este ensuciamiento, es necesario retener la mayor parte de los sólidos suspendidos del agua mediante un medio filtrante. Para ello, hay diferentes alternativas como pueden ser ultrafiltraciones, lechos de zeolita o arena, etc. Por su simplicidad y bajo coste, se ha decidido diseñar un filtro de arena y antracita. Esta disposición en dos capas, en la zona superior la antracita y en la baja, la arena, permite la retención de las partículas de mayor tamaño en primera instancia y las de menor tamaño posteriormente. Así se logra que el filtro tarde más tiempo en saturarse y retrasar las limpiezas a contracorriente.

La velocidad de filtración recomendada para este tipo de filtros es en torno a 10 m/h (Voutchkov, 2019). Con este dato de diseño podemos saber el área necesaria para el filtro.

$$A = \frac{Q}{v_f} = \frac{47{,}33\ \left(\frac{m^3}{h}\right)}{10\ \left(\frac{m}{h}\right)} = 4{,}733\ m^2 \qquad \text{(EC 2)}$$

Donde:

- A es el área necesaria.
- Q es el caudal a tratar.
- v_f es la velocidad de filtración.

Una vez conocido el área, podemos sacar el diámetro interior.

$$A = 4{,}733\ m^2 = \pi \left(\frac{D^2}{4}\right) \qquad \text{(EC 3)}$$

$$D = \sqrt{\frac{4\,A}{\pi}} = 2{,}45\ m \qquad \text{(EC 4)}$$

Este diámetro es demasiado grande para transportar de una manera estándar. Esto supondría costes de transporte excesivos y un reto logístico. Por ello, se ha decidido poner dos filtros en paralelo con un frente de válvulas automático. Esto permitirá la limpieza de uno de ellos mientras el otro sigue operando. Así, el nuevo diámetro será:

$$A = \frac{Q}{v_f} = \frac{23{,}67\ \left(\frac{m^3}{h}\right)}{10\ \left(\frac{m}{h}\right)} = 2{,}367\ m^2 \qquad \text{(EC 5)}$$

$$D = \sqrt{\frac{4\,A}{\pi}} = 1{,}73\ m \qquad \text{(EC 6)}$$

Siguiendo el razonamiento anterior, este diámetro no se encuentra en el catálogo de ningún negocio. Para operar con este diámetro se requeriría un diseño a medida. Para hacer más práctico el diseño, se usará el diámetro inmediatamente superior que se puede encontrar con facilidad (1,80 m).

Por tanto, el nuevo área y velocidad de filtración son los siguientes.

$$A = \pi \left(\frac{1{,}80^2}{4}\right) = 2{,}54\ m^2 \qquad \text{(EC 7)}$$

$$v_f = \frac{Q}{A} = 7{,}87\ \frac{m}{h} \qquad \text{(EC 8)}$$

Esta velocidad es ligeramente inferior a los 10 m/h recomendados en la bibliografía. Sin embargo, la reducción de velocidad permitirá un flujo más estable y un aumento del tiempo necesario para saturar el filtro.

En cuanto a la capa de arena y antracita, dado que este tipo de filtros se usan de forma asidua, las recomendaciones bibliográficas indican que los grosores deberían de ser los siguientes: la antracita debe de tener una altura de entre 0,4 m y 0,6 m. Así como un d_{10} entorno a 1 mm. El d_{10} es el diámetro de las partículas del medio filtrante para el cual el 10% en peso del material filtrante es más fino. Se determina mediante un análisis granulométrico, donde se realiza un tamizado y una distribución acumulativa. Para el caso de la arena la altura recomendada es de entre 0,3 m y 0,5 m. En cuanto al grosor de partículas, se recomienda un d_{10} de 0,45 mm.

Además, es necesario dejar un espacio desde la boca de distribución al lecho para permitir la acumulación de residuos y la expansión del lecho durante su limpieza. El espacio recomendado estándar es de 0,5 m (Voutchkov, 2019).

Como medida conservadora, se va a seleccionar una altura de 0,6m de antracita, 0,5 m de arena y 0,5 m de espacio libre. Por ello, la altura total del sistema será la siguiente.

$$L_{total} = L_{antracita} + L_{arena} + L_{espacio\ libre} \qquad \text{(EC 9)}$$

$$L_{total} = 0{,}6\,m + 0{,}5\,m + 0{,}5\,m = 1{,}6\,m$$

El último parámetro necesario para el diseño del filtro es el grosor de este. El material elegido para su diseño será el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Para determinar el grosor lateral, se empleará la ecuación de Barlow.

$$t = \frac{P\,R}{S\,E - 0{,}6\,P} = \frac{0{,}6\ (MPa)0{,}9\ m}{140\ (MPa)1 - 0{,}6 * 0{,}6\ (MPa)} = 0{,}00387\ m = 3{,}87\ mm \qquad \text{(EC 10)}$$

Donde:

- t es el espesor de la pared del tanque.
- P es la presión interna.

- S es la tensión permisible del material
- E es el coeficiente de eficiencia de la soldadura.
- R es el radio interno del tanque.

Este valor ha de ser multiplicado por un coeficiente de seguridad

$$t_{lateral} = t_{Barlow}\, C = 3{,}87\ mm\ 1{,}1 = 4{,}3\ mm \qquad \text{(EC 11)}$$

Para la base, suponiendo que es plana, el cálculo sería el siguiente:

$$t = \frac{P\,R}{S\,E} = \frac{0{,}6\ (MPa)\,0{,}9\ m}{140\ (MPa)\,1} = 0{,}00385\ m = 3{,}85\ mm \qquad \text{(EC 12)}$$

$$t_{base} = t_{Barlow}\, C = 3{,}85\ mm\ 1{,}1 = 4{,}2\ mm$$

Para el dimensionamiento de las bombas de alimentación es necesario conocer la caída de presión de estos filtros. Para calcularla se va a emplear la ecuación de Hazen-Williams.

$$h_f = \frac{1{,}067\ L\ v_f}{d_{10}^{1{,}33}} \qquad \text{(EC 13)}$$

Donde:

- h_f es la pérdida de carga en metros de agua.
- L es la altura del lecho.
- Q es el caudal a tratar.
- v_f es la velocidad de filtración.

Para la antracita, la caída de presión es:

$$h_{antracita} = \frac{1{,}067 \cdot 0{,}6 \cdot 7{,}87}{1} = 6{,}37\ m \qquad \text{(EC 14)}$$

Mientras que, para la arena, la caída de presión es:

$$h_{arena} = \frac{1{,}067 \cdot 0{,}5 \cdot 7{,}87}{0{,}45} = 15{,}35\ m \qquad \text{(EC 15)}$$

Así, la caída de presión del filtro será de:

$$h_{Total} = h_{antracita} + h_{arena} = 21{,}72\ m \qquad \text{(EC 16)}$$

En cuanto al caudal de lavado necesario, se recomienda una velocidad de entorno a 20m/h. Esto tiene como objetivo eliminar los sólidos acumulados y desapelmazar el lecho que, a lo largo del servicio se ha ido compactando.

$$Q = v_f\, A = 20\,\frac{m}{h}\,2{,}54\,m^2 = 50{,}8\,\frac{m^3}{h} \qquad \text{(EC 17)}$$

Frente de filtración

Para el funcionamiento automático de los filtros se va a instalar un frente de filtración. Su objetivo es permitir el funcionamiento correcto de los filtros, así como permitir su limpieza. La disposición se puede ver en la siguiente figura.

