



**Universidad  
Europea**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID  
ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO  
ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**GRADO EN INGENIERÍA  
EN SISTEMAS INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO  
PRODUCCIÓN DE AGUA REGENERADA DE  
BAJA CONDUCTIVIDAD PROCEDENTE DE  
SECUNDARIO DE EDAR MEDIANTE  
ÓSMOSIS INVERSA REVERSIBLE**

**Alumno: D. ALEJANDRO RODRÍGUEZ CRUCES**

**Director: D. DIEGO ORTEGA SANZ**

**JUNIO 2025**

**TÍTULO:** PRODUCCIÓN DE AGUA REGENERADA DE BAJA CONDUCTIVIDAD  
PROCEDENTE DE SECUNDARIO DE EDAR MEDIANTE ÓSMOSIS INVERSA  
REVERSIBLE

**AUTOR:** D. ALEJANDRO RODRÍGUEZ CRUCES

**DIRECTOR DEL PROYECTO:** D. DIEGO ORTEGA SANZ

**FECHA:** 8 de JUNIO de 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a D. Diego Ortega Sanz, director de este Trabajo de Fin de Grado, por su dedicación, disponibilidad y valiosa orientación técnica a lo largo de todo el proceso de desarrollo del proyecto.

Asimismo, quiero agradecer a la empresa Integra Tecnología del Agua, y en particular a la dirección y su equipo técnico, por brindarme la oportunidad de colaborar con ellos durante el verano de 2024. Su compromiso con la innovación en el tratamiento de aguas, así como el acceso facilitado a documentación técnica de alto valor, han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

## RESUMEN

La creciente escasez de recursos hídricos en Andalucía ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras para la reutilización de aguas residuales. Este trabajo se centra en la producción de agua regenerada de baja conductividad a partir del efluente secundario de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) mediante la aplicación de la ósmosis inversa de flujo reversible (OIR). Esta tecnología emergente ofrece una alternativa eficiente a los sistemas convencionales de ultrafiltración, reduciendo significativamente el ensuciamiento prematuro de las membranas y optimizando el consumo energético.

Se analizan los parámetros operativos óptimos y la calidad del agua obtenida, cumpliendo con las normativas vigentes que exigen el uso de agua regenerada para riego agrícola. A pesar de que las recientes lluvias han incrementado el nivel de los embalses andaluces hasta un 45,88% de su capacidad total, es imprescindible no depender exclusivamente de los recursos naturales y avanzar en infraestructuras hídricas sostenibles.

La implementación de sistemas de OIR en las EDAR se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), contribuyendo a la resiliencia hídrica de la región. Este trabajo evalúa la viabilidad técnica, económica y normativa de esta tecnología para asegurar la disponibilidad de agua de calidad en un contexto de cambio climático y creciente presión sobre los recursos hídricos.

**Palabras clave:** ósmosis inversa reversible, agua regenerada, conductividad, economía circular, sostenibilidad, ODS.

## ABSTRACT

The growing scarcity of water resources in Andalusia has driven the search for innovative solutions for wastewater reuse. This study focuses on the production of low conductivity reclaimed water from the secondary effluent of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) through the application of Reversible Flow Reverse Osmosis (RFRO). This emerging technology offers an efficient alternative to conventional ultrafiltration systems by significantly reducing premature membrane fouling and optimizing energy consumption.

The optimal operating parameters and the quality of the treated water are analyzed, ensuring compliance with current regulations that mandate the use of reclaimed water for agricultural irrigation. Although recent rains have increased the levels of Andalusian reservoirs to 45.88% of their total capacity, it is essential not to rely exclusively on natural resources and to invest in sustainable water infrastructures.

The implementation of RFRO systems in WWTPs aligns with several Sustainable Development Goals (SDGs), contributing to the region's water resilience. This paper evaluates the technical, economic, and regulatory feasibility of this technology to ensure the availability of high-quality water in the context of climate change and growing pressure on water resources.

**Key words:** reversible flow reverse osmosis, reclaimed water, conductivity, circular economy, sustainability, SDGs.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL PROYECTO.....</b>	<b>10</b>
1.1 OBJETO DEL PROYECTO .....	10
1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN PERSONAL .....	10
1.3 CONTEXTO DE LA SEQUÍA EN ANDALUCÍA .....	11
1.4 IMPORTANCIA DEL AGUA REGENERADA EN EL RIEGO.....	12
<b>Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>14</b>
2.1 CONDUCTIVIDAD Y SU IMPACTO EN EL RIEGO .....	14
2.2 EL PROBLEMA DE TRATAR CON MEMBRANAS AGUA PROCEDENTE DE SECUNDARIO DE EDAR.....	15
2.3 MARCO NORMATIVO.....	17
2.4 RETOS Y OPORTUNIDADES.....	19
<b>Capítulo 3. MEMORIA TÉCNICA .....</b>	<b>20</b>
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA .....	21
3.2 MEJORAS Y DIFERENCIAS ENTRE ÓSMOSIS INVERSA TRADICIONAL Y ÓSMOSIS INVERSA REVERSIBLE .....	23
3.3 USO Y APLICACIÓN.....	27
3.4 DISEÑO .....	27
3.5 LÍNEA DE TRATAMIENTO.....	27
3.6 DATOS OPERATIVOS.....	29
3.7 DATOS DE DISEÑO.....	30
3.8 ESPECIFICACIONES DEL SUMINISTRO .....	32
3.9 PESOS DE LOS COMPONENTES.....	48
3.10 COSTES OPERATIVOS.....	49
3.11 GARANTÍA DE FUNCIONAMIENTO .....	51

3.12	PRESUPUESTO .....	52
3.13	LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES.....	54
3.14	IMPACTO EN LA ECONOMÍA CIRCULAR .....	54
3.15	VENTAJAS ECONÓMICA A LARGO PLAZO .....	54
<b>Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>56</b>
4.1	RESULTADOS TÉCNICOS.....	56
4.2	RESULTADOS ECONÓMICOS .....	56
4.3	RESULTADOS AMBIENTALES .....	57
4.4	DISCUSIÓN CRÍTICA.....	58
<b>Capítulo 5. CONCLUSIONES .....</b>		<b>59</b>
5.1	IMPACTO TÉCNICO.....	59
5.2	IMPACTO ECONÓMICO .....	59
5.3	IMPACTO AMBIENTAL .....	60
5.4	LIMITACIONES Y DESAFÍOS .....	60
5.5	CONCLUSIÓN GENERAL.....	61
<b>Capítulo 6. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN ...</b>		<b>62</b>
6.1	RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA OIR.....	62
6.2	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	63
<b>Capítulo 7. ANEXOS .....</b>		<b>65</b>
7.1	ESQUEMA DE LOS EQUIPOS (VISTA 2D) .....	65
7.2	ESQUEMA DE LOS EQUIPOS (VISTA 3D) .....	66
<b>Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>67</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Volumen de los embalses y la precipitación en la provincia de Málaga. ....	11
Figura 1-2. Cultivos leñosos de regadío vs precipitación en la provincia de Málaga. ....	12
Figura 1-3 Consumo de agua por kg de fruto en cultivos de la Axarquía (Málaga). ....	13
Figura 4-1. Planta de Ósmosis Inversa Reversible. ....	21
Figura 4-2. Diferencia de presiones de trabajo: OIR vs OI convencional. ....	25
Figura 4-3. Esquema de los componentes de una planta de OIR. ....	29
Figura 4-4. Diagrama de flujo.....	31
Figura 4-5. Sistema dosificador de cloro. ....	33
Figura 4-6. Sistema dosificador de floculante. ....	34
Figura 4-7. Sistema dosificador de antiincrustante.....	35
Figura 4-8. Filtro por mallas autolimpiantes. ....	36
Figura 4-9. Filtro multicapa. ....	37
Figura 4-10. Filtros de seguridad. ....	38
Figura 4-11. Sistema de dosificación de metabisulfito.....	39
Figura 4-12. Esterilizador por rayos ultravioletas. ....	40
Figura 4-13. Especificaciones técnicas de la esterilización por rayos ultravioletas. ....	40
Figura 4-14. Sistema de bombeo de alta presión. ....	41
Figura 4-15. Caja contenedora de alta presión para membranas. ....	42
Figura 4-16. Membrana de ósmosis inversa reversible. ....	43
Figura 4-17. Pantalla táctil del cuadro de control. ....	46
Figura 8-1. Esquema 2D de los equipos. ....	65
Figura 8-2 Esquema 3D de los equipos. ....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Características medias del agua residual urbana española. ....	15
Tabla 2-2 Requisitos de los vertidos de aguas residuales. ....	15
Tabla 2-3. Ósmosis natural. ....	16
Tabla 2-4. Ósmosis inversa. ....	16
Tabla 4-1. Datos operativos del agua bruta a tratar procedente del secundario. ....	29
Tabla 4-2. Caudales y Conductividades de los distintos tipos de agua. ....	30
Tabla 4-3. Datos de diseño. ....	31
Tabla 4-4. Especificaciones técnicas del grupo de alimentación a baja presión. ....	32
Tabla 4-5. Especificaciones técnicas del clorador. ....	33
Tabla 4-6. Especificaciones técnicas del dosificador de floculante. ....	34
Tabla 4-7. Especificaciones técnicas del dosificador de antiincrustante. ....	35
Tabla 4-8. Especificaciones técnicas del filtrado por mallas autolimpiantes. ....	36
Tabla 4-9. Especificaciones técnicas del filtrado multicapa. ....	37
Tabla 4-10. Especificaciones técnicas filtrado de seguridad de 5 micras. ....	38
Tabla 4-11. Especificaciones técnicas filtrado de seguridad de 1 micras. ....	38
Tabla 4-12. Especificaciones técnicas de la dosificación de metabisulfito. ....	39
Tabla 4-13. Especificaciones técnicas del bombeo de alta presión. ....	42
Tabla 4-14. Especificaciones técnicas de las cajas contenedoras para membranas. ....	42
Tabla 4-15. Especificaciones técnicas del sistema de antiensuciamiento de membranas. ....	43
Tabla 4-16. Especificaciones técnicas de las membranas de ósmosis inversa reversible. ....	44
Tabla 4-17. Características técnicas del cuadro de control electrónico. ....	46
Tabla 4-18. Características técnicas del cuadro de control de componentes hidráulicos. ....	47
Tabla 4-19. Características técnicas del sistema de lavado. ....	48
Tabla 4-20. Peso de componentes. ....	48

Tabla 4-21. Coste mensual del consumo eléctrico. ....	49
Tabla 4-22. Coste mensual del antiincrustante. ....	49
Tabla 4-23. Coste mensual del metabisulfito.....	49
Tabla 4-24. Coste de los filtros de seguridad prorrateado mensualmente.....	50
Tabla 4-25. Coste de las membranas prorrateado mensualmente.....	50
Tabla 4-26. Coste total mensual y por m <sup>3</sup> de agua regenerada producida.....	50
Tabla 4-27. Presupuesto del proyecto de ingeniería, fabricación, suministro y servicios técnicos de la planta MA-6000-RS.....	52

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL PROYECTO

La escasez hídrica representa uno de los principales desafíos a los que se enfrenta Andalucía en el contexto del cambio climático y la creciente presión sobre los recursos naturales. En este escenario, la reutilización de aguas residuales mediante tecnologías avanzadas se presenta como una solución clave para garantizar el suministro sostenible de agua, especialmente en sectores estratégicos como la agricultura y el turismo. Este Trabajo Fin de Grado analiza la aplicación de un sistema de ósmosis inversa de flujo reversible (OIR) para la producción de agua regenerada de baja conductividad, evaluando su viabilidad técnica, normativa y económica. A continuación, se expone el objeto del proyecto y la motivación que ha llevado a su desarrollo.

## 1.1 OBJETO DEL PROYECTO

El objeto de este Trabajo Fin de Grado es el estudio y análisis de la viabilidad de la ósmosis inversa de flujo reversible (OIR) como tecnología para la producción de agua regenerada de baja conductividad a partir del efluente secundario de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). El proyecto se centra en la caracterización técnica, económica y normativa de esta solución innovadora, con el objetivo de determinar su idoneidad para su aplicación en el riego de cultivos sensibles a la salinidad y en espacios verdes de uso recreativo, especialmente en contextos de escasez hídrica como el andaluz.

La propuesta incluye una descripción detallada de la tecnología, su diseño operativo, sus ventajas respecto a sistemas convencionales de tratamiento, y su alineación con la normativa vigente y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Asimismo, se examinan los resultados obtenidos en una planta de referencia, a fin de ofrecer una aproximación realista al potencial de implementación de esta tecnología en Andalucía

## 1.2 JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN PERSONAL

Durante el verano de 2024, tuve la oportunidad de colaborar con la empresa malagueña Integra Tecnología del Agua, especializada en la implementación de soluciones avanzadas para el tratamiento de aguas regeneradas. Esta experiencia me permitió conocer de primera mano diversos sistemas innovadores, entre ellos la bioaumentación en redes de saneamiento y, de forma destacada, la ósmosis inversa reversible (OIR), desarrollada en colaboración con la empresa mallorquina Magic Boats.

Uno de los hitos que despertó mi interés en esta tecnología fue el éxito operativo de una planta de OIR en el campo de golf T-Golf en Palma de Mallorca, donde lleva funcionando más de cinco años sin necesidad de pretratamientos con ultrafiltración ni limpiezas químicas frecuentes. Además, el reconocimiento recibido por Integra en el evento *Greencities & Smart-Moving* Málaga 2024, con el premio *Startup Europe Awards* (@CEM, 2025, 25 de septiembre), reforzó mi motivación por investigar soluciones reales a los problemas de gestión hídrica que afectan a Andalucía.

La combinación entre mi implicación directa en este entorno profesional, el valor técnico del sistema OIR y la necesidad urgente de soluciones sostenibles en nuestra región me llevó a elegir este tema como objeto de mi Trabajo de Fin de Grado. Considero que este proyecto no solo tiene un interés académico, sino también una aplicación práctica con alto impacto en el contexto actual.

### 1.3 CONTEXTO DE LA SEQUÍA EN ANDALUCÍA

Andalucía ha sufrido en los últimos años una crisis hídrica estructural, causada por la combinación de precipitaciones irregulares, aumento de la demanda y el impacto del cambio climático. Como consecuencia, los embalses han experimentado niveles históricamente bajos, generando incertidumbre sobre la disponibilidad de agua para abastecimiento y riego agrícola.

No obstante, en el primer trimestre de 2025, una serie de borrascas han elevado la reserva hídrica de la comunidad hasta el 45,88% de su capacidad total, según los últimos datos oficiales (Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía, 2025). Aunque este incremento ha proporcionado un alivio momentáneo, la recuperación de los embalses no debe condicionar la planificación de infraestructuras hídricas sostenibles, ya que la variabilidad climática hace imprescindible contar con sistemas de reutilización de agua que garanticen el suministro en el largo plazo.

En la Figura 1-1 (Ruiz Sinoga, 2024) se puede observar los ciclos de pluviometría/sequía y su correlación con los volúmenes de los embalses en la provincia de Málaga, tomando como 100% los datos de 1998.

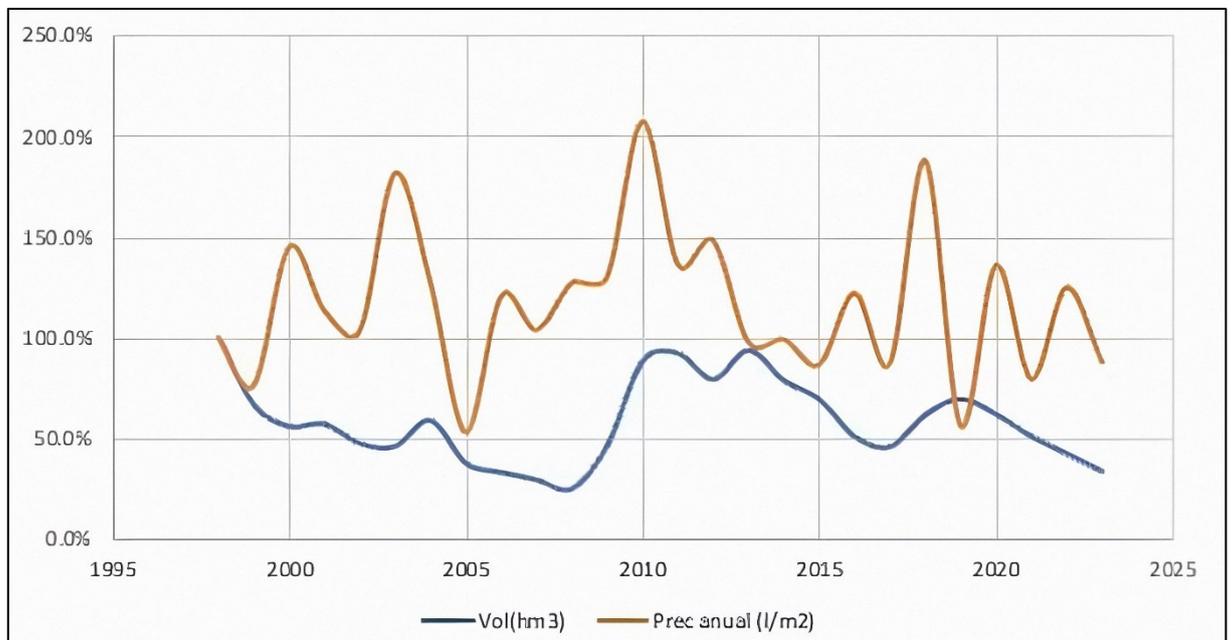


Figura 1-1. Volumen de los embalses y la precipitación en la provincia de Málaga.