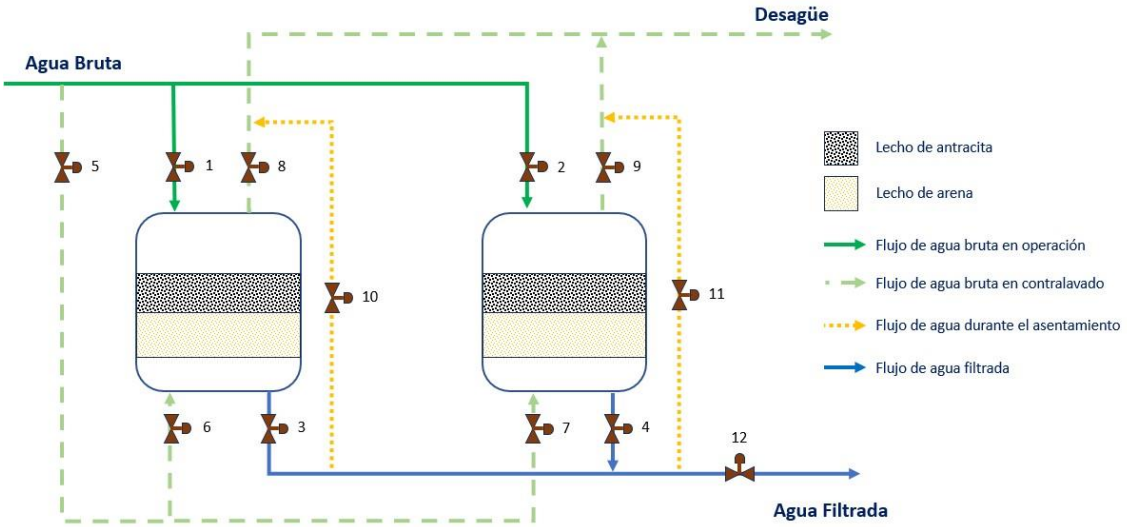

Figura 13. Esquema de válvulas para el funcionamiento y lavado de los filtros.

Observando la figura anterior, se puede apreciar la numeración de las válvulas de operación. De esta forma, el funcionamiento será el siguiente.

Tabla 5. Estado de las válvulas durante los diferentes modos de operación.

Modo de operación	Válvulas abiertas	Válvulas cerradas
Filtrado	1,2,3,4,12	5,6,7,8,9,10,11
Limpieza	5,6,7,8,9	1,2,3,4,10,11,12
Arrastre	1,2,3,4,10,11	5,6,7,8,9,12

Durante el modo de arrastre, el agua es alimentada de forma normal y el filtrado se rechaza. Este proceso tiene lugar durante los minutos posteriores a la limpieza y tiene el objetivo de eliminar los sólidos que pasan mientras el lecho limpio asienta.

3.1.5. Diseño de la microfiltración

Una práctica habitual en el diseño de plantas de ósmosis inversa, especialmente en las de agua de mar, consiste en la instalación de una microfiltración previa a la bomba de alta presión y del recuperador de energía. Si bien los filtros de arena y antracita son capaces de eliminar la mayor parte de la turbidez y sólidos en suspensión, no instalar ningún tipo de medida extra de protección puede dañar de forma prematura los equipos presurizadores. Las bombas que se emplean para lograr la presión necesaria en la de desalación de agua marina son de desplazamiento positivo. Si las partículas sólidas entrasen en el cilindro donde los pistones realizan el movimiento podrían dañar tanto las paredes exteriores como los propios pistones reduciendo así su eficiencia e incluso provocando su inutilización.

Este tipo de filtros emplea unos cartuchos que se han estandarizado con el fin de facilitar su utilización. Presentan una forma cilíndrica con un diámetro de 2,5 pulgadas o 63,5 mm y una longitud que puede ser de 10, 20, 30 o 40 pulgadas. Los más utilizados a nivel industrial son los de 40 pulgadas o 1016 mm de largo y, por ello, se van a emplear este tipo de cartuchos.

Para conocer el número de cartuchos necesarios se ha de calcular el área de cada 1 de ellos. A diferencia de los filtros de lecho, diseñados en el apartado anterior, el área de filtración no es la sección sino las paredes exteriores del cilindro. Así, el área filtrante será la siguiente.

$$A_C = D\ \pi\ L = 0{,}635\ (m)\ \pi\ 1.016\ (m) = 0{,}203\ m^2 \qquad \text{(EC 18)}$$

La velocidad de filtración recomendada para los cartuchos de microfiltración de 5 micrómetros se encuentra entre 5 y 20 m/h dependiendo del fabricante (Voutchkov, 2019). Se propone el empleo de un filtro de 15 cartuchos para este caudal. De esta manera, la velocidad de filtración se define a continuación.

$$v_f = \frac{Q}{A_C\ N°_{Cartuchos}} = \frac{47{,}33}{0{,}203 \cdot 15} = 15{,}57\ \frac{m}{h} \qquad \text{(EC 19)}$$

Como referencia del fabricante, se suele dar un intervalo de flujo (m^3/h) recomendado por cada 10 pulgadas de cartucho. Este valor suele estar entre 0,7 y 1,1 m^3/h (Voutchkov, 2019). A modo de comprobación:

$$Flujo\ por\ 10" = \frac{Q}{\frac{40"}{10"}\ N°_{Cartuchos}} = \frac{47{,}33}{\frac{40}{10} \cdot 15} = 0{,}79\ \frac{m^3}{h} = 13{,}15\ \frac{L}{min} \qquad \text{(EC 20)}$$

Dado que los parámetros se encuentran dentro de los valores recomendados, se puede dar por válida la decisión de emplear 15 cartuchos estándar de 2,5 pulgadas de diámetro y 40 pulgadas de largo. La carcasa será fabricada en PRFV.

Para el cálculo de la caída de presión existen dos alternativas. Una de ellas es el empleo de la ecuación de Darcy que calcula la caída de presión al paso de un fluido a través un medio poroso.

$$\Delta P = \frac{\mu \cdot v_f \cdot L}{\kappa} + \frac{\rho \cdot v_f^2}{2}\ C_f \qquad \text{(EC 21)}$$

Donde:

- ΔP es la caída de presión a través del filtro.
- μ es la viscosidad dinámica de agua.
- v_f es la velocidad superficial.
- L es el espesor del medio filtrante.
- K es la permeabilidad del medio.
- ρ es la densidad del fluido.
- C_f el coeficiente de fricción.

No obstante, debido a la estandarización de este tipo de cartuchos, la mayoría de proveedores aportan tablas o figuras donde se puede estimar la caída de presion generada por sus filtros. En este caso se utilizará el filtro de polipropileno suministrado por la empresa “Pentair” que entrega la siguiente figura.