Los sectores más afectados son la agricultura y el turismo, motores económicos esenciales en Andalucía (Directiva Marco del Agua, 2000). Por un lado, cultivos clave como el olivar han visto reducida su productividad, mientras que la expansión de otros cultivos de alta demanda

hídrica, como el aguacate y el mango, ha añadido presión sobre los recursos hídricos limitados. La situación se complica en las zonas costeras debido a la intrusión marina en los acuíferos, lo que incrementa la salinidad del agua subterránea y afecta su calidad para riego.

Esto se puede observar en la Figura 1-2 (Ruiz Sinoga, 2024), sobre la variabilidad de los cultivos leñosos de regadío en la provincia de Málaga, donde se ve como a partir de 2014 se inicia un crecimiento importante de los frutales, a partir de 2017 del mango y a partir de 2018 del aguacate, paradójicamente cuando se observa un descendimiento de la precipitación anual a partir de 2010, que es cuando se toma como referencia el 100%.

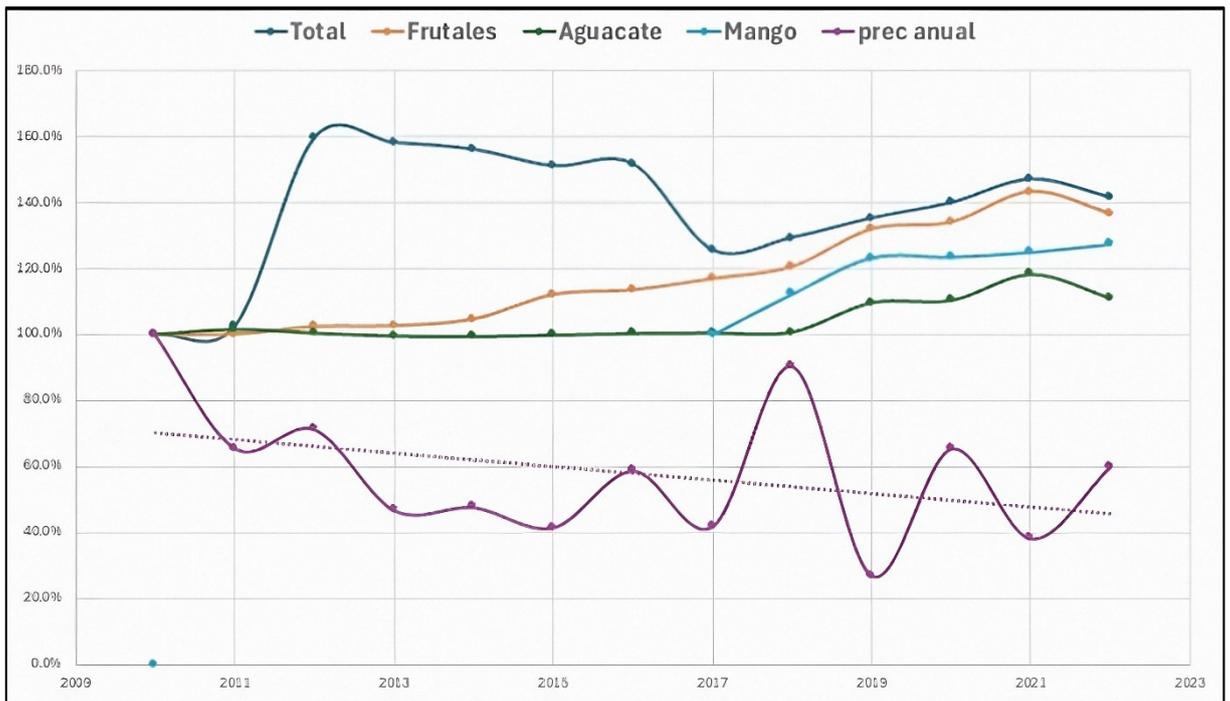


Figura 1-2. Cultivos leñosos de regadío vs precipitación en la provincia de Málaga.

El diseño de estrategias de gestión hídrica debe ser anticipativo y no reactivo. Al igual que no se construyen hospitales cuando ya ha comenzado una pandemia, sino antes, las infraestructuras de reutilización de agua deben implementarse antes de que las reservas sean insuficientes (Reglamento (UE) 2020/741; Real Decreto 1085/2024). En este sentido, el desarrollo de infraestructuras para el tratamiento y regeneración de agua es una pieza clave para fortalecer la resiliencia hídrica de Andalucía.

#### 1.4 IMPORTANCIA DEL AGUA REGENERADA EN EL RIEGO

En este escenario, la reutilización de agua residual tratada se perfila como una solución clave para mitigar el impacto de la sequía en sectores estratégicos como la agricultura y el mantenimiento de espacios verdes, dado el alto consumo de agua que necesitan. La regeneración de aguas residuales permite liberar recursos de mayor calidad para consumo humano, reduciendo la presión sobre los embalses y acuíferos (Ruiz Sinoga, 2024).

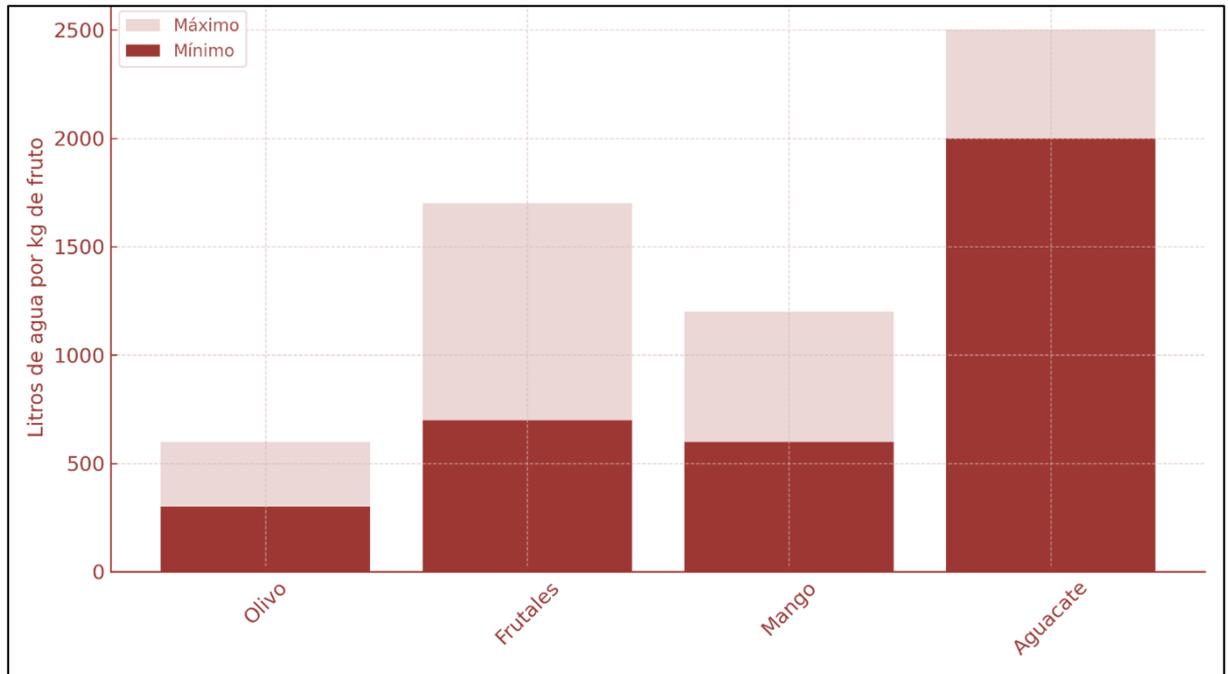


Figura 1-3 Consumo de agua por kg de fruto en cultivos de la Axarquía (Málaga).  
Elaboración propia.

Sin embargo, uno de los principales desafíos es la alta conductividad del agua regenerada, que puede afectar la fertilidad del suelo y la productividad de cultivos sensibles a la salinidad, como el aguacate y el mango. Además, en regiones costeras como la Axarquía y la Costa del Sol, la intrusión salina agrava esta problemática (Medina San Juan, 1999), lo que hace imprescindible el uso de agua de baja conductividad para riego.

La tecnología de ósmosis inversa reversible ofrece una solución avanzada para la producción de agua regenerada de calidad óptima. Su diseño minimiza el ensuciamiento de las membranas, reduce el consumo energético y elimina la necesidad de pretratamientos costosos, mejorando la eficiencia del proceso.

Adicionalmente, la reutilización de aguas regeneradas se alinea con los principios de la economía circular, promoviendo un uso eficiente del agua y reduciendo los desechos. Este enfoque no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también tiene implicaciones económicas significativas, como la reducción de costes asociados al uso de agua de calidad potable para riego y la menor necesidad de fertilizantes químicos (Rodríguez-Bada, 2023).

En definitiva, a pesar del alivio temporal que han supuesto las recientes lluvias, la inversión en infraestructuras de reutilización de agua sigue siendo una necesidad urgente. El uso de agua regenerada no solo aborda la crisis hídrica actual, sino que también constituye una estrategia clave para garantizar la resiliencia hídrica en Andalucía, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con el agua limpia, la energía sostenible y la producción responsable. Este trabajo se centra en analizar la viabilidad técnica, normativa y económica de la ósmosis inversa reversible como tecnología avanzada para la reutilización de aguas residuales en contextos de escasez hídrica.

## Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

La gestión eficiente del agua regenerada se ha convertido en un eje estratégico para afrontar los efectos del cambio climático, la presión sobre los recursos naturales y la creciente demanda hídrica de sectores como la agricultura y el mantenimiento de zonas verdes. En este contexto, diversas tecnologías han sido desarrolladas para mejorar la calidad del agua residual tratada, siendo la ósmosis inversa una de las más extendidas. Sin embargo, la aparición de sistemas más avanzados como la ósmosis inversa reversible (OIR) ha supuesto una evolución significativa en términos de eficiencia energética, durabilidad de membranas y calidad del agua producida.

Este capítulo presenta una revisión de los principales conceptos y antecedentes tecnológicos necesarios para comprender la relevancia y el funcionamiento de la OIR. Se abordan aspectos clave como el impacto de la conductividad del agua en el riego, las diferencias entre la ósmosis inversa tradicional y la reversible. Esta revisión constituye la base teórica sobre la que se sustenta el análisis técnico y práctico desarrollado en los capítulos posteriores.

### 2.1 CONDUCTIVIDAD Y SU IMPACTO EN EL RIEGO

La conductividad eléctrica (CE) del agua es un parámetro fundamental en la agricultura y el mantenimiento de áreas verdes, ya que mide la capacidad del agua para conducir electricidad, lo cual está directamente relacionado con la cantidad de sales disueltas. En el riego agrícola, una alta conductividad puede generar problemas significativos, como la salinización del suelo, la toxicidad de ciertas especies vegetales y la reducción de la productividad de los cultivos.

La salinización del suelo es un problema crítico asociado al uso de agua de alta CE. Cuando las sales disueltas en el agua de riego se acumulan en el suelo, se incrementa la presión osmótica en la zona radicular de las plantas, dificultando la absorción de agua y nutrientes. Esto puede causar deshidratación y estrés hídrico en los cultivos, afectando su desarrollo y rendimiento. Los frutos tropicales, como el aguacate y el mango, son particularmente sensibles a la salinidad, lo que subraya la necesidad de agua de baja conductividad para estos cultivos (Baeza, 2007).

En el caso de los campos de golf, especialmente en los greens, donde el césped requiere condiciones óptimas de crecimiento, el uso de agua de alta conductividad puede ocasionar un deterioro del pasto, con implicaciones económicas y estéticas significativas. Las sales también contribuyen a la formación de costras en el suelo, lo que reduce su capacidad de infiltración y aumenta la evaporación.

Por ello, reducir la conductividad del agua destinada al riego es una prioridad en zonas donde la calidad del agua se ve comprometida, como las áreas costeras afectadas por intrusiones marinas. La ósmosis inversa reversible emerge como una tecnología eficaz para abordar este problema, al permitir la producción de agua regenerada con niveles de conductividad controlados y adecuados para el riego agrícola y recreativo (Rodríguez-Bada, 2024).

## 2.2 EL PROBLEMA DE TRATAR CON MEMBRANAS AGUA PROCEDENTE DE SECUNDARIO DE EDAR

De manera breve, vamos a poner en contexto tanto el agua residual como el procedente de una EDAR como fuente para obtener agua regenerada.

En la Tabla 2-1 (Ramírez et al., 2017) se pueden observar algunos de las características típicas del agua residual urbana en España que tienen relación con su calidad:

Parámetro	Valor
DQO	700 mg/L O <sub>2</sub>
DBO <sub>5</sub>	400 mg/L O <sub>2</sub>
SST	409 mg/L

Tabla 2-1. Características medias del agua residual urbana española.

### Se define:

- La DQO (Demanda Química de Oxígeno) es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica presente en el agua.
- La DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno) es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar (durante cinco días a 20 °C) toda la materia (biodegradable) presente en el agua.
- Los SST (Sólidos Suspendidos Totales) son partículas sólidas que se mantienen suspendidas en el agua, no se sedimentan fácilmente y no son disueltas

El primer paso es depurar esa agua en la EDAR para obtener un agua con las características que indica que es para vertido a cauce público (RD 509/1996):

Parámetro	Valor
DQO	125 mg/L O <sub>2</sub>
DBO <sub>5</sub>	25 mg/L O <sub>2</sub>
Sólidos en suspensión	35 mg/L

Tabla 2-2 Requisitos de los vertidos de aguas residuales.

Como se puede observar, a pesar de ser un agua con una contaminación tal que ya puede ser devuelta a cauce público (mar, río, arroyo, etc.) no es apta para ser convertida directamente por ósmosis inversa en agua regenerada, para ello, necesita pasar por una nueva serie de pasos que se verá más adelante en el Capítulo 3 MEMORIA TÉCNICA.

Pero vamos a indicar en este momento, que el proceso más crucial de la obtención de agua regenerada es la propia ósmosis inversa llevadas a cabo por membranas.

La **ósmosis natural** es un proceso que consiste, partiendo de dos soluciones de diferentes concentraciones separadas por una membrana semipermeable, en el paso de disolvente (no soluto) de la solución más diluida a la más concentrada, para obtener dos soluciones con la misma concentración. Esto es un proceso pasivo, sin consumo de energía, que se detiene cuando se alcanza el equilibrio o presión osmótica (Font et al., 2014).

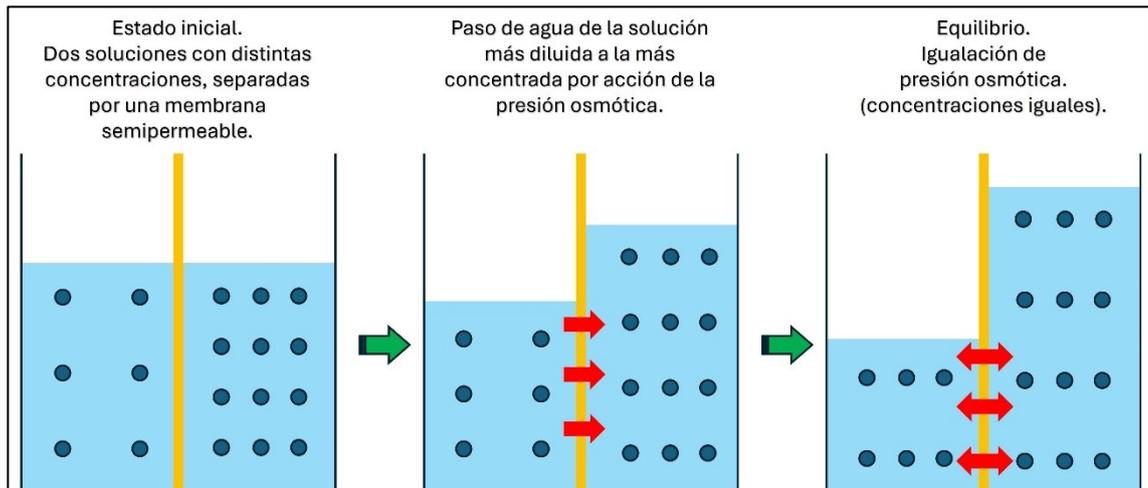


Tabla 2-3. Ósmosis natural.  
Elaboración propia.

Sin embargo, la **ósmosis inversa** es un proceso activo (con consumo de energía) que consiste, partiendo de dos soluciones de diferentes concentraciones separadas por una membrana semipermeable, en el paso de disolvente de la solución más concentrada a la menos concentrada, de tal forma que finalmente obtendremos dos soluciones diferentes: una con muy alta concentración (agua de rechazo) y otra con baja concentración, en nuestro caso agua producto de baja conductividad. La energía que hay que aplicar en la equivalente para vencer la presión osmótica e invertir el flujo (Dupont, 2024).

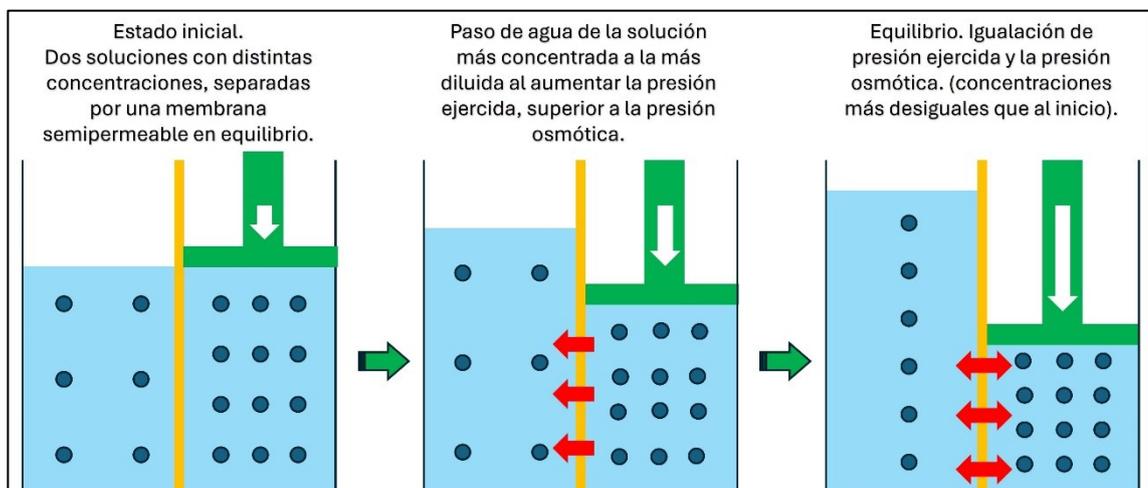


Tabla 2-4. Ósmosis inversa.  
Elaboración propia.