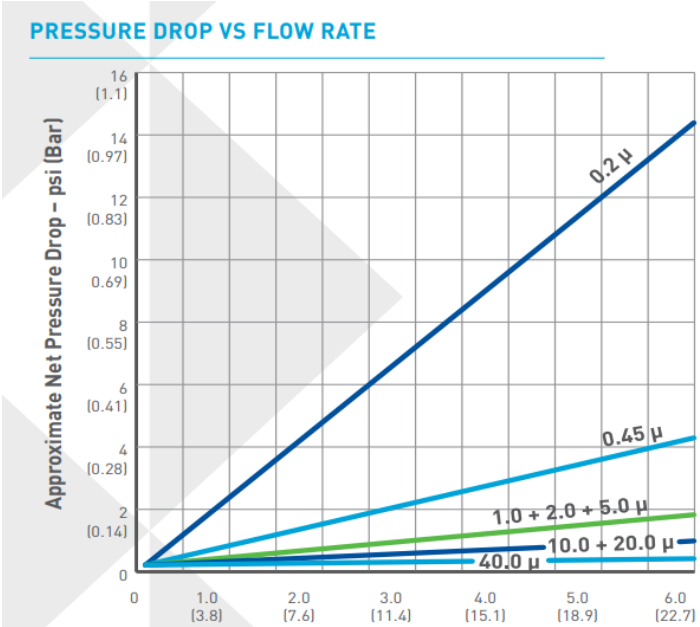

Figura 14. Figura aportada por un fabricante de cartuchos de microfiltración donde calcular la caída de presión estimada.

En la figura 14, se representa la caída de presión en psi(bar) frente al flujo que atraviesa cada cartucho en gal/min (l/min) por cada 10".

Sabiendo que el caudal es de 13,15 L/min por cada 10" de cartucho, podemos estimar que la caída de presión rondará los 0,07 bar para los filtros de 1, 2 y 5 µm.

En cuanto al grosor de la carcasa, se estimará en función del material y de la presión requerida. Como medida de seguridad, se estima que 6 bar son suficientes para las etapas de pretratamiento. El material elegido para ello será el PRFV. El cálculo es similar al realizado para los filtros de arena y antracita.

Para el grosor lateral:

$$t = \frac{P\ R}{S\ E - 0{,}6\ P} C_f = \frac{0{,}6\ (MPa) 0{,}45\ m}{140\ (MPa) 1 - 0{,}6 * 0{,}6\ (MPa)} C_f = 0{,}00213\ m = 2{,}13\ mm \quad \text{(EC 22)}$$

Mientras que para la base plana:

$$t = \frac{P\ R}{S\ E} C_f = \frac{0{,}6\ (MPa) 0{,}45\ m}{140\ (MPa) 1} C_f = 0{,}00212\ m = 2{,}12\ mm \quad \text{(EC 23)}$$

La altura del equipo viene de forma estandarizada y será de 1,10 m.

3.1.6. Diseño del sistema de Aclarado/CIP

La planta constará de un sistema de aclarado y limpieza química. El aclarado ("flushing") es especialmente relevante en los casos de agua de mar ya que, debido a su alto contenido en sales, tiene una gran capacidad corrosiva. Para evitarlo, cuando la planta realiza una parada, es necesario pasar agua del permeado por todo el sistema. De esta forma, mientras se realizan tareas de mantenimiento o se realiza el contralavado de los filtros, los equipos y membranas no están en contacto con agua de mar ni en seco. Esto último es relevante para las membranas ya que podrían perder sus propiedades de rechazo.

En cuanto al sistema CIP, cuyas siglas significan limpieza in situ ("Cleaning in place"), es un proceso diseñado para mantener y restaurar la eficiencia de las membranas de ósmosis inversa, que con el tiempo pueden acumular incrustaciones, "fouling" y contaminación biológica. Este proceso es crucial para prolongar la vida útil de las membranas y garantizar un rendimiento óptimo del sistema. Para llevar a cabo esta limpieza se emplean ácidos débiles, para eliminar incrustaciones de carbonato de calcio, disoluciones alcalinas, lo menos dañinas con las membranas posible, y biocidas para eliminar los microorganismos que se hayan podido desarrollar en las superficies de las membranas y equipos. La frecuencia de estas limpiezas depende de la calidad de partida del agua y suele ser cada 3 a 6 meses (Voutchkov, 2019).

A la hora del diseño de estos dos sistemas, el tanque empleado es el mismo. El tanque de aclarado/CIP consta de unos agitadores eléctricos para mezclar los químicos durante la limpieza, aunque durante la operación diaria solo consta de agua de permeado.

Para el cálculo del volumen del tanque se han de tener en cuenta los siguientes factores.

$$V_{CIP} = V_{Tuberias} + V_{Microfiltracion} + V_{Tubos} + V_{Sumergencia} \qquad \text{(EC 24)}$$

Donde:

- V_{CIP} es el volumen del tanque aclarado/CIP.
- $V_{Tuberías}$ es el volumen retenido en las tuberías del sistema de aclarado.
- $V_{Microfiltración}$ es el volumen retenido en la carcasa y cartuchos de microfiltración.
- V_{Tubos} es el volumen retenido en los tubos de presión y membranas de OI.

- $V_{Sumergencia}$ es el volumen requerido para evitar la formación de vórtices y la entrada de aire en la bomba de aclarado.

Para el cálculo del volumen retenido en las tuberías, se necesita saber el diámetro y la longitud del sistema. La longitud del sistema se estima en 25m como medida conservadora, mientras que el diámetro en 116,6mm. Los motivos de la elección de este diámetro se pueden ver en el siguiente apartado. Por tanto, el volumen retenido será:

$$V_{Tuberías} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L = \pi \cdot \frac{0{,}116^2}{4} \cdot 25 = 0{,}27\ m^3 \qquad \text{(EC 25)}$$

El volumen necesario para llenar la carcasa de microfiltración es aportado por el fabricante y es de 120 L o 0,120 m^3 (Pentair, 2023).

En cuanto al volumen retenido por los tubos de presión y las membranas contenidas en su interior, el fabricante indica que cada membrana retiene unos 30L (LG, 2024).

$$V_{Tubos} = N°_{Tubos} \cdot N°_{Memb/Tubo} \cdot V_{Retenido\ por\ membrana} = 6 \cdot 7 \cdot 0{,}03 = 1{,}26\ m^3 \qquad \text{(EC 26)}$$

Para determinar el volumen de sumergencia mínimo es necesario saber la altura requerida para evitar la formación de vórtices y la entrada de aire en la bomba de aclarado. Sabiendo que la bomba requiere de al menos 0,3 m de columna de agua para evitar la cavitación, el volumen será:

$$V_{Tuberías} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot H_{Sumergencia} = \pi \cdot \frac{1{,}5^2}{4} \cdot 0{,}3 = 0{,}53\ m^3 \qquad \text{(EC 27)}$$

Así el volumen necesario para el tanque será:

$$V_{CIP} = 0{,}27 + 0{,}12 + 1{,}26 + 0{,}53 = 2{,}18\ m^3 \qquad \text{(EC 28)}$$

Para asegurar un exceso, evitar la corrosión y degradación prematura de las membranas y la opción de solicitar un tanque con medidas estándar, se va a tomar como medida un redondeo al alza.

$$V_{CIP} = 3\ m^3$$

Por tanto, suponiendo un diámetro estándar de 1,5m las dimensiones del tanque serán las siguientes:

$$V_{CIP} = 3\ m^3 = \pi \cdot \frac{1{,}5m^2}{4} \cdot L\ (m)$$

$$L = 1{,}7\ m$$

$$D = 1{,}5\ m$$

Durante la limpieza química las diferentes disoluciones se recircularán al tanque de aclarado/CIP y las partículas desincrustadas y depositadas serán retenidas en los cartuchos de microfiltración.