Hay que tener en cuenta que la ósmosis inversa se utiliza para varias aplicaciones. Una de la más conocida es la desalación: obtención de agua potable a partir de agua de mar. En esta caso, nos encontramos con un agua con una altísima conductividad (del orden de 50.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que, en agua residual, la conductividad puede estar entre 2.500-4.500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que es fácilmente suponer que la energía necesaria para vencer la presión es muy inferior en este caso en comparación con la de agua de mar.

Sin embargo, lo que por una lado es una ventaja, en aguas procedente de EDAR nos encontramos que la contaminación orgánica no es igual. Las membranas están formadas por unos microporos del orden de 1 a 10 Angstrom (nivel iónico) que casi sólo permite el paso de agua, por lo que teniendo en cuenta el tipo de agua que sale de una EDAR (ver Tabla 2-1), es lógico pensar que el sistema de ósmosis inversa, antes de llegar el agua a las membranas se necesita de un pretratamiento que impida que los poros se atoren, ya que, si esto ocurriera, se paralizaría el sistema. Hay que tener en cuenta que las membranas son los elementos más caros del sistema y que mejor hay que proteger para que aumente la vida media de ellas.

Una serie de baterías de filtrados de cada vez mayor afinidad se disponen en la línea de agua para, eliminar lo que hasta ahora era una etapa imprescindible: la ultrafiltración previo a la ósmosis inversa. La ultrafiltración está formada por membranas con unos poros de entre 0,01 y 0,1 micras, equivalente a entre 100 y 1.000 Angstrom (Dupont, 2024). Este sistema de ultrafiltración es muy complejo de operar y de mantener estable; por ello, que esta tecnología consiga sustituir la ultrafiltración previa a la ósmosis inversa, es un importante adelanto. De esto trata la ósmosis inversa reversible, de una serie de procesos antes y durante la ósmosis inversa, que hacen innecesaria la ultrafiltración.

## 2.3 MARCO NORMATIVO

La reutilización de aguas regeneradas en España está regulada por un marco normativo avanzado que busca garantizar la seguridad hídrica, la protección del medio ambiente y la promoción de la sostenibilidad. Este capítulo analiza las normativas clave que respaldan el uso de tecnologías como la ósmosis inversa reversible para la producción de agua regenerada.

### 2.3.1 REGLAMENTO DE REUTILIZACIÓN DE AGUAS REGENERADAS

El principal marco normativo para la reutilización de aguas regeneradas en España es el Real Decreto 1085/2024, que actualiza el régimen jurídico establecido por el Real Decreto 1620/2007. Este reglamento tiene como objetivos garantizar la calidad del agua regenerada, fomentar su uso en sectores estratégicos y minimizar los riesgos asociados para la salud y el medio ambiente.

#### 2.3.1.1 *Ámbito de aplicación*

El reglamento define los usos permitidos del agua regenerada, entre los que destacan:

- Riego agrícola y forestal.
- Riego de instalaciones recreativas (campos de golf) y zonas verdes urbanas.

- Usos industriales y ambientales.

Prohíbe expresamente el uso de aguas regeneradas para consumo humano directo y restringe su utilización en ciertas aplicaciones, como el riego de cultivos que se consumen crudos, salvo que se cumplan estrictos estándares de calidad.

### **2.3.1.2 Requisitos de calidad**

El reglamento establece parámetros específicos de calidad según el uso final del agua regenerada. Para el riego agrícola y recreativo, los valores máximos permitidos incluyen:

- Conductividad eléctrica (CE):  $<1.500 \mu\text{S}/\text{cm}$ .
- E. coli:  $\leq 100 \text{ UFC}/100 \text{ ml}$ .
- Nitrógeno total:  $\leq 10 \text{ mg}/\text{L}$ .

Estos límites garantizan la seguridad del agua regenerada, reduciendo los riesgos de salinización del suelo y contaminación microbiológica.

### **2.3.1.3 Plan de gestión del riesgo**

Todos los operadores que gestionen aguas regeneradas están obligados a implementar un Plan de Gestión del Riesgo (PGR), que incluye:

- Identificación y evaluación de riesgos asociados al agua regenerada.
- Medidas de control, como barreras de tratamiento adicionales.
- Monitoreo continuo de la calidad del agua.

Este enfoque preventivo refuerza la confianza en el uso de agua regenerada para aplicaciones sensibles como el riego de campos de golf y cultivos agrícolas.

## **2.3.2 RELACIÓN CON LA LEGISLACIÓN EUROPEA**

El marco normativo español se alinea con la legislación europea en materia de reutilización de agua. Destaca el Reglamento (UE) 2020/741, que establece requisitos mínimos para el uso de aguas regeneradas en el riego agrícola dentro de la Unión Europea. Este reglamento exige:

- Un enfoque basado en riesgos para garantizar la calidad y seguridad del agua regenerada.
- Transparencia en el monitoreo y la notificación de los resultados.

El Real Decreto 1085/2024 adapta las disposiciones del Reglamento 2020/741 al contexto nacional, ampliando su aplicación a usos no agrícolas, como el riego recreativo y urbano.

### 2.3.3 BENEFICIOS NORMATIVOS DE LA ÓSMOSIS INVERSA REVERSIBLE

La ósmosis inversa reversible se ajusta plenamente a los requisitos normativos establecidos, ya que permite obtener agua regenerada con parámetros de calidad superiores a los mínimos exigidos. Sus principales beneficios incluyen:

- **Cumplimiento normativo con eficiencia energética:** La OIR produce agua de baja conductividad ( $<1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) con un consumo energético reducido, alineándose con las políticas de sostenibilidad energética y reducción de emisiones de la Unión Europea.
- **Control de riesgos:** Los sistemas avanzados de control y monitoreo de la OIR, como la filtración previa y la desinfección por rayos UV, garantizan la eliminación de contaminantes y microorganismos, reduciendo los riesgos asociados al uso de agua regenerada.

En resumen, la ósmosis inversa reversible no solo resuelve desafíos técnicos en la reutilización de aguas residuales, sino que se configura como una herramienta esencial para alcanzar objetivos de sostenibilidad a escala regional y global.

## 2.4 RETOS Y OPORTUNIDADES

Aunque el marco normativo español es avanzado, existen desafíos que deben ser abordados para maximizar el uso de agua regenerada:

- **Aceptación social:** Persiste cierta reticencia en el uso de aguas regeneradas, especialmente en aplicaciones agrícolas, debido a percepciones de riesgo sanitario (Seguí, 2004).
- **Costes iniciales:** Las tecnologías avanzadas como la OIR requieren inversiones iniciales significativas, aunque sus costes operativos son menores a largo plazo.

Sin embargo, las oportunidades son igualmente significativas. La adopción de estas tecnologías puede posicionar a España como líder en la gestión sostenible del agua, especialmente en regiones afectadas por la sequía, como Andalucía.

En conclusión, el marco normativo que regula la reutilización de aguas regeneradas en España proporciona un entorno favorable para la adopción de tecnologías avanzadas como la ósmosis inversa reversible. Este enfoque no solo permite cumplir con los estándares de calidad exigidos, sino que también contribuye a objetivos globales de sostenibilidad y resiliencia hídrica.

## Capítulo 3. MEMORIA TÉCNICA<sup>1</sup>

En este capítulo se detalla la metodología empleada para implementar un sistema de ósmosis inversa reversible orientado a la producción de agua regenerada de baja conductividad. Se describe la configuración del sistema, así como su análisis técnico, energético, económico y ambiental, todo ello alineado con los principios de sostenibilidad definidos previamente.

Se presenta a continuación una propuesta técnico-económica real de una planta denominada MA-6000-RS para producir 6.000 m<sup>3</sup>/día de agua producto osmotizada (conductividad inferior a 100 µS/cm), equivalente a 13.119 m<sup>3</sup>/día de agua producto mezclada (conductividad inferior a 1.500 µS/cm) con destino al riego agrícola de cultivos tropicales<sup>2</sup>.

El sistema de ósmosis inversa reversible es una tecnología avanzada que permite tratar aguas residuales regeneradas, obteniendo un agua de alta calidad apta para riego agrícola, recreativo y urbano. Este método es particularmente útil en regiones como Andalucía, donde la intrusión marina y la salinización de suelos son problemas frecuentes (Medina San Juan, 1999).

### Principios de funcionamiento

El agua procedente del secundario de la EDAR pasa primero por el sistema de pretratamiento, donde se eliminan partículas y compuestos potencialmente nocivos para las membranas. Posteriormente, el agua entra en el sistema de OIR, donde se somete a un proceso de separación a través de membranas semipermeables. La inversión periódica del flujo en las membranas, junto con el sistema de antiensuciamiento basado en ultrasonidos y la propia arquitectura de las membranas evita la acumulación de sales y sedimentos, manteniendo la eficiencia del sistema y la durabilidad de los componentes.

### El sistema se compone de los siguientes elementos:

- **Pretratamiento:**
  - ✓ **Filtración multicapa y autolimpiante:** Reduce partículas suspendidas y sólidos mayores que podrían obstruir las membranas.
  - ✓ **Dosificación química:** Incluye la adición de floculantes, antiincrustantes y desinfectantes, garantizando un agua pretratada de calidad óptima.

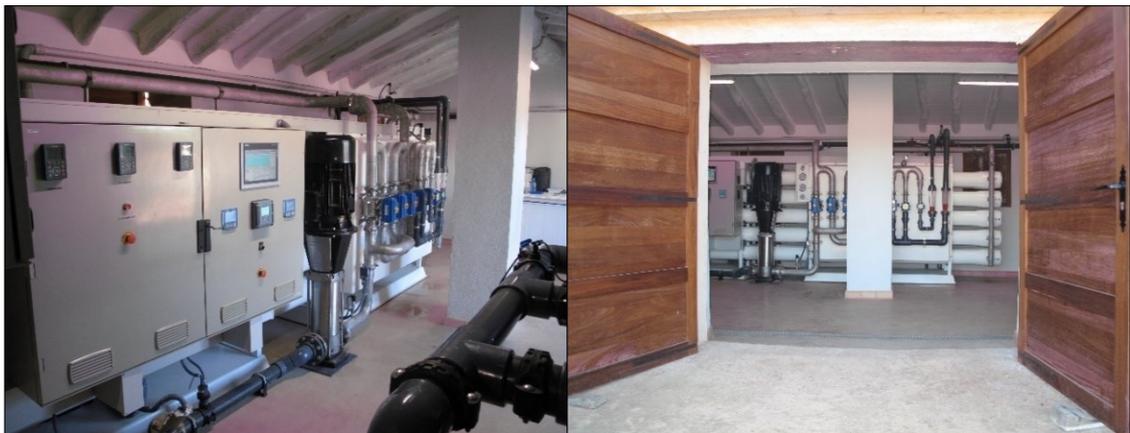
---

<sup>1</sup> Salvo algunas referencias específicas que se citan a lo largo del texto de este capítulo y del siguiente, ambos se basan en la memoria técnica interna *Equipos de desalabración para producción de agua regenerada basados en ósmosis inversa reversible* elaborada por Rodríguez-Bada (2024), documento no publicado perteneciente a Integra Tecnología del Agua. Para evitar redundancias, se ha optado por no repetir continuamente dicha cita en el cuerpo del texto.

<sup>2</sup> Por razones de protección de datos se han obviado los nombres propios, tanto del cliente como de la empresa ofertante.

- **Ósmosis inversa reversible:**
  - ✓ **Membranas de flujo reversible:** Diseñadas específicamente para minimizar el ensuciamiento y aumentar la vida útil del sistema.
  - ✓ **Bombas de alta presión:** Optimizadas para mantener un consumo energético reducido.
  - ✓ **Control electrónico:** Supervisión en tiempo real de parámetros como conductividad, presión y caudal.
- **Sistemas auxiliares:**
  - ✓ **Rayos UV y ultrasonidos:** Garantizan la desinfección y control del crecimiento bacteriano en las membranas.
  - ✓ **Control remoto:** Permite la operación y monitoreo del sistema a distancia, mejorando la eficiencia operativa.

### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA



*Figura 3-1. Planta de Ósmosis Inversa Reversible.  
Nota. Localización en Mallorca. Cortesía de Integra.*

El sistema de ósmosis inversa reversible ha sido desarrollado específicamente para producción de agua regenerada de baja conductividad, sin ultrafiltración previa, a partir de aguas procedentes de EDAR, diseñado para lograr la mejor calidad de agua tratada con el menor coste operativo e indicada para el riego de campos de golf, parques y jardines y agricultura en general.

El sistema de ósmosis inversa reversible ha sido rigurosamente probado y es el resultado de 7 años de investigación y desarrollo. Lleva 5 años implementado con éxito, operando en una EDAR municipal para el tratamiento de agua destinada al riego de un campo de golf, lo que demuestra su fiabilidad y eficiencia en condiciones reales de operación.

La planta estará conformada por un módulo que tiene una capacidad máxima de producción de 6.000 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada, con una conductividad en el rango de 50-100  $\mu$ S/cm. El

módulo está compuesto por tres líneas de producción de 2.000 m<sup>3</sup>/día, interconectadas completamente para garantizar la flexibilidad operativa y la continuidad del proceso. El caudal final de agua regenerada se obtiene al mezclar el agua producida con agua bruta, cuya proporción dependerá del índice de conversión, la conductividad del agua bruta y los parámetros de conductividad deseados en el agua tratada final. La configuración y parámetros establecidos son cruciales para alcanzar las especificaciones de calidad del agua regenerada.

La estrategia general propuesta para la puesta en marcha del sistema consiste en iniciar con un índice de conversión del 50% durante la fase inicial. A medida que avanza este proceso, se incrementará gradualmente el índice de conversión hasta alcanzar un 60% al final de la puesta en marcha. Posteriormente, durante la operación regular de la planta, y siempre que la calidad del agua de entrada lo permita, los parámetros operativos podrán ajustarse de forma progresiva para lograr una conversión de hasta un 70%. Estos ajustes se realizarán conforme a los requisitos específicos de calidad del agua regenerada y bajo condiciones controladas, asegurando siempre la estabilidad y eficiencia del sistema.

El sistema incluye una miniplanta con una capacidad de 55 m<sup>3</sup>/día de agua regenerada, denominada MA-55-RS, igualmente con una conductividad entre 50-100 µS/cm. Esta miniplanta actúa como referencia tanto durante la fase de puesta en marcha como a lo largo de toda la vida útil de la planta principal. Su presencia es fundamental para el correcto control operativo, permitiendo un monitoreo continuo de las condiciones del proceso. Gracias a la miniplanta, es posible anticipar y realizar ajustes oportunos en las maniobras del sistema en respuesta a posibles variaciones en las características del agua de entrada, asegurando así una operación estable y eficiente. La miniplanta es, por lo tanto, un componente indispensable para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema completo.

En los siguientes apartados se describirán primeramente las diferencias entre la ósmosis inversa tradicional y un sistema basado en ósmosis inversa reversible a partir del conjunto de elementos diferenciadores de la OIR, y posteriormente, se expondrá detalladamente cada uno de los componentes que integran la planta propuesta. Es fundamental destacar que la selección de estos elementos ha sido el resultado de rigurosos estudios y experimentación a lo largo de años de investigación. La configuración especificada en esta memoria es esencial para el correcto desempeño del sistema, y cualquier alteración, ya sea en el número de componentes, capacidad, modelo, marca o disposición, comprometería la eficacia y fiabilidad del proceso. Solo bajo las condiciones y especificaciones propuestas se puede garantizar el rendimiento y la funcionalidad del sistema.

Los sistemas de ósmosis inversa reversible incluyen las últimas tecnologías antiensuciamiento más avanzadas desarrolladas especialmente para esta aplicación, entre ellas, sistemas exclusivos de separación y microfiltración de partículas, membranas de flujo reversible dimensionadas especialmente para la aplicación y control electrónico del crecimiento bacteriano.

Estructura en acero inoxidable lacado y plataformas de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) que elimina los problemas de corrosión característicos de estos sistemas. Control electrónico de todas las motobombas para reducido consumo eléctrico. Monitorización electrónica para visualización instantánea de los parámetros operativos. Pantalla táctil de control. Los parámetros visualizados se controlan in situ y remotamente a través de internet.

Como se verá, las plantas basadas en ósmosis inversa reversible no necesitan el paso previo por equipos de ultrafiltración para el pretratamiento de las aguas residuales de EDAR, con lo cual los costes de inversión, mantenimiento y energéticos se reducen y el volumen de la instalación es inferior, así como la operación del sistema. El sistema ha sido desarrollado con objeto de asegurar un funcionamiento fiable y bajo coste de operación.

### **3.2 MEJORAS Y DIFERENCIAS ENTRE ÓSMOSIS INVERSA TRADICIONAL Y ÓSMOSIS INVERSA REVERSIBLE**

Como hemos visto en el apartado 2.2 del Capítulo 2, la ósmosis inversa (OI) es un proceso de separación por membranas ampliamente utilizado para desalinizar agua y reducir la concentración de sales y contaminantes disueltos. Sin embargo, la ósmosis inversa tradicional presenta limitaciones importantes en el tratamiento de aguas procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), debido a la alta carga orgánica e inorgánica que puede obstruir las membranas, reduciendo su eficiencia y vida útil (Drews, 2010).