Para determinar el grosor es necesario conocer el material. Dado que este tanque no soportará presiones al margen de la hidrostática, el material elegido será el polietileno de alta densidad (HDPE).

$$t = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot R}{S} C_f = \frac{1000\ \left(\frac{Kg}{m^3}\right) 9{,}8\ \left(\frac{m}{s^2}\right) 1{,}7m\ \cdot\ 0{,}75m}{15000000\ (Pa)} C_f = 0{,}0009\ m = 1\ mm \qquad \text{(EC 29)}$$

3.1.7. Diseño de las tuberías

Para determinar los diámetros más adecuados para cada tramo de la planta, es necesario relacionar el caudal con el diámetro.

$$Q = \frac{v_f \cdot (\pi \cdot D^2)}{4} \qquad \text{(EC 30)}$$

Para determinar la velocidad del fluido en la tubería (v_f) se consultaron referencias bibliográficas. La velocidad recomendada depende del material. Para las tuberías de baja presión se empleará PVC por su facilidad en el montaje, su bajo coste y su resistencia. Para la alta presión, el material elegido es el acero inoxidable super dúplex ya que, el material ha de ser capaz de soportar tanto las altas presiones como la elevada capacidad corrosiva de la salmuera de rechazo. Así, las velocidades recomendadas son entre 1 y 2,5 m/s para el PVC y entre 1,5 y 3 m/s para el acero inoxidable.

A modo de ejemplo se presentarán los cálculos para el agua bruta de alimentación que se repetirán para el resto de los tramos. Se considerará la velocidad más baja para tratar de minimizar las pérdidas por fricción.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v_f}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 47{,}33}{\pi \cdot 1}} = 129{,}38mm \qquad \text{(EC 31)}$$

Dado que no coincide con un diámetro estándar, se busca el diámetro más aproximado que se fabrica. Para este caso, el DN 125 con un diámetro interior de 116,6 mm es el más próximo que cumple con las recomendaciones. Por ello, la velocidad de filtración real será.

$$v_f = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot {D_i}^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 47{,}33}{\pi \cdot 116{,}6}} = 1{,}23\ m/s \qquad \text{(EC 32)}$$

Para el cálculo de la caída de presión por circular por la tubería, se empleará la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{\rho \cdot {V_f}^2}{2} \qquad \text{(EC 33)}$$

Donde:

- ΔP es la pérdida de presión (Pa).
- f es el factor de fricción (depende del material de la tubería y la rugosidad).
- L es la longitud de la tubería (m).
- D_i es el diámetro interno de la tubería (m).
- ρ es la densidad del fluido (kg/m^3).
- v_e es la velocidad del fluido (m/ s).

La estimación del factor de fricción se realizará mediante la ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2log\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7D_i} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right) \qquad \text{(EC 34)}$$

Donde:

- ε es la rugosidad de la tubería
- Re es el número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho \cdot v_f \cdot D}{\mu} \qquad \text{(EC 35)}$$

La Tabla 6 recoge los resultados del cálculo de las caídas de presión y diámetros óptimos para las distintas corrientes de la planta.

Tabla 6. Caracterización de las corrientes y tuberías.

Corriente	Caudal (m^3/h)	Material	D_i (mm)	V_e (m/s)	L (m)	ΔP (bar)
Alimentación total OI	47,3	PVC	116,6	1,23	25	0,027
Entrada bomba alta	21,3	PVC	81,4	1,14	15	0,022
Salida bomba alta	21,3	Inox	77,92	1,24	15	0,028
Entrada iSave	26,0	PVC	81,4	1,39	15	0,031
Salida iSave	26,0	Inox	77,92	1,52	15	0,040
Entrada común OI	47,3	Inox	77,92	2,76	15	0,156
Salida común OI	26,0	Inox	77,92	1,52	15	0,040
Permeado	21,3	PVC	81,4	1,14	25	0,037
Rechazo	26,0	PVC	81,4	1,39	25	0,052

3.1.8. Diseño de las bombas

Para determinar las características adecuadas de las bombas de proceso en un sistema, es fundamental conocer la potencia que deben suministrar. Esta potencia, conocida como potencia hidráulica o potencia requerida, es clave para asegurar que las bombas proporcionen la energía suficiente para mover el fluido a través del sistema a la presión y caudal adecuados.

$$P_h = \frac{Q \cdot HMT \cdot \rho \cdot g}{\eta} \qquad \text{(EC 36)}$$

Donde:

- Q es el caudal en m^3/s.
- HMT es la altura manométrica total en metros (m).
- ρ es la densidad del fluido en kg/m^3.
- g es la aceleración debida a la gravedad (9.81 m/s^2).
- η es la eficiencia de la bomba (sin unidad, como un valor decimal).

La altura nanométrica total representa la presión que la bomba ha de aportar en la salida para cumplir con los requisitos del sistema.

$$HMT = H_{Geodésica} + H_{Descarga} + H_{Pérdidas} \quad \text{(EC 37)}$$

Donde:

- $H_{Geodésica}$ representa la presión necesaria para superar la diferencia de altura entre la bomba y el punto de descarga.
- $H_{Descarga}$ es la presión requerida en el punto de descarga.
- $H_{Pérdidas}$ representa la caída de presión que sufre el fluido al atravesar equipos y fluir por las tuberías.

El sistema propuesto tiene 3 bombas con diferentes propósitos.

Bomba de circulación

Esta bomba es la primera en el proceso y se utiliza para transportar el agua bruta desde la balsa de almacenamiento hacia los filtros de pretratamiento. Su función principal es asegurar un flujo continuo de agua hacia el sistema de filtración, donde se eliminan las partículas suspendidas y otros contaminantes que podrían dañar las membranas de ósmosis inversa. Esta bomba no necesita alcanzar presiones muy altas, pero debe garantizar un caudal constante que abastezca el proceso de manera eficiente y una presión en la descarga que evite la cavitación de la bomba de alta presión. La bomba de circulación y la de alta presión se encuentran a la misma altura.

$$HMT = H_{Descarga} + H_{Pérdidas} \quad \text{(EC 38)}$$

$$H_{Descarga} = 2\ bar = 20\ m$$

La bomba de alta presión requiere de 2 bares a la entrada del fluido o 20 m de columna de agua.

$$H_{Pérdidas} = H_{filtro\ lecho} + H_{Microfiltración} + H_{Tuberías} = 21{,}72 + 0{,}7 + 0{,}81 \quad \text{(EC 39)}$$

La pérdida de carga por tuberías para esta bomba incluye el tramo desde la alimentación de la planta a la alimentación de las bombas y el recuperador de energía.

$$H_{Pérdidas} = 23{,}23\ m$$

Por lo que:

$$HMT = 20\ m + 23{,}23\ m = 43{,}23\ m = 4{,}3\ bar \qquad \text{(EC 40)}$$

Por tanto, la potencia requerida por la bomba será la siguiente:

$$P_h = \frac{47{,}33 \cdot 43{,}23 \cdot 1000 \cdot 9{,}8}{3600 \cdot 0{,}78} = 7.140{,}86\ W = 7{,}1\ KW \qquad \text{(EC 41)}$$

La bomba necesaria para la circulación del fluido y alimentar la planta será una bomba centrífuga monoetapa con una potencia de 7,1 KW y un caudal de 47,33 m^3/h.

Bomba de alta presión

Esta es la bomba más importante del sistema de ósmosis inversa, ya que proporciona la presión necesaria para superar la presión osmótica del agua y permitir la separación de las sales disueltas a través de las membranas semipermeables. La bomba de alta presión aumenta significativamente la presión del agua después de que ha pasado por los filtros. No se considera relevante la diferencia de alturas entre los diferentes equipos.

$$HMT = H_{Descarga} + H_{Pérdidas} \qquad \text{(EC 42)}$$

$$H_{Descarga} = 56{,}18\ bar = 561{,}8\ m \qquad \text{(EC 43)}$$

La bomba de alta presión ha de aportar 56,18 bares a la entrada de los tubos de presión o 561,8 m de columna de agua.

$$H_{Pérdidas} = H_{Tuberías} = 0{,}184\ bar \qquad \text{(EC 44)}$$

La pérdida de carga por tuberías para esta bomba incluye el tramo desde la bomba de alta presión hasta los tubos de alta presión.

$$H_{Pérdidas} = 1{,}84\ m$$

Por lo que:

$$HMT = 561{,}8\ m + 1{,}84\ m = 563{,}64\ m = 56{,}4\ bar \quad \text{(EC 45)}$$

Por tanto, la potencia requerida por la bomba será la siguiente:

$$P_h = \frac{21{,}33 \cdot 563{,}64 \cdot 1000 \cdot 9{,}8}{3600 \cdot 0{,}84} = 38.961{,}62\ W = 38{,}96\ KW \quad \text{(EC 46)}$$

La bomba necesaria para la circulación del fluido y alimentar la planta será una bomba de desplazamiento positivo mediante pistones con una potencia de 38,96 KW y un caudal de 21,33 m^3/h. Junto a esta bomba se empleará un recuperador isobárico con capacidad para 26 m^3/h y una bomba booster de 1,5 KW de potencia para lograr equiparar las presiones de la bomba de alta presión.

Bomba de aclarado/CIP

Esta bomba impulsa el agua de permeado, a través de las membranas para eliminar los sedimentos, sales acumuladas y otros residuos que pueden obstruir o dañar las membranas. El aclarado es fundamental para mantener la eficiencia del sistema y prolongar la vida útil de las membranas, ya que evita la acumulación de sólidos que podrían reducir la permeabilidad y aumentar la presión de operación.

$$HMT = H_{Descarga} + H_{Pérdidas} \quad \text{(EC 47)}$$

$$H_{Descarga} = 4\ bar = 40\ m \quad \text{(EC 48)}$$

La limpieza de las membranas se suele realizar a 4 bares o 40 m de columna de agua.

$$H_{Pérdidas} = H_{Tuberías} = 0{,}3\ m \quad \text{(EC 49)}$$

La pérdida de carga por tuberías para esta bomba incluye el tramo desde la bomba de aclarado a la entrada de los tubos de presión.

Por lo que:

$$HMT = 40\ m + 0{,}3\ m = 40{,}3\ m = 4{,}03\ bar \quad \text{(EC 50)}$$

Por tanto, la potencia requerida por la bomba será la siguiente:

$$P_h = \frac{48 \cdot 4{,}03 \cdot 1000 \cdot 9{,}8}{3600 \cdot 0{,}78} = 675{,}11\ W = 0{,}68\ KW \qquad \text{(EC 51)}$$

La bomba necesaria para la circulación del fluido y alimentar la planta será una bomba centrífuga monoetapa con una potencia de 0,68 KW y un caudal de 48 m^3/h.

3.2. Estudio del efecto de diferentes variables en el comportamiento de la ósmosis inversa

Para dar una mejor información al cliente del modo de funcionamiento de la planta se van a realizar simulaciones en el programa LG Q+ con el fin de mostrar cual es el efecto de la variación en ciertos parámetros naturales. Las condiciones operativas iniciales fueron una **temperatura de 20°C** y un **pH de 8**. Dado que el fabricante indica que las membranas tienen una vida útil de 3 años y el simulador permite indicar este parámetro, se va a simular con membranas envejecidas (3 años). De esta forma se estudia un caso más conservador.

3.2.1. Impacto de la temperatura del agua de alimentación

Se realizaron simulaciones variando la temperatura del agua de alimentación desde **5°C hasta 35°C**. En cada caso, se evaluaron los parámetros descritos en la metodología y se obtuvieron los siguientes resultados:

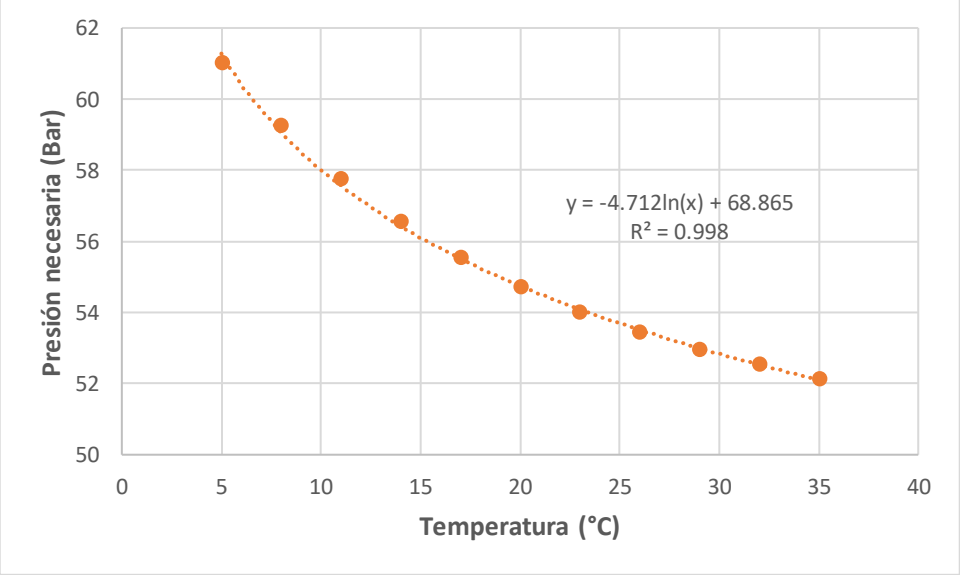

Figura 15. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la presión de operación

Como se puede observar en la figura 15, la temperatura del agua de alimentación afecta sustancialmente a la presión de operación siguiendo una tendencia logarítmica negativa. A temperaturas más bajas, la viscosidad del agua aumenta, requiriendo una mayor presión para mantener el flujo a través de las membranas.

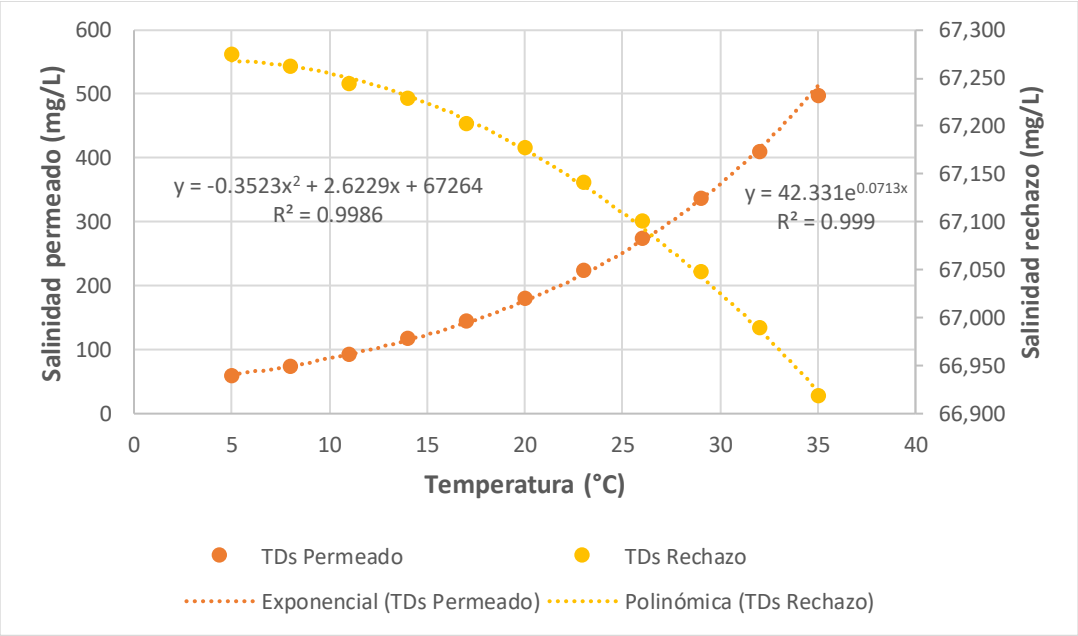

Figura 16. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la cantidad de sólidos disueltos en el permeado y en el rechazo.