Es importante reseñar que el sistema OIR funciona porque está formado por un conjunto de aplicaciones, las cuales por separado sin el concurso de las otras no darían los mismos resultados, incluso podría ser perjudicial para lo que se quiere proteger: las membranas.

- Etapa de filtración preliminar mediante filtros rotativos de malla autolimpiante, con sistema de lavado mediante agua filtrada.
- Prefiltración, con lecho filtrante multietapa, submicrónico, especialmente desarrollados para tratamiento de aguas muy cargadas.
- Sistema integrado de anticrecimiento bacteriano por control electrónico, compuesto por un sistema esterilizador mediante rayos ultravioletas de alta transmitancia y un sistema propio de ultrasonidos.
- Módulos de membranas especiales de bajo ensuciamiento, con diseño y dimensionamiento especial para bajo flujo específico e inversión de flujo interno.
- Sistema de lavados automáticos post-paro con protección biocida.
- Menor consumo energético que plantas convencionales, al controlar la gráfica de presiones, procurando mantenerla muy constante sin picos significativos (Figura 3-2).
- Minimización de los lavados químicos de membranas; de hecho, puede no ser necesarios, o si acaso de manera esporádica de manera anual, aumentando así la vida útil de las membranas.
- Todas las características están encaminadas a aumentar la eficacia del sistema con una mayor eficiencia y facilitar las labores de operación y mantenimiento.

### 3.2.1 Inversión del flujo

La ósmosis inversa reversible (OIR), o más propiamente la OI de flujo reversible, es la tecnología basada en OI que, a determinados cambio de presión en el flujo del agua permeada invierte la dirección del flujo, evitando la incrustación de impurezas en los poros de la membrana. Esto no quiere decir, y es importante remarcarlo, que se invierta el sentido a través del poro, es decir, el agua permeada (o producto) y la de rechazo no se mezclan, lo que ocurre es lo siguiente:

En un módulo de membrana de ósmosis inversa en configuración espiral enrollada, el agua de alimentación entra por un extremo y se desplaza longitudinalmente a través de un canal de flujo (formado por espaciadores entre capas de membrana) hasta salir como rechazo o concentrado por el otro extremo. Esta agua no atraviesa toda la membrana: parte de ella se filtra transversalmente a través de los poros hacia el canal central como permeado, y el resto sigue su camino hacia la salida. Invertir ese flujo implica que el agua de alimentación ahora entra por el lado opuesto del módulo (la anterior salida de rechazo se convierte en entrada), y sale por el lado donde antes entraba. Esto no cambia la dirección de paso a través de la membrana, sino el sentido del recorrido a lo largo del canal de alimentación (Rodríguez-Bada, 2024).

Esto se lleva a cabo porque con el uso prolongado, se tiende a formar más *fouling* (incrustaciones o biofilm) en ciertas zonas del canal de alimentación, especialmente cerca de la entrada o en zonas de baja velocidad. Al invertir el flujo de alimentación periódicamente:

- Se redistribuyen las zonas de presión y velocidad.
- Se evita que el *fouling* se concentre siempre en el mismo lugar.
- Se reduce el ensuciamiento localizado y el ensuciamiento asimétrico (muy típico en sistemas de OI).

Esto se controla con válvulas automáticas y bombas de recirculación bidireccionales controladas por PLC que se pueden programar por tiempo o por diferencial de presión.

Como ya se ha indicado, la inversión del flujo no es la única característica diferencial de la OIR con el sistema de OI tradicional, una serie mecanismos en conjunto hacen que se aumente considerablemente la vida media de las membranas, reduciendo así el coste de explotación de las plantas basadas en esta tecnología.

### 3.2.2 Diseño especial de las membranas

Como ya hemos visto, las membranas de ósmosis inversa reversible tienen la posibilidad de invertir el flujo cuando se detecta un diferencial de presión que equivale al inicio de atascamiento, además, poseen una superficie activa de baja rugosidad, lo que minimiza el ensuciamiento y aumenta su durabilidad.

### 3.2.3 Menor presión de trabajo

Debido a lo anterior, la OIR opera a presiones más bajas que la ósmosis inversa convencional, lo que se traduce en un menor consumo energético (Pouyfaucou, 2018). Según estudios

(Rodríguez-Bada, 2024), la OIR puede reducir los costes energéticos en un 25% respecto a los sistemas tradicionales.

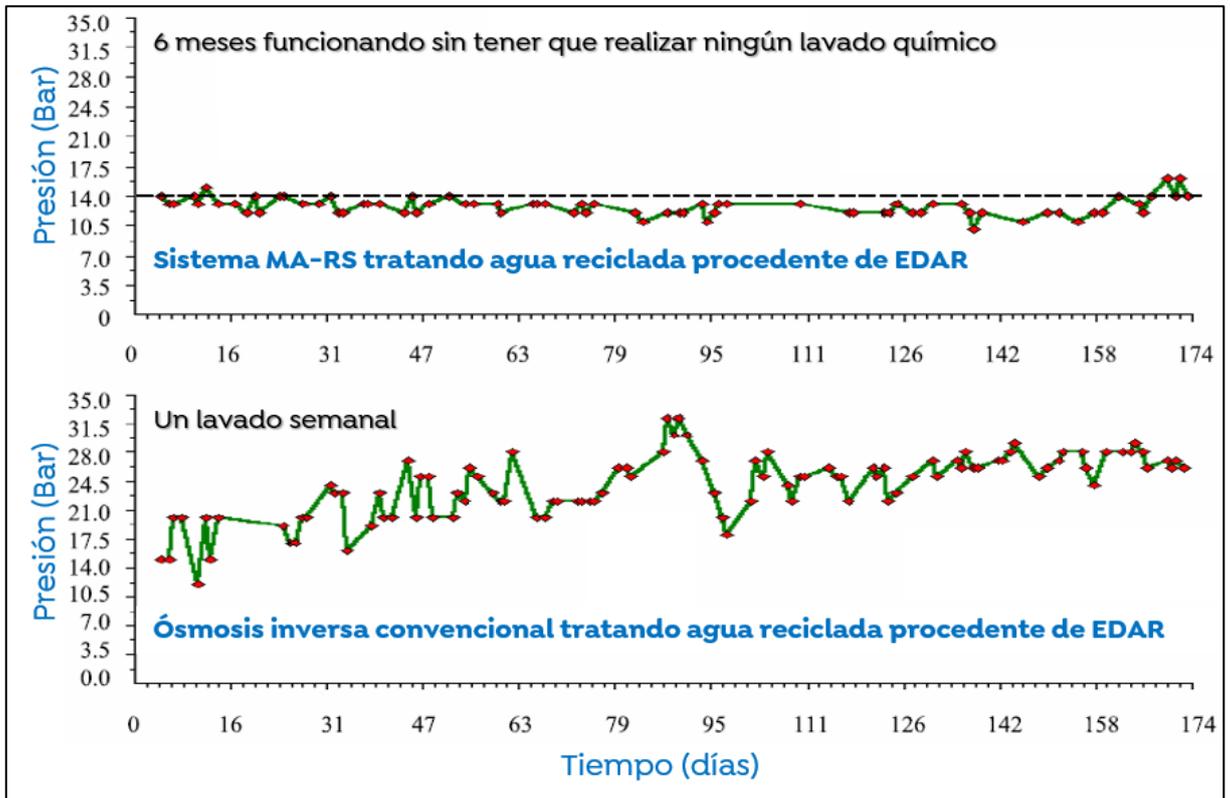


Figura 3-2. Diferencia de presiones de trabajo: OIR vs OI convencional.  
Nota. En la planta de OIR no se realiza ningún lavado químico durante 6 meses, frente a lavados químicos semanales en la de OI convencional. Imagen cortesía de Integra.

### 3.2.4 Capacidad de autolimpieza

Incluye sistemas avanzados como el control electrónico del crecimiento bacteriano mediante rayos UV y ultrasonidos, eliminando la necesidad de lavados químicos frecuentes.

#### 3.2.4.1 Radiación ultravioleta

El uso de radiación ultravioleta como paso previo a la ósmosis inversa (además de la desinfección en las primeras fases del pretratamiento, bien con cloro —que luego habrá que eliminar, pues tóxico para las membranas— o con ozono (actualmente en experimentación), incide en una mayor desinfección del agua a osmotizar, evitando al mínimo la entrada de microorganismos a las membranas.

#### 3.2.4.2 Ultrasonidos

El *fouling*, que como ya se ha indicado es lo que se llama al ensuciamiento de las membranas, es la acumulación de sustancias no deseadas en la superficie o dentro de los poros de una membrana, lo que reduce su rendimiento (Delgado, 2017). Hay varios tipos:

- **Fouling biológico.**
  - ✓ Causado por: microorganismos como bacterias, algas u hongos.
  - ✓ Mecanismo: se adhieren a la membrana y forman una biopelícula (*biofilm*) compuesta por células y sustancias extracelulares pegajosas.
  - ✓ Efectos: la biopelícula actúa como una barrera física y química, reduciendo el flujo de permeado y aumentando la presión necesaria para operar.
- **Fouling coloidal.**
  - ✓ Causado por: partículas muy pequeñas (coloidales), como arcillas, óxidos metálicos, sílice o materia orgánica disuelta.
  - ✓ Mecanismo: estas partículas se depositan sobre la superficie o bloquean los poros parcialmente.
  - ✓ Efectos: disminuyen el caudal, afectan la calidad del agua producida y requieren más limpiezas.

### **¿Cómo ayudan los ultrasonidos a la eliminación del fouling?**

Cuando se aplican ultrasonidos en un medio líquido (como en la cámara de alimentación de una membrana), se generan (Feng et al., 2006):

- Cavitación acústica: burbujas microscópicas que implosionan con fuerza, generando microchorros y ondas de choque localizadas.
- Oscilaciones de presión: que crean vibraciones mecánicas en la superficie de la membrana.
- Corrientes acústicas secundarias: que ayudan a mover partículas fuera de la superficie.

### **Esto produce los siguientes efectos útiles:**

- En el *fouling* biológico:
  - ✓ Los ultrasonidos rompen la biopelícula y facilitar su eliminación.
  - ✓ No matan necesariamente las bacterias, pero debilitan su estructura y adhesión.
- En el *fouling* coloidal
  - ✓ Ayudan a despegar partículas finas de la superficie.
  - ✓ Mejoran el flujo superficial.

### **3.2.4.3 Disminución de los frecuentes lavados químicos de membranas**

Las ventajas que proporcionan las actuaciones de autolimpieza hacen innecesarios los frecuentes lavados químicos de las membranas, lo que hace que estas sean más duraderas, siendo una clara ventaja del sistema. En la OI tradicional se realizan lavados químicos semanales, en OIR se hacen, si acaso, cada 6 o 12 meses (Rodríguez-Bada, 2024).

### **3.2.5 Eliminación de la ultrafiltración**

Debido a la unión de todas las características anteriores, a diferencia de los sistemas tradicionales, la OIR no requiere un paso de ultrafiltración previo, lo que simplifica el diseño de la planta y reduce los costes de instalación y mantenimiento.

Como conclusión, podemos afirmar que todas estas características operando conjuntamente hacen que la OIR sea especialmente adecuada para el tratamiento de aguas regeneradas (Fundación Finnova, 2024). Además, al reducir la frecuencia de mantenimiento y prolongar la vida útil de los componentes, ofrece ventajas económicas significativas.

## **3.3 USO Y APLICACIÓN**

Debido a la naturaleza de las aguas procedentes de secundario de EDAR, cargadas de contaminación orgánica e inorgánica, el tratamiento y desalobración directa con sistema de ósmosis inversa convencional sería inviable. En un equipo de ósmosis inversa convencional la contaminación se depositaría en la superficie de las membranas, bloqueándolas en un espacio de tiempo muy corto. Este efecto se produciría en la mayoría de los casos en pocos días y con pocas o nulas posibilidades de recuperación práctica.

## **3.4 DISEÑO**

En el proceso de tratamiento la línea completa de tratamiento del agua está compuesta por rigurosos procesos capaces de adecuar esta agua para su paso final por membranas sin que los contaminantes bloqueen el funcionamiento de las mismas. Entre ellos, el sistema propio de tratamiento anticontaminación interna complementado mediante vibración y ultrasonidos, para controlar el ensuciamiento en las membranas.

En este sistema las membranas utilizadas son distintas a los convencionales de ósmosis inversa: la superficie activa de las membranas tiene un índice de rugosidad excepcionalmente baja; el flujo direccional del agua a tratar es variable, evitando la concentración de depósitos de sólidos suspendidos en puntos concretos de la superficie de las membranas, lo que complementa el diseño global del sistema para una gran resistencia al ensuciamiento. La presión dentro del sistema es más baja que en los equipos convencionales de osmosis inversa, reduciendo el coste energético.

## **3.5 LÍNEA DE TRATAMIENTO**

El agua a tratar será bombeada mediante un grupo de alimentación a baja presión constante.

Un medidor de turbidez digital con sonda de limpieza automática indicará la turbidez del agua de aporte y/o de entrada a membranas.

**El pretratamiento estará compuesto por:**

- Sistemas de dosificación de:
  - ✓ hipoclorito sódico
  - ✓ floculante (cloruro férrico)
  - ✓ antiincrustante (KC-3000) por su efectividad probada contra incrustaciones de sulfatos y carbonatos
- Sistemas de filtrado compuesto por:
  - ✓ filtro rotativo de malla autolimpiante
  - ✓ filtración multicapa del tipo de muy baja velocidad
  - ✓ filtración de seguridad por medio de cartuchos recambiables
- Sistema de dosificación automática de metabisulfito
- Esterilización mediante rayos U.V.

Desde el pretratamiento el agua es enviada al grupo de alta presión, donde por mediación de las bombas, la presión puede ser aumentada hasta un máximo de 14 Kg/cm<sup>2</sup> (la presión de trabajo inicial dependerá de las características del agua a tratar. El agua a presión es introducida en las membranas, siendo en esta fase en la que realiza la desalobración. Las bombas de alta presión estarán controladas por un sistema electrónico, con lo que se consigue un importante ahorro de energía eléctrica. El agua que circula por el equipo es controlada constantemente por los caudalímetros y los controladores electrónicos digitales.

Las presiones de prefiltración y del circuito de ósmosis inversa reversible son indicadas por los manómetros del cuadro hidráulico y en la pantalla táctil de control.

Todas las operaciones del equipo están controladas por el autómatas del cuadro principal que incluye indicación digital constante de la calidad del agua de aporte y de producto, situación operativa del equipo e indicador de anomalías para un rápido diagnóstico. El autómatas activa los lavados de la prefiltración, lavados automáticos post-paro de las membranas, paradas de seguridad en caso de falta de agua en la entrada o excesiva presión en las membranas, alarmas y parada del equipo por falta de calidad en el agua producto. El sistema controla de forma semiautomática la presión del equipo de alta presión con objeto de reducir ajustes manuales.

En este caso, el módulo de ósmosis inversa reversible de 6.000 m<sup>3</sup>/día está compuesto por tres líneas de 2.000 m<sup>3</sup>/día, que pueden funcionar independientemente durante las labores de mantenimiento.

El agua producida por los grupos de ósmosis inversa reversible se dirigirá al tanque de agua producto, donde se instalará la sonda que controla los arranques del equipo, con el fin de que el funcionamiento sea totalmente automático.

La conversión de agua puede ser ajustada, de acuerdo con las condiciones de funcionamiento que se requieran y las características del agua a tratar. Como se ha indicado anteriormente, al finalizar la puesta en marcha se alcanzará un índice de conversión del 60%, pudiendo ir aumentándose dependiendo de la calidad del agua bruta hasta el 70% (agua producto osmotizada sin mezcla/agua bruta).

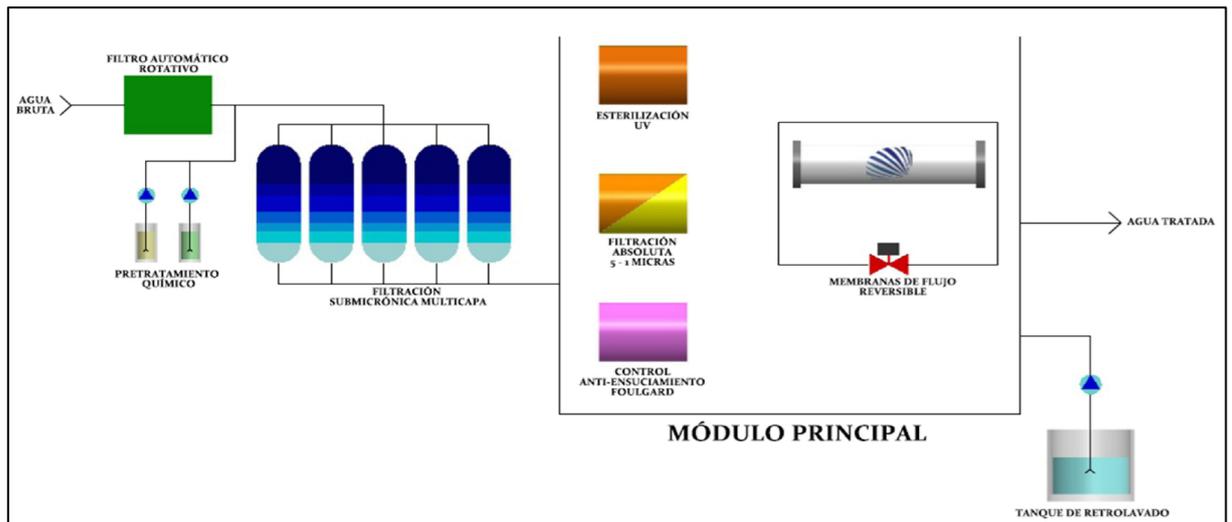


Figura 3-3. Esquema de los componentes de una planta de OIR.  
Imagen cortesía de Integra.

### 3.6 DATOS OPERATIVOS

Parámetros	Valores
Temperatura del agua a tratar	10 - 35 °C
Índice de atascamiento del agua bruta (SDI)	< 25
Turbidez máxima del agua a tratar	5 NTU
Nivel máximo de sólidos suspendidos en el agua bruta	25 mg/l
Temperatura máxima del agua a tratar	35 °C
Hierro total	< 0,1 mg/l
Magnesio	< 0,1 mg/l
Rango de pH en fase operativa	3-9
Rango de pH en fase de limpieza química	2-10
Cloro libre	< 0,1 mg/l

Tabla 3-1. Datos operativos del agua bruta a tratar procedente del secundario.

Notas:

- El caudal de producción de agua osmotizada se verá afectado por la temperatura, disminuyendo en un 3% por cada grado centígrado por debajo de la temperatura de diseño, y aumentando en el mismo porcentaje si la temperatura aumenta, por lo cual la presión de trabajo disminuirá o aumentará para mantener la producción del diseño.
- Como índice de turbidez, teniendo en cuenta el tipo de agua de partida, se ha tomado el máximo de las aguas procedentes de EDAR municipal, en condiciones de funcionamiento cumpliendo con la normativa de vertidos vigente.
- El funcionamiento con aguas de índices SDI, turbidez o sólidos suspendidos por encima de los indicados resultaría en disminución del caudal de producto, aumento de la presión de trabajo y variación general de los parámetros de funcionamiento del equipo y aumento de la frecuencia de realización de limpiezas químicas de las membranas.

### 3.7 DATOS DE DISEÑO

Tipos de agua (según conductividad y uso)	Caudales y Conductividades
Agua Bruta	17.156 m <sup>3</sup> /día 2.820 µS/cm
Agua de Alimentación a la OIR	10.092 m <sup>3</sup> /día 2.820 µS/cm
Agua de Rechazo	4.037 m <sup>3</sup> /día 4.037 µS/cm
Agua a la Salida OIR	6.055 m <sup>3</sup> /día 50-100 µS/cm
Agua Bruta para Mezclar	7.064 m <sup>3</sup> /día 2.820 µS/cm
Agua Producto para Riego	13.119 m <sup>3</sup> /día máx. 1.500 µS/cm
Tasa de conversión: Agua Producto/Agua Bruta	76%

Tabla 3-2. Caudales y Conductividades de los distintos tipos de agua.

Parámetros	Valores
Caudal de bombeo (en producción de agua)	10.000 m <sup>3</sup> /día – 417 m <sup>3</sup> /h (*)
Caudal de bombeo (en fases de lavado del pretratamiento)	702 m <sup>3</sup> /h (**)
Caudal de rechazo	4.000 m <sup>3</sup> /día - 167 m <sup>3</sup> /h (*)
Caudal de producción (sin mezcla)	6.000 m <sup>3</sup> /día - 250 m <sup>3</sup> /h (*)
Tasa de conversión de la ósmosis inversa reversible (sin mezcla)	60%

Tabla 3-3. Datos de diseño.

(\*) Ajustable dependiendo de la calidad del agua a tratar. El equipo puede ser operado con recuperación mayor, dependiendo de las características del agua de entrada y calidad del producto que se requiera.

(\*\*) Lavado del pretratamiento con el equipo en producción.

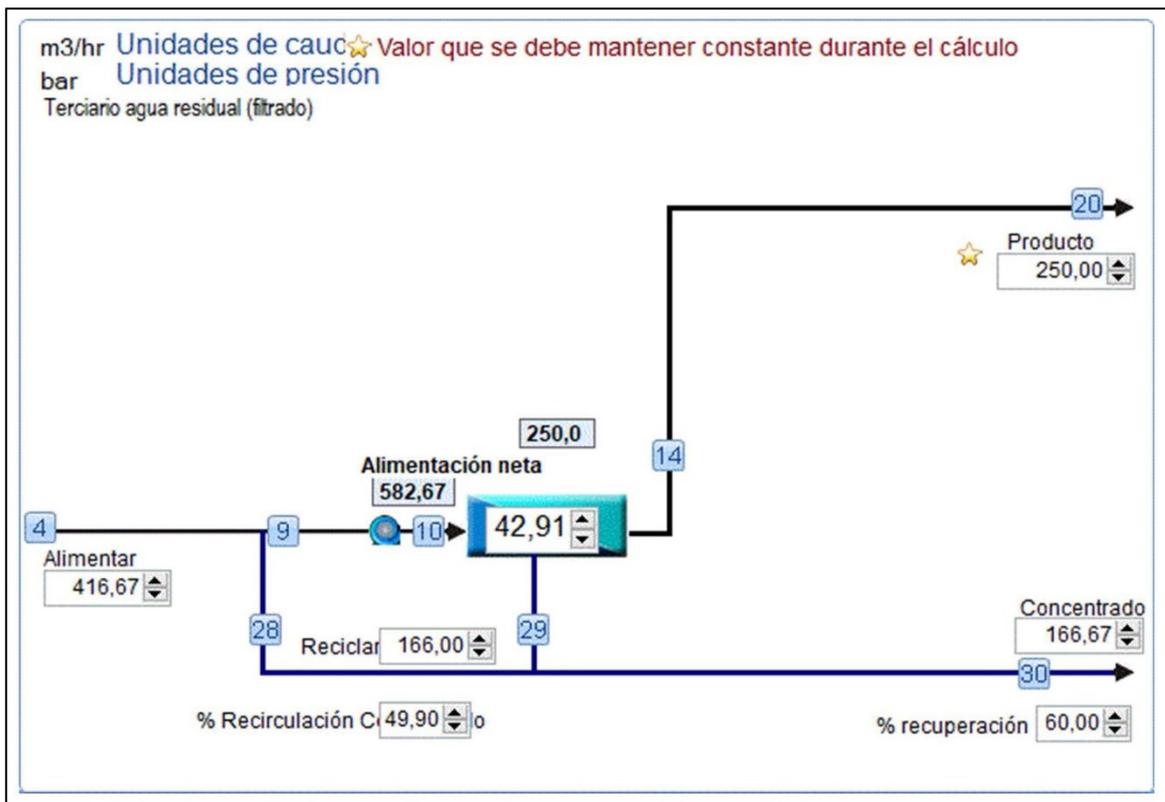


Figura 3-4. Diagrama de flujo.  
Imagen cortesía de Integra.

### 3.7.1 ESPECIFICACIONES DEL SUMINISTRO

#### 3.7.2 Pretratamiento

##### 3.7.2.1 Grupo de alimentación a baja presión

El grupo está constituido por una bombas centrífugas, depósito acumulador, sistema de control/ahorrador de energía por variador electrónico de frecuencia y transductor de presión, todo montado en el chasis del equipo. El grupo está diseñado para funcionamiento con carga en el lado de aspiración.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Tipo de bomba	Centrífuga vertical
N.º de bombas	3
Material del cuerpo bomba	Acero inoxidable 316
Velocidad de giro	Variable hasta 2.900 r.p.m.
Potencia del motor	3 × 37 kW
Protección	IP44
Voltaje	380 V - 50Hz
Tipo de acumulador	A membrana
Material del depósito	V.R.V.F.
Material de la membrana	Poliéster-uretano
Capacidad	3.000 litros
Potencia del V.E.F.	3 × 37 kW
Tipo de variador	Doble aislamiento
Tipo de sistema antiarriete	De membrana presurizada

*Tabla 3-4. Especificaciones técnicas del grupo de alimentación a baja presión.*

### 3.7.2.2 Sistema dosificador de cloro

Tiene por objeto reducir la contaminación biológica en el agua bruta, si fuese necesario.

Sistema compuesto por dosificadora digital MT de diafragma, cabezal en PVDF, válvulas de cerámica y tanque para cloro de 1.000 litros en polietileno.

#### Características:

- ✓ Conexión sonda de nivel bajo
- ✓ Kit de aspiración e impulsión
- ✓ Doble válvula de esfera
- ✓ Purgador rápido
- ✓ Estribo de montaje en pared
- ✓ 10 m de tubo flexible y 6 mm de diámetro
- ✓ Predisposición salida de alarma



Figura 3-5. Sistema dosificador de cloro.

Parámetros	Valores
Tipo de bomba:	Magic
Unidades:	3
Regulación:	Electrónica
Caudal máximo:	3 litros/hora
Presión máxima:	10 bar
Potencia:	0,018 kW

Tabla 3-5. Especificaciones técnicas del clorador.

### 3.7.2.3 Sistema dosificador de floculante

Tiene por objeto optimizar la eficacia del sistema de prefiltración multicapa.

Sistema compuesto por dosificadora digital MT de diafragma, cabezal en PVDF, válvulas de cerámica y tanque para floculante (cloruro férrico) de 1.000 litros en polietileno, con agitador eléctrico.

#### Características:

- ✓ Conexión sonda de nivel bajo
- ✓ Kit de aspiración e impulsión
- ✓ Doble válvula de esfera
- ✓ Purgador rápido
- ✓ Estribo de montaje en pared
- ✓ 10 m de tubo flexible y 6 mm de diámetro
- ✓ Predisposición salida de alarma



Figura 3-6. Sistema dosificador de floculante.

Parámetros	Valores
Tipo de bomba:	Magic
Unidades:	3
Regulación:	Electrónica
Caudal máximo:	3 litros/hora
Presión máxima:	10 bar
Potencia:	0,018 kW

Tabla 3-6. Especificaciones técnicas del dosificador de floculante.

#### 3.7.2.4 Dosificación de antiincrustante KC-3000

Tiene por objeto eliminar los problemas de precipitación por sulfatos y carbonatos en las membranas, para ello se dosifica el producto dispersante que impide la formación y crecimiento por efecto umbral.

El producto se dosifica según el análisis del agua a tratar, mediante una bomba dosificadora magnética de membrana, con regulación electrónica.

Para evitar la incrustación de las membranas a causa de fallos de dosificación, el sistema electrónico controla la dosificación efectiva de la bomba, activando la alarma y paro del equipo de OIR en el caso de fallo.

La bomba aspira de un depósito con válvula de pie, con interruptor de nivel mínimo y está dotada de un sistema de cebado rápido.



Figura 3-7. Sistema dosificador de antiincrustante.

Parámetros	Valores
Tipo de bomba	MAGIC-FLOW MONITOR
Unidades	3
Modelo	07-02
Cabeza	En PVDF, con purgador
Regulación	Electrónica
Caudal máximo	3 litros/hora
Presión máxima	10 bar
Potencia	0,018 kW
Capacidad de tanque	200 litros
Material	PE, color negro

Tabla 3-7. Especificaciones técnicas del dosificador de antiincrustante.

### 3.7.2.5 Filtración por mallas autolimpiantes

Tiene por objeto el desbaste del agua a tratar, antes de su paso por el filtro multicapa, para mejorar la capacidad de filtración de este último y prolongar los ciclos entre lavados.

La filtración por mallas autolimpiantes es de funcionamiento totalmente automática, con contralavado por cepillo rotativo rascador y desagüe por vacío.

El diseño de esta filtración permite el suministro de agua en continuo.

El sistema lava las mallas con agua filtrada por el propio filtro.

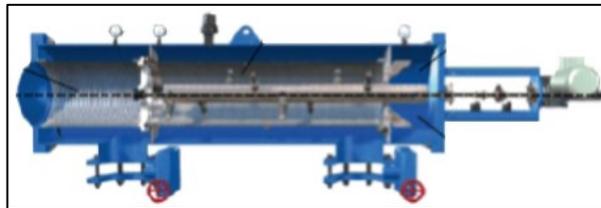


Figura 3-8. Filtro por mallas autolimpiantes.

Parámetros	Valores
N.º de filtros	2
Material de las mallas	Acero inoxidable 316
Grado de filtración	150 micras
Control de lavados	Autómata programable

Tabla 3-8. Especificaciones técnicas del filtrado por mallas autolimpiantes.

### 3.7.2.6 Filtración multicapa

El agua a tratar pasará a través de una filtración multicapa escogida al efecto, para retener la presencia de partículas en suspensión de aguas muy cargadas, desarrollada para los equipos. Los filtros estarán contruidos en PRFV y son de funcionamiento automático, realizando sin ninguna intervención manual las operaciones de contralavado, lavado rápido y servicio normal.

En comparación con los filtros convencionales, la combinación de lechos filtrantes, permiten mejor retención de las partículas en suspensión en el lecho multicapa, al actuar selectivamente cada uno de ellos, resultando en una calidad de filtrado de hasta una micra en condiciones normales.

El lavado de los filtros se iniciará de acuerdo con la programación por tiempo realizada en el autómeta del cuadro de control principal. De forma visual, a través de los manómetros del cuadro hidráulico e indicadores digitales, se podrá medir la presión diferencial para comprobar el grado de atascamiento.



Figura 3-9. Filtro multicapa.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Numero de filtros	5
Diámetro de cada filtro	3.000 mm
Largo de cada filtro	10.000 mm
Velocidad de filtración	<5 m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>
Fluido de contralavado	Agua filtrada por el sistema
Material	P.R.F.V.
Presión máxima de trabajo	6 bar
Presión de trabajo en el equipo	3-3,5 bar
Registros	Boca de hombre superior, inferior y lateral
Tipo de válvulas de control	P.V.C. Accionamiento eléctrico
Material	Poliamida
Funcionamiento	Electrónico

Tabla 3-9. Especificaciones técnicas del filtrado multicapa.

### 3.7.2.7 Filtración de seguridad

Con objeto de eliminar las pequeñas partículas que pudieran atravesar los filtros multicapa y dañar el grupo de alta presión o las membranas, y como pulido final se prevé el suministro de un sistema de filtración por cartuchos, en dos pasos, con grado de filtración absoluta de 5 y 1 micras.

Estos cartuchos vienen acoplados en contenedores en material sintético, para eliminar los problemas de corrosión y facilitar su mantenimiento.

Los cartuchos están contruidos totalmente en material sintético, lo cual conlleva las ventajas de ser lavables en algunos casos y no ser afectados por la contaminación orgánica.

Los manómetros instalados en el cuadro principal hidráulico indican el grado de atascamiento de estas etapas de filtración y la pérdida de carga.



Figura 3-10. Filtros de seguridad.

Parámetros	Valores
Tipo de filtro	Bujías recambiables. HF
Material	Viniléster reforzado con fibra de vidrio
Número de filtros	60
Número de cartuchos	60
Tipo de cartucho	Sintéticos, plisados, alto caudal, filtración absoluta 8,5 m <sup>2</sup> c/u.

Tabla 3-10. Especificaciones técnicas filtrado de seguridad de 5 micras.

Parámetros	Valores
Tipo de filtro	Bujías recambiables. HF
Material	Viniléster reforzado con fibra de vidrio
Número de filtros	60
Número de cartuchos	60
Tipo de cartucho	Sintéticos, plisados, alto caudal, filtración absoluta 8,5 m <sup>2</sup> c/u.

Tabla 3-11. Especificaciones técnicas filtrado de seguridad de 1 micras.

### 3.7.2.8 Sistema dosificador de metabisulfito

Tiene por objeto eliminar el cloro residual del agua bruta, antes de su paso por las membranas.

Sistema compuesto por dosificadora digital PR-ORP de diafragma, cabezal en PVDF, válvulas de cerámica y tanque para Metabisulfito de 500 litros en Polietileno con agitador eléctrico.

#### Características:

- ✓ Regulación manual o proporcional
- ✓ Sonda ORP 5 metros
- ✓ Salida 4/20 mA
- ✓ Conexión sonda de nivel bajo
- ✓ Kit de aspiración e impulsión
- ✓ Doble válvula de esfera
- ✓ Purgador rápido
- ✓ Estribo de montaje en pared
- ✓ 10 m tubo flexible de 6 mm de diámetro
- ✓ Predisposición salida de alarma



Figura 3-11. Sistema de dosificación de metabisulfito.

Parámetros	Valores
Tipo de bomba	Magic
Unidades	3
Regulación	Electrónica
Caudal máximo	3 litros/hora
Presión máxima	10 bar
Potencia:	0,018 kW

Tabla 3-12. Especificaciones técnicas de la dosificación de metabisulfito.

### 3.7.2.9 Esterilización por rayos ultravioletas

Tiene por objeto la eliminación de la contaminación orgánica del agua a tratar, antes de su paso por la etapa de ósmosis inversa reversible.

Mediante la tecnología U.V., el sistema elimina bacterias, virus y otros agentes patógenos.

Las lámparas están contenidas en una cámara construida en acero inoxidable 316L para evitar la corrosión y monitorizadas por un sistema electrónico con información digitalizada de los parámetros de funcionamiento, incluyendo sensor de radiación y alarmas programables.



Figura 3-12. Esterilizador por rayos ultravioletas.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Tipo de lámparas	Amalgama
Unidades	3
Vida útil	16.000 horas
Número de lámparas	6 c./u.
Potencia	3 × 2,2 kW
Transmitancia del sistema	98%
Dosis U.V.	60 mJ/cm <sup>2</sup> a 600 m <sup>3</sup> /h
Material del contenedor.....	Acero inoxidable 316L

Figura 3-13. Especificaciones técnicas de la esterilización por rayos ultravioletas.

### 3.7.3 Ósmosis Inversa Reversible

Tras el pretratamiento el agua pasará al grupo de ósmosis inversa reversible. El grupo se suministra montado en plataformas de PRFV con objeto de facilitar el transporte y eliminar la corrosión. El grupo de alimentación de agua a baja presión también se suministra para montaje autónomo. El grupo incluye básicamente los siguientes equipos:

- Filtración de seguridad mediante cartuchos recambiables.
- Esterilizador mediante rayos ultravioleta.
- Grupo electrobomba de alta presión con regulador de presión.
- Cajas contenedoras de alta presión con sus membranas correspondientes y sistema antiensuciamiento.
- Cuadro de control y seguridad eléctrico/electrónico, con automatización integral de todo el proceso, desarrollado específicamente para los equipos basados en OIR.
- Cuadro de control hidráulico con indicadores de presión de todas las etapas de la instalación, incluidas bombeo de baja presión y prefiltración.
- Válvulas automáticas y manuales, tuberías hidráulicas y conexiones eléctricas.
- Sistema de lavado de membranas incluido bomba y accesorios.