En la figura 16 se aprecia que el aumento de temperatura supone un aumento exponencial de la concentración de solutos en el permeado y la reducción correspondiente en el rechazo. Esto se debe a que las membranas tienden a ser menos efectivas en el rechazo de solutos a temperaturas más altas. Esto es especialmente relevante en cuanto al boro ya que las membranas de poliamida rechazan de forma menos efectiva este elemento.

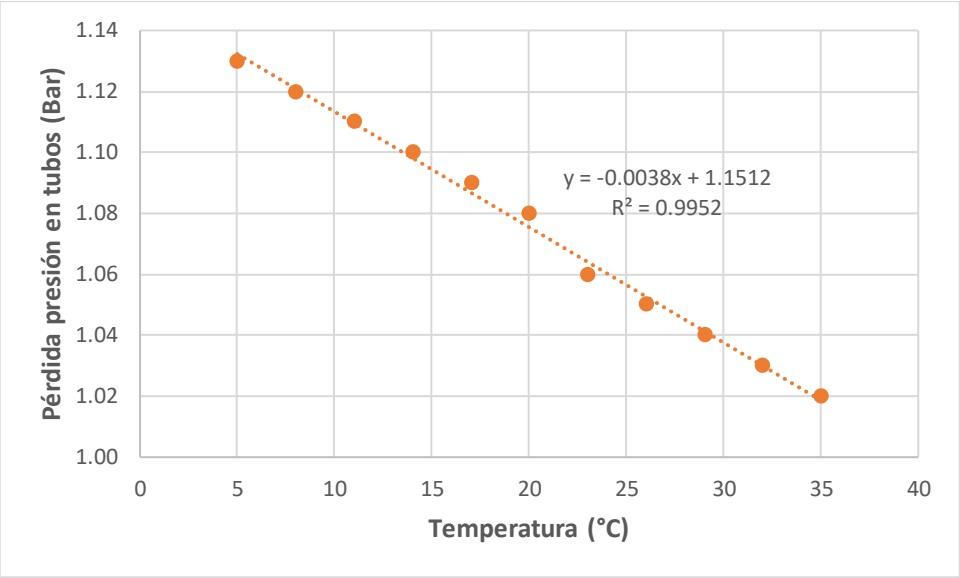

Figura 17. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en la caída de presión del rechazo.

Analizando la figura 17 se observa una tendencia lineal descendiente de la pérdida de presión en los tubos con el aumento de la temperatura. Esto se debe a la reducción de la viscosidad del agua. Dado que es un tubo, la caída de la presión viene afectada por la viscosidad del fluido que lo atraviesa.

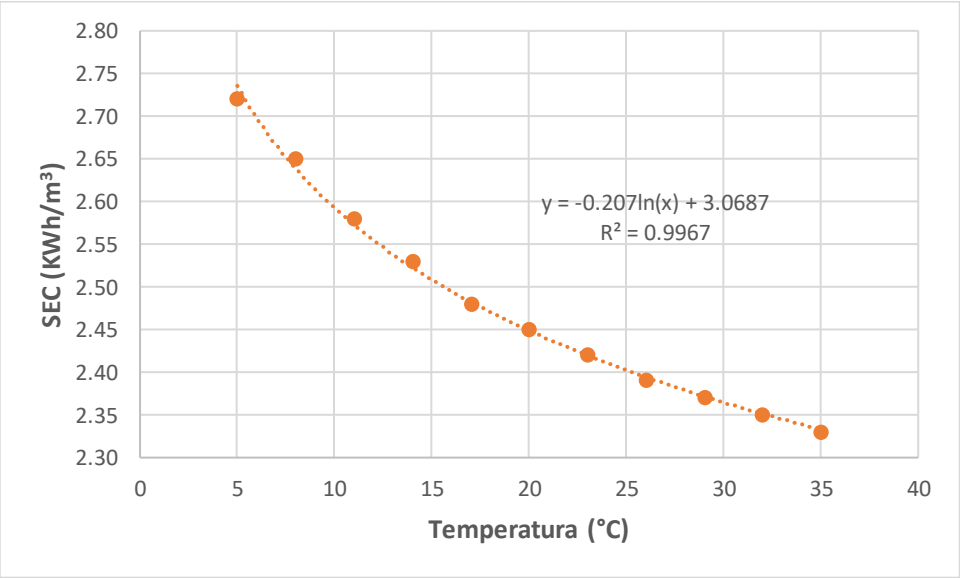

Figura 18. Efecto de la temperatura del agua de alimentación en el SEC.

El coste de operación estimado se ve reflejado en la figura 18. Se puede apreciar la tendencia logarítmica negativa respecto de la temperatura. Su tendencia es similar a la

presión de operación ya que el bombeo del agua a elevadas presiones es el coste más significativo de una planta de ósmosis.

3.2.2. Impacto del pH del agua de alimentación

Se evaluó el efecto del **pH del agua de alimentación** variando este parámetro dentro de un rango operacional, de 6 a 8,8. Los resultados mostraron lo siguiente:

Ni la presión ni el SEC ni la caída de presión de la salmuera sufrieron variaciones significativas a causa de la variación del pH.

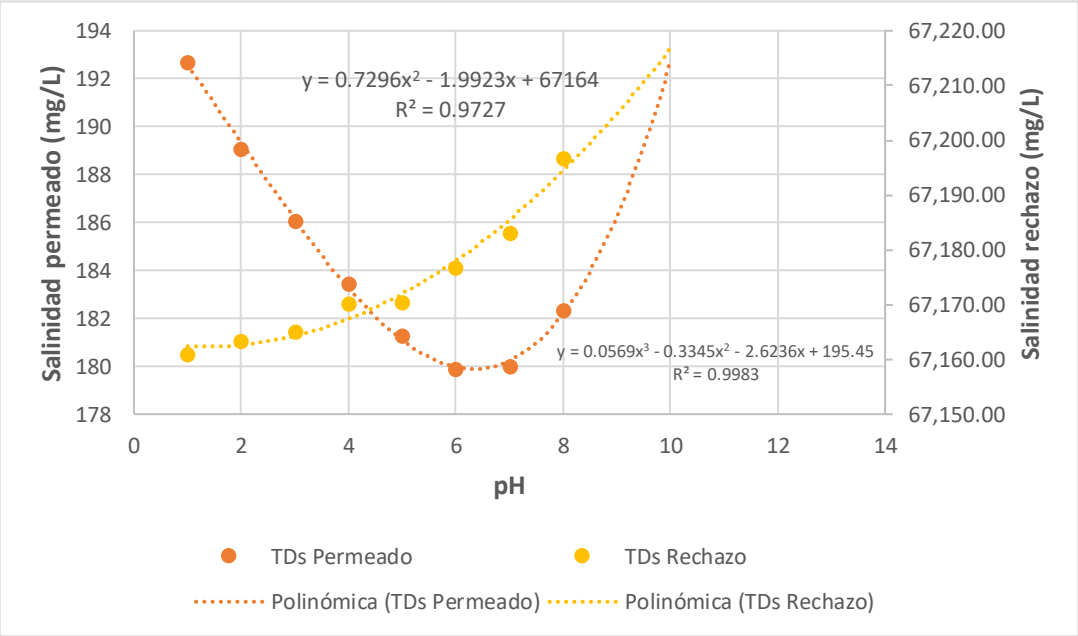

Figura 19. Efecto del pH del agua de alimentación en la cantidad de sólidos disueltos en el permeado y en el rechazo.