#### 3.7.3.1 Sistema de bombeo de alta presión

El grupo está constituido por motobombas centrífugas montadas en el chasis del equipo con válvula reguladora de presión y sistema ahorrador de energía mediante variador de velocidad electrónico.



Figura 3-14. Sistema de bombeo de alta presión.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Tipo de bomba	Centrífuga
N.º de bombas	3
Material del cuerpo bomba	Acero inoxidable 316
Velocidad de rotación	Regulable hasta 2.900 r.p.m. máx.
Potencia del motor	3 x 90 kW
Protección	IP 55
Voltaje	380 V - 50 Hz
Potencia del V.E.F.	3 x 90 kW
Tipo de variador	Doble aislamiento

*Tabla 3-13. Especificaciones técnicas del bombeo de alta presión.*

### **3.7.3.2 Cajas contenedoras de alta presión para membranas**

Se utilizarán cajas de presión construidas en viniléster reforzado con FV, envolviendo una camisa interior de PVC soldada al recubrimiento y con elementos de cierre en acero inoxidable.

Este diseño de cajas ofrece la importante ventaja de una superficie interna no porosa, al contrario de las fabricadas en resinas sintéticas únicamente. La superficie no porosa del PVC evita la formación de lechos bacterianos o residuos e impide el peligro de migración de monómeros o fibras hacia el permeado. El material está aprobado para su uso en industrias de alimentación y agua potable.

El recubrimiento externo en viniléster garantiza una mayor resistencia y longevidad.

Las cajas van provistas de conexión lateral para facilitar las labores de mantenimiento y ahorrar espacio.



*Figura 3-15. Caja contenedora de alta presión para membranas.*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Modelo	5-30-8
Nº de cajas	218
Construcción	viniléster y fibra de vidrio
Presión máxima de trabajo	31 bar

*Tabla 3-14. Especificaciones técnicas de las cajas contenedoras para membranas.*

### 3.7.3.3 Sistema antiensuciamiento de membranas

Parámetros	Valores
------------	---------

El sistema es de funcionamiento hidráulico-electrónico con muy bajo consumo de energía y es de diseño exclusivo MAGIC.

El sistema controla en continuo, el crecimiento de fouling orgánico, reduciendo el atascamiento de membranas por esta causa.

Parámetros	Valores
------------	---------

Tensión eléctrica	220 V
Potencia	2 x 2,25 kW

Tabla 3-15. Especificaciones técnicas del sistema de antiensuciamiento de membranas.

### 3.7.3.4 Membranas de ósmosis inversa reversible

Las membranas utilizadas son del tipo de poliamida aromática enrollada en espiral, de última generación. Este modelo de membrana ofrece una duración superior debido a su alto rechazo de sales (López Ramírez, J.A. et al., 2000), que hace que se mantenga la calidad producto en un muy buen nivel, durante un espacio de tiempo más largo del habitual en membranas convencionales.

Para reducir el ensuciamiento, las membranas de diseño especial utilizadas en los equipos de OIR están construidas con una superficie de rugosidad reducida y para funcionamiento con sentido de flujo variable.

Por sus características de construcción, las limpiezas químicas dan mejores resultados con procedimientos menos enérgicos.



Figura 3-16. Membrana de ósmosis inversa reversible.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Marca	Toray/Magic, diseño especial
Unidades	1.090
Superficie activa total	30.411 m <sup>2</sup>
Rechazo de sales	99,7 %
Temperatura de trabajo	Hasta 45 °C
Rango de pH continuo	3-9
Rango de pH en limpiezas	2-10
Presión máxima de trabajo	40 bar

*Tabla 3-16. Especificaciones técnicas de las membranas de ósmosis inversa reversible.*

### **3.7.3.5 Cuadro de control eléctrico/electrónico con pantalla táctil**

Autómata de control programable con pantalla táctil especialmente desarrollado para controlar las funciones del equipo desalinizador y periféricos de control, incluyendo:

#### **Indicador digital de los siguientes parámetros:**

- Diagrama de flujo.
- Conductividad del agua producto con escala de 0 a 2.500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .
- Indicación del proceso en marcha del equipo desalador y fase del mismo.
- Tiempo de funcionamiento del equipo desde el primer arranque.
- Tiempo restante hasta la siguiente parada por lavado del filtro bicapa.
- Indicador de retrolavado de bomba y membranas.
- Autocomprobación del display.
- Función de lavado de los filtros y fase en que se encuentran.
- Conductividad del agua de aporte.
- Presión de alimentación.
- Presión filtro 1.
- Presión filtro 2.
- Presión entrada membranas.
- Presión rechazo.
- Temperatura del agua de aporte.
- Caudal instantáneo del agua producto.
- Caudal instantáneo del agua de rechazo.
- Turbidímetro del agua de aporte.

- Histórico de alarma.
- Pantallas gráficas de datos, con los parámetros medidos del sistema.

**Indicaciones de los siguientes paros por alarma:**

- Límite de presión mínima en la entrada del grupo de alta presión.
- Límite de presión máxima en la impulsión del grupo de alta presión.
- Límite de nivel bajo en el depósito de antiincrustante.
- Indicador de paro por tanque de agua producto lleno.
- Límite de conductividad máxima para el agua producto.
- Límite de nivel de seguridad para el depósito de antiincrustante.
- Fallos de dosificación.
- Fallos en motobombas.
- Límite de turbidez.

**Elementos auxiliares:**

- Presostato de mínima presión en la entrada.
- Presostato de máxima presión en el grupo de alta.
- Transductores de presión.
- Sonda de conductividad de agua producto.
- Válvulas automáticas de mando electro/hidráulicas.
- Sensor de nivel para el depósito de agua producto.
- Sensor de nivel para el depósito de producto químico.
- Presostatos de mando.
- Sonda de turbidez con sistema de lavado automático.

**El autómata mide y controla los siguientes parámetros:**

- Nivel del tanque de agua producto.
- Bombas dosificadoras.
- Nivel mínimo de depósitos de dosificación.
- Secuencias de apertura de los circuitos de agua a tratar y retrolavado.
- Secuencias de arranque de la/s bomba/s de alta presión.
- Válvulas de contralavado de la prefiltración.

**Las programaciones que permite realizar el autómata son las siguientes:**

- Conductividad máxima del producto admisible.
- Bloqueo del equipo a una conductividad del producto prefijada.
- Intervalo de retrolavados periódicos.
- Duración de los retrolavados.
- Intervalo de contralavado de prefiltración periódicos.
- Duración de cada fase de contralavado y lavado rápido.
- Tiempos de espera para el accionamiento de alarmas.
- Punto de consigna para alarmas de presión.

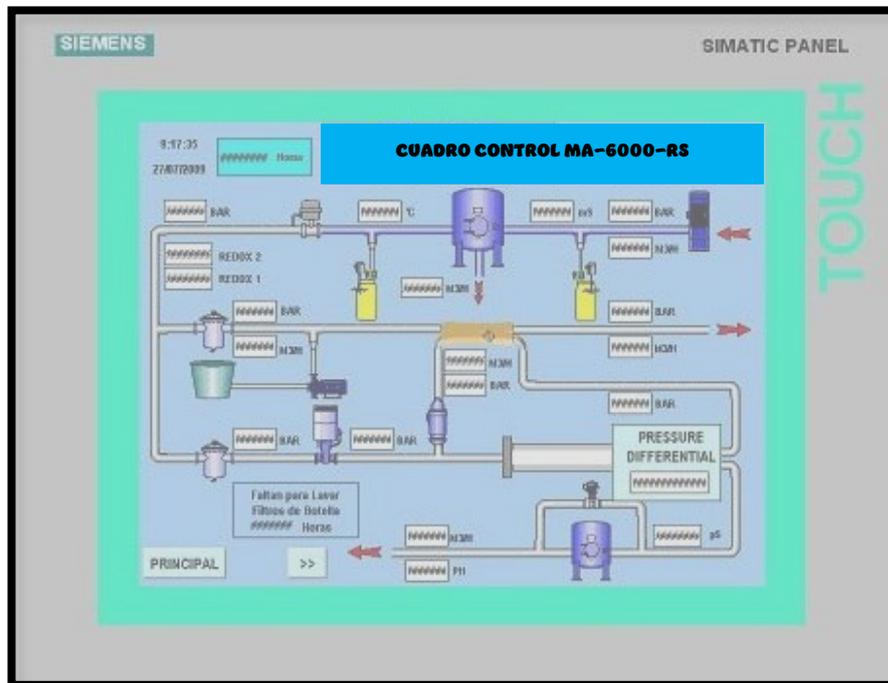


Figura 3-17. Pantalla táctil del cuadro de control.

Parámetros	Valores
Detección, control y accionamiento electrónico	Danfoss
Autómata y pantalla táctil	Siemens
Sonda de conductividad agua producto	Inox 316 L
Presostatos	Telemecanique
Sondas de nivel productos químicos	Magic
Medidores de turbidez	Hach

Tabla 3-17. Características técnicas del cuadro de control electrónico.

### 3.7.3.6 Control a distancia

Mediante la conexión de una línea de Internet, el sistema puede ser controlado a distancia.

### 3.7.3.7 Cuadro de control de componentes hidráulicos

Compuesto por manómetros para controlar las diferentes presiones del proceso y puntos de toma de muestras de agua.

#### Manómetros de control:

- Grupo de presión de alimentación.
- Caída de presión filtro multicapa.
- Caída de presión filtración por cartuchos y presión de entrada grupo de alta presión.
- Presión de impulsión del grupo de alta presión.
- Caída de presión en cajas contenedores de membranas.
- Contrapresión del agua producto.

#### Caudalímetros (tipo rotámetro):

- Caudal de producto.
- Caudal de rechazo.
- Caudal de recirculación.

Parámetros	Valores
Manómetros	Wika
Material	AISI-316
Tipo	Glicerina
Diámetro esfera	65-100 mm
Rangos de medida	0-10/0-60 bar
Tuberías y accesorios de baja presión	PVC-PN10
Tuberías y accesorios de alta presión	AISI-316/SAE 100 R7, según diseño especial
Válvulas automáticas 2 vías/2 pos.	ABS
Válvulas de rechazo y alta presión	AISI-316

Tabla 3-18. Características técnicas del cuadro de control de componentes hidráulicos.

### 3.7.3.8 Sistema de lavado de post-paro y lavados de recuperación

El sistema de lavado actúa automáticamente cuando el equipo para. El sistema efectúa un lavado a las membranas y a la bomba de alta presión con agua producto.

Con este sistema se reducen las incrustaciones por precipitación en las membranas y se arrastran sedimentos que se puedan haber depositado en las mismas y en la bomba de alta presión.

El sistema está mandado por el microprocesador del cuadro de control electrónico y está compuesto por una bomba en material inoxidable, tanque de alimentación, válvulas automáticas y sistema biocida.

El mismo circuito está equipado con las válvulas correspondientes para efectuar lavados químicos de recuperación de membranas, cuando sea necesario.

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Caudal a 2 bar	654 m <sup>3</sup> /h
Potencia motor	3 × 22 kW
Tensión eléctrica	220/380 V
Velocidad de giro	2.900 r.p.m.
Material del cuerpo de la bomba	Acero inoxidable 316
Tanque de acumulación	4 × 50 m <sup>3</sup>
Material	P.R.F.V.
Potencia del V.E.F.	3 × 22 kW

Tabla 3-19. Características técnicas del sistema de lavado.

## 3.8 PESOS DE LOS COMPONENTES

Los pesos aproximados de las partes principales de la planta (líquidos incluido) son:

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Filtros multicapa	568.795 kg
Racks de membranas	41.522 kg
Tanques de lavado	55.000 kg
Bombas, filtros, armarios y resto	27.090 kg
<b>Total</b>	<b>692.407 kg</b>

Tabla 3-20. Peso de componentes.

Nota: Los filtros multicapas se pueden pedir para exterior, siendo la obra civil de menor envergadura.

### 3.9 COSTES OPERATIVOS

#### 3.9.1 Consumo Eléctrico

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Potencia absorbida	61,32 kW
Consumo específico..... (sin mezcla: 6.055 m <sup>3</sup> /día)	0,24 kWh/m <sup>3</sup>
Consumo energético..... (con mezcla: 13.119 m <sup>3</sup> /día)	0,11 kWh/m <sup>3</sup>
Coste mensual..... (0,15 €/kWh)	6.622 €/mes

Tabla 3-21. Coste mensual del consumo eléctrico.

Nota. Las potencias y consumos son a la puesta en marcha con una conversión del 60%.

#### 3.9.2 Consumibles

##### 3.9.2.1 Antiincrustantes KC-3000

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Dosificación	4 ppm
Consumo mensual	1.211 kg/mes
Precio unitario	4,12 €/kg
Coste mensual	4.989 €/mes

Tabla 3-22. Coste mensual del antiincrustante.

##### 3.9.2.2 Metabisulfito

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Dosificación	4 ppm
Consumo mensual	1.211 kg/mes
Precio unitario	1,78 €/kg
Coste mensual	2.156 €/mes

Tabla 3-23. Coste mensual del metabisulfito.

### 3.9.3 Fungibles

#### 3.9.3.1 Filtros de seguridad

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Unidades (incluidas los de la miniplanta MA-55-RS)	122 Uds.
Cambio (100% semestralmente)	21 Uds./mes
Precio unitario	211,43 €/Ud.
Coste mensual	4.440 €/mes

*Tabla 3-24. Coste de los filtros de seguridad prorrateado mensualmente.*

#### 3.9.3.2 Membranas

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Unidades (incluidas los de la miniplanta MA-55-RS)	1.140 Uds.
Cambio (15% anualmente)	15 Uds./mes
Precio unitario	857,15 €/Ud.
Coste mensual	12.857 €/mes

*Tabla 3-25. Coste de las membranas prorrateado mensualmente.*

### 3.9.4 Costes totales

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Coste mensual total	31.064 €/mes
Coste por m <sup>3</sup> (13.119 m <sup>3</sup> /día)	0,08 €/m <sup>3</sup>

*Tabla 3-26. Coste total mensual y por m<sup>3</sup> de agua regenerada producida.*

### **3.10 GARANTÍA DE FUNCIONAMIENTO**

#### **3.10.1 Durabilidad del sistema**

En los sistemas de tratamiento de aguas de EDAR por medio de membranas, uno de los elementos más importantes a tener en cuenta es el factor de ensuciamiento irreversible de las mismas, y como consecuencia, su período de vida operativa útil.

En los sistemas de OIR el factor de ensuciamiento de las membranas coincide con el factor de envejecimiento natural de las mismas, ocasionado por el paso del tiempo, por lo cual, en la mayoría de los casos, es el sistema más recomendable por costes operativos y por su facilidad de operación.

#### **3.10.2 Fiabilidad del sistema**

El fabricante garantiza los parámetros indicados en la oferta en cuanto al caudal y condiciones químicas del agua tratada, siempre y cuando se cumplan los datos operativos de diseño y características del agua a tratar especificados en la memoria.

Esta garantía se da con la condición de que la instalación y los mantenimientos se realicen según normas del fabricante.

Se garantiza el material contra cualquier defecto de fabricación durante UN AÑO, a partir de la fecha del suministro. Esta garantía está limitada a la sustitución en fábrica de las piezas aceptadas como defectuosas, sin ninguna otra obligación.

#### **3.10.3 Garantía de las membranas**

La fecha de comienzo de la garantía de las membranas será la de la puesta en marcha de la planta de tratamiento de Osmosis Inversa Reversible, siempre y cuando esta fecha no sobrepase los dos meses de la salida del equipo de fábrica.

La duración del tiempo de garantía de las membranas será de TRES AÑOS, en los siguientes términos:

Se garantiza que, para cumplir los parámetros de funcionamiento, tales como caudal de producción y fuga de sales, la máxima reposición de membranas por cuenta del cliente no será superior al 25% anual en forma acumulativa, es decir, 75% al cabo de 3 años.

Todas las membranas que sean precisas reponer superior al 25% anual, con objeto de volver a obtener los parámetros de funcionamiento (caudal y fuga de sales), serán suministradas gratuitamente por el fabricante.

La validez de la garantía se hará efectiva siempre y cuando la explotación de la planta se realice de acuerdo con las normas establecidas en las Instrucciones de Funcionamiento y Mantenimiento facilitadas por el fabricante y se cumplan los datos de diseño y características del agua a tratar especificados en la memoria. El porcentaje máximo de fuga de sales garantizado del sistema es del 20% anual.