No obstante, cabe destacar la pequeña variación percibida en la concentración de la salmuera. Pese a no ser un cambio muy grande, la cantidad de sólidos disueltos en la salmuera aumenta. Esto se debe al equilibrio que tiene el CO_2 de la atmosfera con el agua.

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H^+ \qquad \text{(EC 52)}$$

A pH bajo, el CO_2 se encuentra en forma de gas disuelto, no sumando así salinidad al agua. A medida que aumenta el pH, el equilibrio se desplaza a la formación de carbonato. Lo que aumenta la dureza del agua y, por tanto, su salinidad.

También se puede apreciar un mínimo en la concentración de sales del permeado entorno a 6,5. Esto se debe a la mayor eficacia de eliminar ciertas formas iónicas.

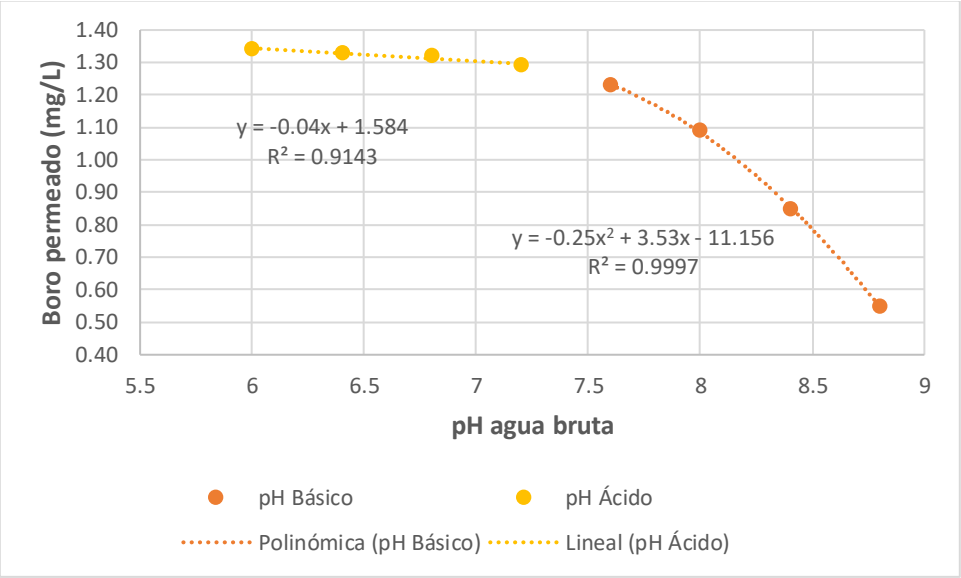

Figura 20. Efecto del pH del agua de alimentación en la cantidad de boro disuelto en el permeado.

Al analizar el comportamiento del rechazo del boro, se pueden distinguir dos situaciones de forma clara, tal como se observa en la figura 20. A pH ácido, la permeabilidad del boro es relativamente elevada en comparación con el resto de las sales. Sin embargo, al entrar en la zona alcalina del pH se aprecia una notable reducción del paso de boro. La explicación a esto reside en la forma en la que se encuentra el boro a diferentes pH.

$$B(OH)_3 + H_2O \rightleftharpoons B(OH)_4^- + H^+ \qquad \text{(EC 53)}$$

Al encontrarse en forma de ácido bórico, no tiene carga y por tanto, las membranas, que están diseñadas para eliminar iones cargados mediante repulsión electroestática, tienen dificultades para evitar su flujo. Por otro lado, al encontrarse en pH básico, el boro se encuentra en forma de ion borato. Este si contiene una carga y es repelido con mayor facilidad por las membranas. Por lo tanto, si el nivel de boro en el agua de regadío a emplear es muy limitante, se podría alcalinizar ligeramente el agua a tratar.

4. Conclusiones

El diseño de una planta de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar con fines agrícolas ha requerido un análisis exhaustivo de las diferentes configuraciones posibles, los materiales y los componentes. En este proceso, el uso del simulador Q+ de LG ha demostrado ser una herramienta clave, no solo para seleccionar la mejor configuración de membranas y componentes, sino también para optimizar el diseño en función de las variables operativas.

El simulador ha permitido seleccionar la mejor configuración posible garantizando que el diseño final haya sido no solo técnicamente viable, sino también eficiente desde el punto de vista energético. A partir de esa configuración se han dimensionado los componentes de la planta, incluyendo las membranas, las bombas y los sistemas de filtración. Gracias a las simulaciones realizadas, se ha podido identificar la tasa de recuperación óptima, así como la combinación de membranas más adecuada para mantener la calidad del agua permeada y minimizar el consumo energético.

La planta tendrá la capacidad de producir 500 m^3/h de agua apta para riego a partir de agua de mar procedente de pozo costero, y operará con una tasa de recuperación del 45%, lo que permitirá maximizar el aprovechamiento del agua de entrada con un consumo energético optimizado. La presión de operación se ha establecido en 56 bar, lo que asegura el adecuado funcionamiento del sistema sin comprometer la durabilidad de las membranas. Además, el diseño incorpora sistemas de pretratamiento mediante filtración con lechos de arena y antracita, así como microfiltración, para proteger las membranas de partículas en suspensión y asegurar una operación estable. También se incorpora un recuperador de energía para mejorar el consumo energético de la planta.

Además, el simulador ha sido fundamental para estudiar el impacto de variables operativas como la temperatura y el pH del agua de alimentación, lo que ha facilitado la anticipación de posibles problemas operativos. En particular, se ha observado que una mayor temperatura conlleva un menor coste de operación, pero a costa de una mayor concentración de sólidos disueltos en el permeado, mientras que un mayor pH reduce el nivel de boro en el permeado, un elemento a tener en cuenta en la calidad del agua para regadío.

Conclusions

The design of a reverse osmosis plant for seawater desalination for agricultural purposes has required a thorough analysis of the different possible configurations, materials, and components. In this process, the use of the Q+ simulator from LG has proven to be a key tool, not only for selecting the best configuration of membranes and components but also for optimizing the design based on operational variables.

The simulator has made it possible to select the best configuration, ensuring that the final design is not only technically feasible but also energy efficient. Based on this configuration, the plant's components have been sized, including membranes, pumps, and filtration systems. Thanks to the simulations carried out, the optimal recovery rate has been identified, as well as the most suitable membrane combination to maintain permeated water quality and minimize energy consumption.