### 3.11 PRESUPUESTO

A continuación, se presenta el presupuesto:

<b>Conceptos</b>	<b>Importes (€)</b>
Equipos del grupo de alimentación de agua	148.565,22
Filtración por mallas autolimpiantes	46.672,38
Filtración multicapa	2.569.013,52
Esterilización ultravioleta	39.807,60
Turbidímetro y conductímetro de agua de aporte con sistema de limpieza automática	12.679,94
Turbidímetro de agua pretratada	8.106,12
Equipos de Ósmosis Inversa de Flujo Reversible MA-6000-RS	3.222.236,75
Miniplanta MA-55-RS	222.833,67
<b>Subtotal:</b>	
<b>Ingeniería, Fabricación y Suministro de Equipos Electromecánicos</b>	<b>6.269.915,20</b>
Dirección técnica (asistencia técnica en obra, supervisión y revisión de la instalación)	188.097,45
Puesta en marcha (verificación del montaje, pruebas de funcionamiento, ajustes iniciales, formación básica)	94.048,73
Asistencia técnica quincenal durante el primer año de funcionamiento de técnico especializado	97.488,00
<b>Subtotal:</b>	
<b>Servicios de Asistencia Técnica Especializada</b>	<b>379.634,18</b>
<b><u>IMPORTE TOTAL: PROYECTO DE SUMINISTRO Y SERVICIOS TÉCNICOS</u></b>	
<b>SEIS MILLONES SEISCIENTOS CUARENTA Y NUEVE MIL QUINIENTOS CUARENTA Y NUEVE EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS</b>	<b>6.649.549,38</b>

*Tabla 3-27. Presupuesto del proyecto de ingeniería, fabricación, suministro y servicios técnicos de la planta MA-6000-RS.*

El presupuesto incluye:

- La ingeniería de detalle.
- Fabricación de los equipos electromecánicos.
- Suministro de todos los equipos descritos incluido el embalaje y el transporte a pie de obra.
- Miniplanta de testeo que se instalará previamente mientras se fabrica e instala la planta principal, la cual servirá de pruebas para calibrar y poder operar correctamente la planta principal.
- Dirección técnica (asistencia en obra, supervisión y revisión de la instalación).
- Puesta en marcha de las plantas (verificación del montaje, pruebas de funcionamiento, ajustes iniciales y formación básica del personal).
- Visita quincenal durante el primer año de funcionamiento por parte de técnico especializado.

El presupuesto no incluye:

- Proyecto.
- IVA, ni ningún tipo de impuesto, tasa o gravamen.
- Acometidas de electricidad, agua y desagüe, los cuales deberán estar ubicados en el lugar del emplazamiento.
- Descarga y ubicación en su emplazamiento.
- Obra civil para la ubicación de los equipos.
- Tuberías y accesorios para la interconexión de los componentes del sistema.
- Instalación.
- Se estima un presupuesto de las partidas no incluidas de un 30% del importe total del suministros de equipos y servicios técnicos, aproximadamente 2 millones de euros.

**Importe total aproximado de la planta (sin impuestos): 8.650.000 €**

**(OCHO MILLONES SEISCIENTOS CINCUENTA MIL EUROS).**

### 3.12 LIMITACIONES Y CONSIDERACIONES

Aunque la OIR ofrece múltiples ventajas, existen algunas limitaciones a considerar:

- **Coste inicial elevado:** La inversión inicial puede ser prohibitiva para pequeñas comunidades de regantes o municipios si no cuentan con algún tipo de ayuda o subvención.
- **Gestión de rechazos:** El agua de rechazo generada durante el proceso debe ser gestionada adecuadamente para evitar impactos ambientales negativos.
- **Calidad del agua de entrada:** La OIR, al igual que la ultrafiltración + ósmosis inversa tradicional, es menos efectiva cuando el agua de entrada contiene contaminantes complejos que no pueden ser eliminados en la etapa de pretratamiento.

En resumen, la metodología para implementar la ósmosis inversa reversible en la producción de agua regenerada combina un diseño optimizado, un análisis técnico y energético detallado, y una evaluación económica que garantiza la viabilidad del sistema. Esta tecnología representa una solución sostenible y eficiente para abordar los desafíos hídricos en Andalucía y otras regiones con problemas similares.

### 3.13 IMPACTO EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

La implementación de la OIR fomenta un modelo de economía circular al cerrar el ciclo del agua. Los principales beneficios incluyen:

- **Reducción de la presión sobre recursos naturales:** El uso de aguas regeneradas evita la extracción excesiva de agua subterránea y reduce la competencia por recursos destinados al consumo humano.
- **Valorización de aguas residuales:** La regeneración convierte un residuo en un recurso valioso, mejorando la sostenibilidad ambiental y económica.
- **Ahorro en fertilizantes:** El agua regenerada puede contener nutrientes beneficiosos para el riego, reduciendo la necesidad de insumos químicos en la agricultura.

### 3.14 VENTAJAS ECONÓMICA A LARGO PLAZO

La OIR no solo es competitiva a corto plazo, sino que ofrece ventajas económicas sostenibles a largo plazo:

- **Reducción de costes de operación:** Gracias a su eficiencia energética y menores necesidades de mantenimiento.
- **Mayor valor añadido:** Al proporcionar agua de alta calidad para sectores como la agricultura de exportación y el turismo, que demandan recursos hídricos fiables y sostenibles.

- **Cumplimiento normativo:** La tecnología se ajusta a los estándares europeos, lo que evita sanciones y facilita la obtención de licencias y permisos.

En resumen, el análisis energético y económico demuestra que la ósmosis inversa reversible es una solución sostenible y económicamente viable para la producción de agua regenerada. Sus bajos costes operativos, su retorno de inversión competitivo y su alineación con los principios de la economía circular la convierten en una tecnología clave para abordar los desafíos hídricos.

## Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados derivados del análisis técnico, económico y ambiental del uso de la ósmosis inversa reversible en la producción de agua regenerada de baja conductividad. Además, se discuten los beneficios obtenidos en términos de sostenibilidad y viabilidad para aplicaciones agrícolas y recreativas, así como las comparaciones con tecnologías alternativas.

### 4.1 RESULTADOS TÉCNICOS

#### 4.1.1 Calidad del agua regenerada

Los sistemas de OIR permiten obtener agua regenerada con parámetros de calidad adecuados para riego agrícola y recreativo:

- **Conductividad eléctrica (CE):** Reducción de ésta a valores óptimos para cultivos sensibles como aguacates, mangos y cítricos o riego de greens.
- **Eliminación de sales:** Capacidad para reducir la salinidad, minimizando el impacto de la acumulación de sales en el suelo y las raíces de las plantas.
- **Control microbiológico:** Eliminación de microorganismos mediante desinfección por rayos UV y ultrasonidos, garantizando la seguridad del agua para su uso en cultivos y áreas recreativas.

#### 4.1.2 Rendimiento del sistema

- **Tasa de recuperación:** Entre el 50% y el 70%, dependiendo de la calidad del agua de entrada. Este rango asegura un uso eficiente del recurso hídrico y reduce el volumen de rechazo.
- **Durabilidad de las membranas:** Vida útil de las membranas de 7 a 10 años, superando significativamente a las membranas tradicionales (3-5 años), gracias a los sistemas avanzados de control de ensuciamiento.

### 4.2 RESULTADOS ECONÓMICOS

#### 4.2.1 Costes operativos

Los sistemas de OIR destacan por su competitividad económica, en comparación con la ósmosis inversa tradicional, ofreciendo ahorros significativos tanto en términos energéticos como de mantenimiento.

#### 4.2.2 Comparativa económica: Retorno de la inversión

- **Amortización:** Entre 5 y 7 años para una planta con capacidad de 6.000 m<sup>3</sup>/día de agua producto osmotizada (13.119 m<sup>3</sup> de agua mezclada para uso).

- **Ahorros acumulados:** Reducción de costes operativos en un 25%-30% respecto a sistemas tradicionales, lo que se traduce en una mejora de la rentabilidad para los operadores de riego agrícola y campos de golf.

## 4.3 RESULTADOS AMBIENTALES

### 4.3.1 Impacto positivo en el medio ambiente

La implementación de la OIR contribuye a la sostenibilidad ambiental al:

- **Reducir la extracción de recursos hídricos naturales:** El uso de aguas regeneradas disminuye la presión sobre acuíferos y fuentes de agua potable.
- **Minimizar la salinización del suelo:** La reducción de sales en el agua regenerada evita problemas de acumulación salina, mejorando la calidad y la productividad del suelo.

### 4.3.2 CONTRIBUCIÓN AL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El uso de agua regenerada mediante tecnologías como la ósmosis inversa reversible, contribuye directamente al cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible adoptados por Naciones Unidas:

- **ODS 6: Agua limpia y saneamiento.**

La OIR permite reutilizar agua residual tratada, liberando recursos hídricos de mayor calidad para el consumo humano y otros usos prioritarios. Esto fomenta una gestión más sostenible del recurso hídrico.

- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.**

Al reducir el consumo energético respecto a tecnologías tradicionales, la OIR apoya la transición hacia sistemas más eficientes y sostenibles desde el punto de vista energético.

- **ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.**

La OIR representa una innovación tecnológica en el tratamiento de aguas regeneradas, mejorando la eficiencia del proceso, fomentando infraestructuras más sostenibles y promoviendo la transferencia tecnológica hacia un modelo industrial más sostenible.

- **ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.**

Su aplicación en entornos urbanos y turísticos (como jardines y campos de golf) permite una gestión más eficiente del agua, reduciendo la presión sobre recursos hídricos convencionales en ciudades vulnerables a la sequía.

- **ODS 12: Producción y consumo responsable.**

La reutilización de aguas regeneradas para riego promueve una economía circular, reduciendo la dependencia de recursos hídricos naturales y minimizando el impacto ambiental del tratamiento de aguas residuales.

- **ODS 13: Acción por el clima.**

Al reducir la captación de recursos hídricos naturales y mejorar la eficiencia energética de los procesos de tratamiento, la tecnología propuesta ayuda a disminuir la huella de carbono y a fortalecer la adaptación frente a fenómenos climáticos extremos, especialmente en zonas con estrés hídrico.

- **ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres.**

Al evitar la sobreexplotación de acuíferos y minimizar la salinización del suelo, esta tecnología contribuye a la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad.

- **ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos**

El desarrollo e implementación de la tecnología OIR está siendo posible gracias a la colaboración entre empresas especializadas e instituciones públicas y académicas. Esta cooperación público-privada promueve la transferencia de conocimiento, el desarrollo sostenible y la escalabilidad de soluciones innovadoras en el ámbito del agua.

## 4.4 DISCUSIÓN CRÍTICA

### 4.4.1 Viabilidad técnica

Los resultados demuestran que la OIR es una solución técnicamente viable para producir agua regenerada de alta calidad. Su capacidad para reducir la conductividad eléctrica y eliminar contaminantes la hace adecuada para aplicaciones agrícolas y recreativas.

### 4.4.2 Viabilidad económica

A pesar de su coste inicial, la OIR es económicamente competitiva a largo plazo debido a sus bajos costes operativos y su alto rendimiento. Esto la convierte en una opción preferente para operadores de sistemas de riego en áreas afectadas por la sequía.

### 4.4.3 Sostenibilidad ambiental

La OIR no solo aborda los desafíos técnicos y económicos, sino que también tiene un impacto positivo en la sostenibilidad ambiental, promoviendo la economía circular y reduciendo la presión sobre los recursos hídricos naturales.

## **Capítulo 5. CONCLUSIONES**

En este capítulo se sintetizan los hallazgos principales derivados del análisis técnico, económico y normativo realizado a lo largo de este trabajo, destacando las ventajas y limitaciones de la ósmosis inversa reversible como tecnología para la producción de agua regenerada de baja conductividad.

### **5.1 IMPACTO TÉCNICO**

#### **5.1.1 Eficiencia en el tratamiento del agua**

La OIR ha demostrado ser una tecnología eficaz para la obtención de agua regenerada con parámetros de calidad adecuados para riego agrícola y recreativo. La capacidad del sistema para reducir la conductividad eléctrica permite mitigar problemas como la salinización del suelo y el deterioro de cultivos sensibles. Además, la eliminación de microorganismos patógenos garantiza la seguridad del agua tratada para aplicaciones agrícolas y recreativas.

#### **5.1.2 Innovación tecnológica**

El diseño avanzado de las membranas de flujo reversible, junto con sistemas de control electrónico para minimizar el ensuciamiento, posiciona a la OIR como una solución innovadora frente a tecnologías tradicionales como la ósmosis inversa convencional. Estos avances contribuyen a prolongar la vida útil de los componentes (Suárez et al., 2023) y a mejorar la eficiencia del sistema, haciendo que sea más competitivo a largo plazo.

### **5.2 IMPACTO ECONÓMICO**

#### **5.2.1 Competitividad operativa**

Con un coste operativo bajo, la OIR es una tecnología económicamente viable en comparación con otras alternativas como la ósmosis inversa tradicional y la desalación térmica. Este ahorro se logra gracias a su menor consumo energético y la reducción de los costes asociados al mantenimiento y reemplazo de membranas.

#### **5.2.2 Retorno de la inversión**

El período de amortización estimado para una planta de OIR es de 5 a 7 años, dependiendo de factores como la capacidad de tratamiento y las condiciones locales de operación. Este retorno de inversión competitivo, junto con las posibles subvenciones y ayudas disponibles en el marco de políticas europeas como el Pacto Verde Europeo, refuerza su viabilidad económica (García-López, 2024).

## **5.3 IMPACTO AMBIENTAL**

### **5.3.1 Contribución a la economía circular**

La reutilización de aguas residuales tratadas mediante OIR promueve un modelo de economía circular al convertir un residuo en un recurso valioso (AEDyR, s.f.). Este enfoque no solo reduce la presión sobre los recursos hídricos naturales, sino que también minimiza la generación de residuos, contribuyendo a un uso más eficiente y sostenible del agua.

### **5.3.2 Reducción de impactos ambientales**

La OIR permite reducir la extracción de agua de fuentes naturales, mitigando problemas como la sobreexplotación de acuíferos y la intrusión salina en zonas costeras. Además, al evitar la salinización del suelo y mejorar la calidad del agua de riego, contribuye a la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad en áreas agrícolas y recreativas.

### **5.3.3 Alineamiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS)**

El presente trabajo demuestra que la aplicación de tecnologías como la ósmosis inversa reversible para la producción de agua regenerada no solo es técnicamente viable, sino que representa una herramienta estratégica para avanzar en el cumplimiento de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible impulsados por Naciones Unidas.

Contribuye directamente a la mejora del acceso a recursos hídricos alternativos (ODS 6), a la eficiencia energética en el tratamiento de aguas (ODS 7), al impulso de la innovación tecnológica en infraestructuras de tratamiento de agua (ODS 9), al refuerzo de la sostenibilidad hídrica en entornos urbanos y turísticos (ODS 11), a la transición hacia modelos de producción más sostenibles (ODS 12), favoreciendo la adaptación al cambio climático mediante la reducción del consumo de recursos y energía (ODS 13), a la preservación de los ecosistemas terrestres mediante una gestión hídrica más responsable (ODS 15) y a la promoción de la colaboración entre actores públicos y privados para acelerar la implementación de soluciones sostenibles (ODS 17).

Este alineamiento con los ODS refuerza el valor ambiental de la solución propuesta, consolidándola como una alternativa eficaz dentro de un enfoque de economía circular y sostenibilidad hídrica.

## **5.4 LIMITACIONES Y DESAFÍOS**

### **5.4.1 Coste inicial elevado**

Aunque la OIR presenta ventajas económicas a largo plazo, su inversión inicial sigue siendo considerable, lo que puede ser un obstáculo para pequeños municipios y comunidades de regantes. Es necesario promover mecanismos de financiación y subvenciones que faciliten su adopción.

#### **5.4.2 Gestión de rechazos**

El agua de rechazo generada durante el proceso de OIR debe ser gestionada adecuadamente para evitar impactos negativos en el medio ambiente. Esto incluye el tratamiento adicional del rechazo o su reutilización en aplicaciones industriales o recreativas. En las zonas costeras, sin embargo, esto no es un problema, ya que el mismo puede ir retornado al mar mediante el emisario submarino que toda EDAR debe tener, siendo la conductividad inyectada mucho menor que la de la propia masa receptora.

#### **5.4.3 Aceptación social**

A pesar de los beneficios demostrados, persiste cierta resistencia social al uso de agua regenerada, especialmente en el sector agrícola. Campañas de sensibilización y programas educativos son fundamentales para aumentar la confianza en esta tecnología.

### **5.5 CONCLUSIÓN GENERAL**

La OIR se presenta como una tecnología innovadora, sostenible y económicamente viable para la producción de agua regenerada en contextos de escasez hídrica tanto cíclicas como permanente. Su implementación no solo aborda los desafíos inmediatos de la crisis hídrica, sino que también contribuye al desarrollo de un modelo de gestión hídrica más resiliente y sostenible. La adopción de esta tecnología puede posicionar a España como líder en soluciones hídricas avanzadas, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y acción climática.

## Capítulo 6. RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La implementación de la ósmosis inversa reversible para la producción de agua regenerada de baja conductividad en Andalucía presenta oportunidades significativas para mejorar la gestión hídrica y promover la sostenibilidad. Sin embargo, su adopción efectiva requiere abordar ciertos desafíos y explorar áreas de investigación que optimicen su aplicación. A continuación, se presentan recomendaciones y líneas futuras de investigación para maximizar los beneficios de la OIR en este contexto.

### 6.1 RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA OIR

#### 6.1.1 Desarrollo de Políticas Públicas de Apoyo

Se recomienda que las administraciones públicas desarrollen políticas y marcos regulatorios que promuevan la adopción de la OIR, incluyendo incentivos económicos y programas de formación para operadores y usuarios.

- **Incentivos Económicos:** Establecer subvenciones y programas de financiación que reduzcan las barreras económicas para la adopción de la OIR, especialmente en comunidades agrícolas y municipios con recursos limitados.
- **Marcos Regulatorios Claros:** Actualizar y armonizar las normativas relacionadas con el uso de aguas regeneradas, facilitando la implementación de tecnologías avanzadas como la OIR y asegurando el cumplimiento de estándares de calidad.

#### 6.1.2 Fomento de la Aceptación Social

- **Campañas de Sensibilización:** Implementar programas educativos que informen a la población sobre los beneficios y la seguridad del uso de agua regenerada tratada con OIR, reduciendo prejuicios y aumentando la aceptación social (AEDyR, s.f.).
- **Participación Comunitaria:** Involucrar a las comunidades locales en el proceso de planificación y decisión, promoviendo la transparencia y generando confianza en las tecnologías de reutilización de agua.