The plant will have the capacity to produce 500 m^3/h of irrigation-suitable water from seawater sourced from a coastal well, and will operate with a recovery rate of 45%, allowing for maximum utilization of the feedwater with optimized energy consumption. The operating pressure has been set at 56 bar, ensuring the system functions properly without compromising membrane durability. In addition, the design incorporates pretreatment systems using sand and anthracite beds, as well as microfiltration, to protect the membranes from suspended particles and ensure stable operation. An energy recovery system is also included to improve the plant's energy consumption.

Moreover, the simulator has been essential in studying the impact of operational variables such as feedwater temperature and pH, facilitating the anticipation of potential operational issues. It was observed that higher temperatures lead to lower operating costs, but at the expense of a higher concentration of dissolved solids in the permeate, while a higher pH reduces the level of boron in the permeate, a key element in determining water quality for irrigation.

5. Bibliografía

Antony, A., Low, J.H., Gray, S., Childress, A.E., Le-Clech, P., Leslie, G. (2011). "Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review", Journal of Membrane Science, Vol. 383, pp. 1–16, doi: 10.1016/j.memsci.2011.08.054.

Baker, R.W. (2023). "Membrane technology and applications". Fourth edition. Hoboken, NJ: Wiley.

Bitaw, T., Park, K., Kim, J., Chang, J. (2019). "Low-recovery,-energy-consumption,-emission hybrid systems of seawater desalination: Energy optimization and cost analysis", Desalination, Vol 468, doi: 10.1016/j.desal.2019.114085

Bresler, E., McNeal, B., Carter, D. (2012). "Saline and sodic soils: principles-dynamics-modeling". First edition. New York: Springer Science & Business Media.

Cath, T., Childress, A., Elimelech, M. (2006). "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments", Journal of Membrane Science, Vol. 281, pp. 70–87, doi: 10.1016/j.memsci.2006.05.048

Elimelech, M, Phillip, W. A. (2011). "The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment", Science, Vol. 333, no 6043, p. 712-717, doi: 10.1126/science.1200488

FAO. (2021). Water for Sustainable Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Feng, X., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I. (2013). "Changes in rainfall seasonality in the tropics", Nature Climate Change, Vol. 3, no 9, p. 811-815, doi: 10.1038/nclimate1907

Fereres, E., Soriano, M. A. (2007). "Deficit irrigation for reducing agricultural water use", Journal of Experimental Botany, Vol. 58, no 2, p. 147-159, doi: 10.1093/jxb/erl165

Foley, J.A. *et al.* (2011). "Solutions for a cultivated planet", Nature, Vol. 478, no 7369, p. 337-342, doi: 10.1038/nature10452

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T. (2007). "State-of-the-art of reverse osmosis desalination", Desalination, Vol. 216, no 1-3, p. 1-76, doi: 10.1016/j.desal.2006.12.009

Gleick, P.H. (1996). “Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs”, Water International, Vol. 21, no 2, p. 83-92, doi: 10.1080/02508069608686494

Gleick, P.H. (2019). “Water as a weapon and casualty of armed conflict: A review of recent water-related violence in Iraq, Syria, and Yemen”, Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, Vol. 6, no 4, p. e1351, doi: doi.org/10.1002/wat2.1351

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., Moulin, P. (2009). “Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges”, Water Research, Vol. 43, no 9, p. 2317-2348, doi: 10.1016/j.watres.2009.03.010

Haines, T.H. (1994). “Water transport across biological membranes”, FEBS letters, Vol. 346, no 1, p. 115-122, doi: 10.1016/0014-5793(94)00470-6

Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M. (2012). “The water footprint of humanity”, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 109, no 9, p. 3232-3237, doi: 10.1073/pnas.1109936109

Hunter, P.R., Macdonald, A.M., Carter, R.C. (2010). “Water supply and health”, PLoS Medicine, 2010, Vol. 7, no 11, doi: 10.1371/journal.pmed.1000361

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kim, Y., Kim, Y., Ihm S., Ihm S., Woo S. (2018). “Energy efficiency improvement of Gijang SWRO plant in Busan, Korea”, Desalination and Water Treatment, Vol. 112, p. 258-277.

Kleinzeller, A. (1999). “Charles Ernest Overton's concept of a cell membrane”, Current Topics in Membranes. Academic Press, Vol 48, p. 1-22, doi: 10.1016/S0070-2161(08)61039-4

Lee, K.P., Arnot, T.C.; Mattia, D. (2011). “A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential”, Journal of Membrane Science, Vol. 370, no 1-2, p. 1-22, doi: 10.1016/j.memsci.2010.12.036

LG, (2024). Catálogo Comercial LG 2023-2024.

Loeb, S., Sourirajan, S. (1962). “Sea water demineralization by means of an osmotic membrane”, Saline Water Conversion-II. Washington: ACS, p 117-132.

Luftig, B. (1971). “New Selective Membranes”. Polytechnic Institute of Brooklyn.

Matin, A., Khan, Z., Zaidi, S.M.J., Boyce, M.C. (2011). “Biofouling in reverse osmosis membranes for seawater desalination: phenomena and prevention”, Desalination, Vol. 281, p. 1-16, doi: 10.1016/j.desal.2011.06.063

McCutcheon, J.R., Elimelech, M. (2006). “Influence of concentrative and dilutive internal concentration polarization on flux behavior in forward osmosis”. Journal of Membrane Science, Vol. 284, no 1-2, p. 237-247, doi: 10.1016/j.memsci.2006.07.049

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2011). “The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products”. Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 15, no 5, p. 1577-1600, doi: 10.5194/hess-15-1577-2011

Mulder, M. (2012). “Basic principles of membrane technology”, Second edition, Enschede: Kluwer.

Park, K., Kim, J., Yang, D.R., Hong, S. (2020). “Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions”, Journal of Membrane Science, 2020, Vol. 595, doi: 10.1016/j.memsci.2019.117607

Pentair (2023). Catálogo Comercial Pentair 2022-2023.

Pfister, S., Koehler, A., Hellweg, S. (2009). “Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA”, Environmental Science & Technology, Vol. 43, no 11, p. 98-104, doi: 10.1021/es802423e

Qadir, M., Boers, Th.M., Schubert, S., Ghafoor, A., Murtaza, G. (2003). “Agricultural water management in water-starved countries: challenges and opportunities”, Agricultural Water Management, Vol. 62, no 3, p. 165-185, doi: 10.1016/S0378-3774(03)00146-X

Shannon, M., Bohn, P., Elimelech, M., Nature, J.G. (2008). “Science and technology for water purification in the coming decades”, Nature, Vol. 452, no 7185, p. 301-310, doi: doi.org/10.1038/nature06599

Stover, R.L. (2007). “Seawater reverse osmosis with isobaric energy recovery devices”, Desalination, Vol. 203, p. 168-175, doi: 10.1016/j.desal.2006.03.528

Subramani, A., Jacangelo, J.G. (2015). “Emerging desalination technologies for water treatment: a critical review”, Water Research, Vol. 75, p. 164-187, doi: 10.1016/j.watres.2015.02.032

UN-Water. (2021). Summary Progress Update 2021: SDG 6 – Water and sanitation for all.

Voutchkov, N. (2018). “Energy use for membrane seawater desalination–current status and trends”, Desalination, Vol. 431, p. 2-14, doi 10.1016/j.desal.2017.10.033

Voutchkov, N. (2019). “Desalination engineering planning and design”, Boca Raton: McGrawHill

Werber, J.R., Osuji, C.O., Elimelech, M. (2016). “Materials for next-generation desalination and water purification membranes”. Nature Reviews Materials, Vol. 1, no 5, p. 1-15, doi: 10.1038/natrevmats.2016.18