#### 6.1.3 Optimización Técnica y Operativa

- **Capacitación Profesional:** Desarrollar programas de formación para técnicos y operadores, asegurando una gestión eficiente y sostenible de las plantas de OIR.
- **Monitoreo y Mantenimiento:** Implementar sistemas avanzados de monitoreo en tiempo real que permitan una operación óptima y la detección temprana de posibles fallos o necesidades de mantenimiento.

## 6.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Es esencial continuar invirtiendo en la investigación de tecnologías complementarias que optimicen aún más el rendimiento de la OIR, como sistemas avanzados de recuperación de energía, materiales más resistentes para las membranas y disminución del uso de químicos: aunque el sistema de OIR ha conseguido reducir el empleo de sustancias químicas al disminuir considerablemente los lavados químicos de membranas, el uso de ozono como sustituto del hipoclorito sódico en la desinfección de la línea de agua, podría ser un paso muy interesante a seguir (Zhao X. et al, 2019).

### 6.2.1 Innovación en Materiales de Membranas

- **Desarrollo de Membranas Resistentes al Ensuciamiento:** Investigar nuevos materiales y recubrimientos que reduzcan el ensuciamiento y *biofouling* en las membranas de OIR, prolongando su vida útil y mejorando la eficiencia del proceso.
- **Membranas de Alta Selectividad:** Diseñar membranas que ofrezcan una mayor selectividad en la eliminación de contaminantes específicos, optimizando la calidad del agua regenerada para distintos usos.

### 6.2.2 Integración de Energías Renovables

- **Sistemas Híbridos:** Explorar la integración de la OIR con fuentes de energía renovable, como la solar o eólica, para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono asociadas al proceso.
- **Almacenamiento de Energía:** Desarrollar soluciones de almacenamiento que permitan una operación continua y eficiente de las plantas de OIR, incluso con la variabilidad inherente a las energías renovables.

### 6.2.3 Gestión y Valorización de Rechazos y Alternativas en Desinfección

- **Tratamiento de Concentrados:** Investigar métodos sostenibles para el tratamiento y disposición de los rechazos generados en el proceso de OIR, minimizando su impacto ambiental.
- **Recuperación de Recursos:** Desarrollar tecnologías que permitan la recuperación de sales y otros componentes valiosos presentes en los rechazos, contribuyendo a la economía circular.
- **Uso del Ozono:** Valorar la sustitución del uso de hipoclorito sódico como producto oxidante para lograr la desinfección de la línea de agua, por ozono autogenerado (probablemente se pueda prescindir incluso de la esterilización por rayos ultravioletas), lo que favorecerá incluso la durabilidad de las membranas. Esto no tiene que ver con el uso de hipoclorito sódico residual tras la obtención de agua regenerada.

## 6.2.4 Evaluación de Impactos Ambientales y Sociales

- **Análisis de Ciclo de Vida:** Realizar estudios que evalúen el impacto ambiental de la OIR a lo largo de todo su ciclo de vida, identificando oportunidades para mejorar su sostenibilidad.
- **Estudios Socioculturales:** Investigar las percepciones y actitudes de las comunidades hacia el uso de agua regenerada, desarrollando estrategias para aumentar su aceptación y participación.

## 6.2.5 Expansión de la Aplicación de la OIR

Aunque la OIR ha demostrado su efectividad en riego agrícola y recreativo, su potencial aplicación en otros sectores, como la industria y la recarga de acuíferos, debe ser explorada para maximizar sus beneficios.

## 6.2.6 Colaboración y Transferencia de Conocimiento

### 6.2.6.1 *Redes de Investigación y Desarrollo*

- **Consortios Multidisciplinarios:** Fomentar la creación de consorcios que integren universidades, centros de investigación, empresas y administraciones públicas para impulsar la innovación en tecnologías de tratamiento de agua.
- **Proyectos Internacionales:** Participar en iniciativas y proyectos internacionales que permitan el intercambio de conocimientos y experiencias en la aplicación de la OIR y otras tecnologías sostenibles.

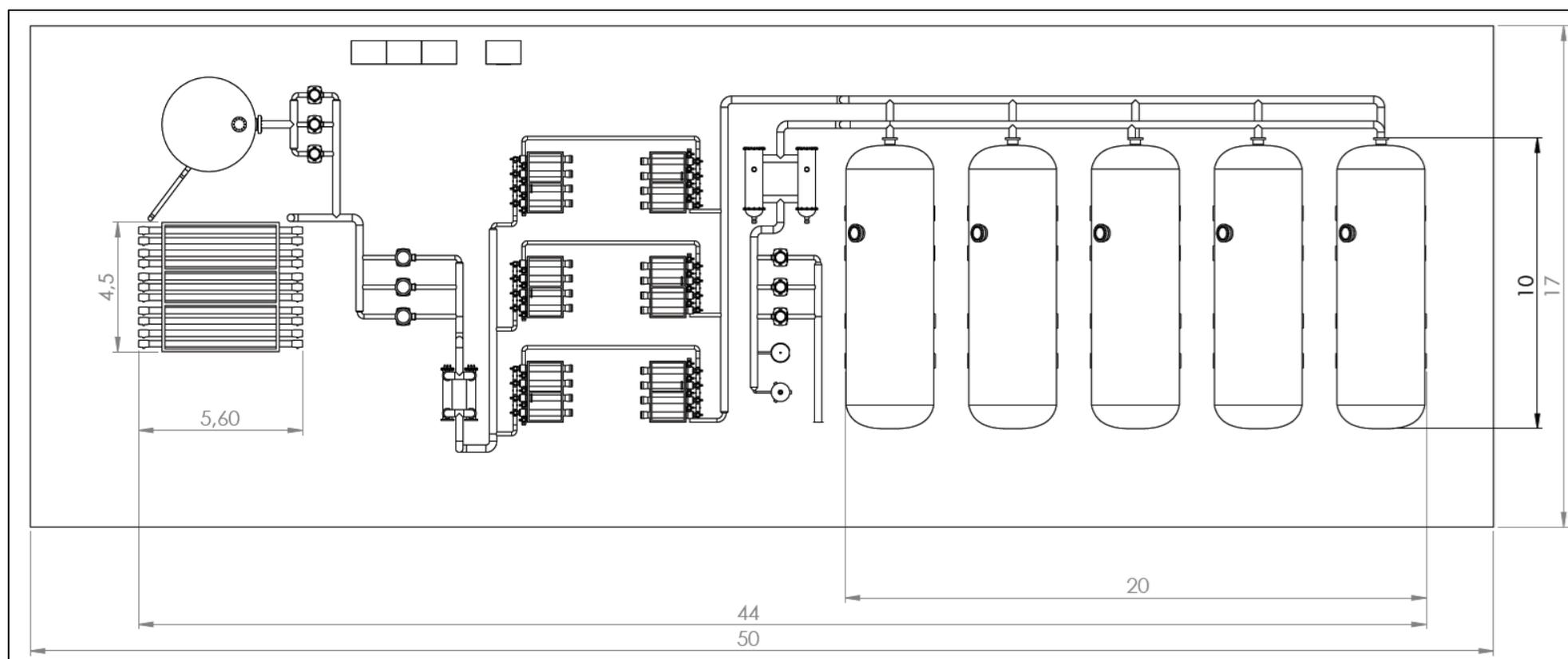
### 6.2.6.2 *Difusión y Educación*

- **Publicaciones y Conferencias:** Promover la difusión de los avances y resultados de investigaciones sobre la OIR en revistas científicas y conferencias especializadas, facilitando el acceso a la información.
- **Programas Educativos:** Incorporar contenidos sobre tecnologías de tratamiento de agua y sostenibilidad hídrica en los currículos educativos, formando a las futuras generaciones en la gestión responsable del agua.

En conclusión, la implementación efectiva de la ósmosis inversa reversible requiere un enfoque integral que combine políticas públicas de apoyo, innovación tecnológica, aceptación social y colaboración entre diversos actores. Abordar las áreas de investigación propuestas permitirá optimizar el uso de esta tecnología, contribuyendo a una gestión hídrica más sostenible y resiliente en la región.

## Capítulo 7. ANEXOS

### 7.1 ESQUEMA DE LOS EQUIPOS (VISTA 2D)



*Figura 7-1. Esquema 2D de los equipos.  
Cortesía de Integra.*

## 7.2 ESQUEMA DE LOS EQUIPOS (VISTA 3D)

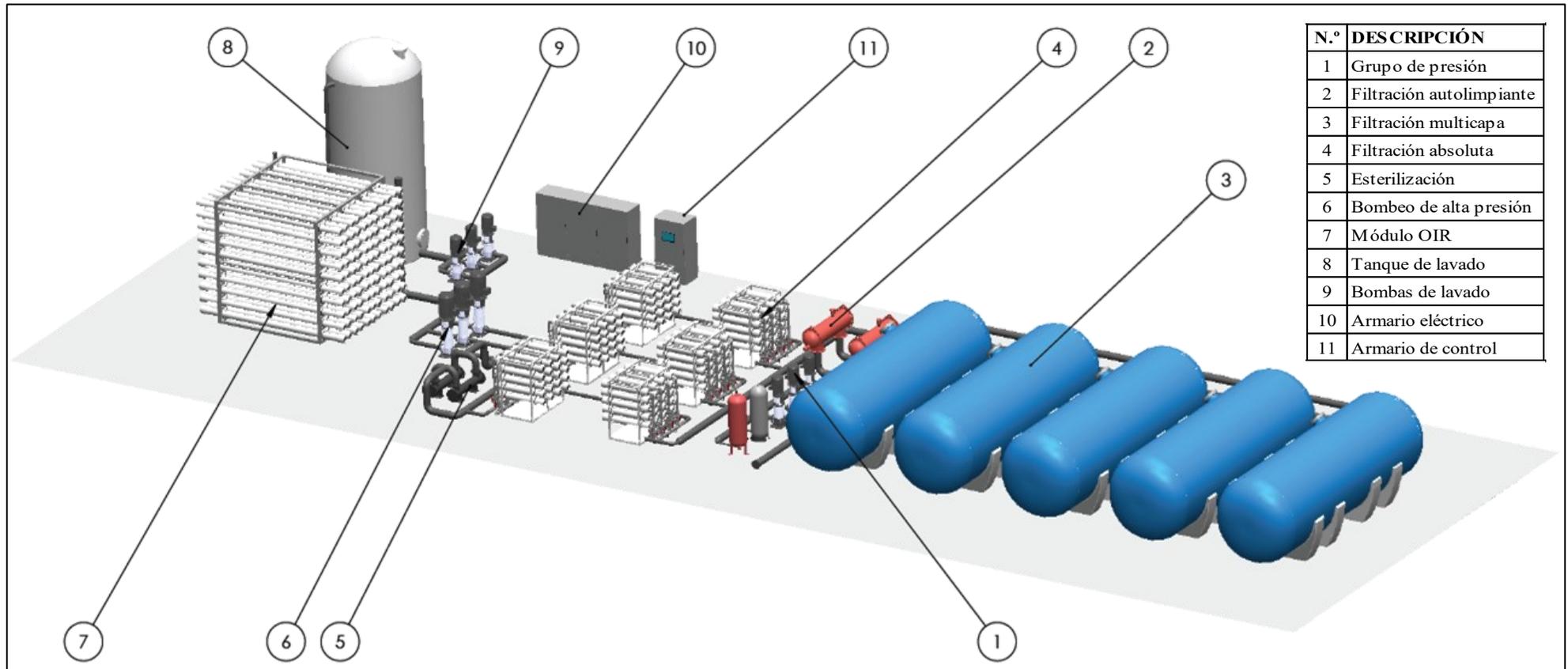


Figura 7-2 Esquema 3D de los equipos.  
Cortesía de Integra

## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

1. AEDyR. (s.f.). Tratamientos terciarios para la reutilización de agua. Asociación Española de Desalación y Reutilización. <https://aedyr.com/tratamientos-terciarios-reutilizacion-agua/>
2. Baeza, J. (2007). Reutilización de aguas residuales para riego. TFM. Universidad de Alicante. <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/gestadm/trabajos-fin-de-master/jaume-baeza.pdf>
3. Buenaventura Pouyfaucou, A. (2018). Technological challenges of seawater desalination: analysis of future opportunities. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla. [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/123456/Technological\\_challenges\\_of\\_seawater\\_desalination.pdf](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/123456/Technological_challenges_of_seawater_desalination.pdf)
4. Confederación de Empresarios de Málaga. [@CEM]. (25 de septiembre de 2024). #CEM, presente en el foro #GreencitiesMLG y #SMoving como parte del jurado de los Greencities & S-Moving Startup Europe [imagen adjunta]. X. <https://x.com/cemmalaga/status/1838967737730695669>
5. Consejo de Gobierno de la Junta de Andalucía (2025). Los embalses andaluces aumentan en 686 hm<sup>3</sup> en la última semana y se sitúan al 45,88%. <https://www.juntadeandalucia.es/organismos/consejo/sesion/detalle/569935.html>
6. Decreto-ley 2/2024, de 29 de enero. Por el que se aprueban medidas adicionales para paliar los efectos producidos por la situación de excepcional sequía a los usuarios de las demarcaciones hidrográficas intracomunitarias de Andalucía y se adoptan medidas urgentes, administrativas y fiscales, de apoyo al sector agrario. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía (BOJA), núm. 23, 2024. [https://www.juntadeandalucia.es/boja/2024/23/BOJA24-023-00001-1879-01\\_00191456.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/boja/2024/23/BOJA24-023-00001-1879-01_00191456.pdf)
7. Delgado González, C. I. (2017). Estudio experimental del rendimiento de nuevas membranas de osmosis inversa con capacidad antibioincrustante en la desalinización de agua utilizando una planta piloto.
8. Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), de 23 de octubre de 2000. Por el que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas (DOCE), núm. 327, 2000. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0060>
9. Drews, A. (2010). Membrane fouling in membrane bioreactors—Characterisation, contradictions, cause and cures. *Journal of membrane science*, 363(1-2), 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.06.046>
10. DuPont. (2024). Manual técnico de las membranas de ósmosis inversa FilmTec™. <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/es/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-es.pdf>

11. Feng, V. D., Van Deventer, J. S. J., & Aldrich, C. (2006). Ultrasonic defouling of reverse osmosis membranes used to treat wastewater effluents. *Separation and Purification Technology*, 50(3), 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.12.005>
12. Font, F. X. S., Bonet, J. B., Llacuna, J. L., & Montaña, J. G. (2014). Ósmosis directa: proceso y aplicaciones. *Tecnoaqua*, (7), 53-59. [smosis\\_directa\\_proceso\\_y\\_aplicaciones20210726-4765-1dyw31k.pdf](https://doi.org/10.1016/j.tecnoaqua.2014.07.005)
13. Fundación Finnova. (2024). Tecnologías avanzadas en el tratamiento de aguas regeneradas. Informe presentado en Greencities & S-Moving 2024. <https://finnova.eu/wp-content/uploads/2023/10/Informe-Tecnologias-Avanzadas-Finnova-Greencities.pdf>
14. García-López, M. (2024). Europeización y gobernanza hídrica y medioambiental: ajustes progresivos y elementos a debate en el caso de España. *Gestión Y Análisis De Políticas Públicas*, (34), 42–55. <https://doi.org/10.24965/gapp.11272>
15. López Ramírez, J. A., Sahuquillo Paul, S., Sales Márquez, D., & Quiroga Alonso, J. M. (2000). Uso de la ósmosis inversa para la regeneración de aguas residuales urbanas: Optimización del pretratamiento. *Ingeniería del Agua*, 7(2), 147–154. <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2842>
16. Medina San Juan, J. A. (1999). Desalación de aguas salobres y de mar: Ósmosis inversa. Mundi-Prensa.
17. Ramírez, J. S., Ribes, J., Ferrer, J., & García-Usach, M. F. (2017). Obtención de los principales parámetros del agua residual urbana empleados en los modelos matemáticos de fangos activados a partir de una caracterización analítica simple. *Ingeniería y Región*, 17, 33-48. <http://www.tecnoaqua.es/media...s-tendencias-tecnoaqua-es.pdf>
18. Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo. De desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*, núm. 77, 1996. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1996-7159>
19. Real Decreto 1085/2024, de 22 de octubre. Por el que se aprueba el Reglamento de reutilización del agua y se modifican diversos reales decretos que regulan la gestión del agua. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*, núm. 256, 2024. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2024-21701>
20. Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de mayo de 2020. Relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. *Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE)*, núm. 177, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0741>
21. Rodríguez-Bada, P. (2023). *Informe sobre la aplicación del reglamento de reutilización de las aguas regeneradas en riegos de campos de golf, parques y jardines y agricultura*. [Informe técnico interno, no publicado] Integra Tecnología del Agua.

22. Rodríguez-Bada, P. (2024). *Equipos de desalobración para producción de agua regenerada basados en ósmosis inversa reversible*. [Informe técnico interno, no publicado] Integra Tecnología del Agua.
23. Ruiz Sinoga, J.A. (2024, 3 de octubre). *El Foro Málaga 2024: Lecciones después de la sequía*. [Conferencia: La ordenación de recursos hídricos en áreas tensionadas]. Sociedad Económica de Amigos del País, Málaga, España.
24. Seguí Amórtegui, L.A. (2004). *Sistemas de regeneración y reutilización de aguas residuales. Metodología para el análisis técnico-económico y casos* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. TDX. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-94371>
25. Suárez, D., Ruiz, A., & De La Nuez, I. (2023). Modelo dinámico y simulación de sistemas de ósmosis inversa. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/129748>
26. Wang, J., Gao, X., Xu, Y., Wang, Q., Zhang, Y., Wang, X., & Gao, C. (2016). Ultrasonic-assisted acid cleaning of nanofiltration membranes fouled by inorganic scales in arsenic-rich brackish water. *Desalination*, 377, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.09.021>
27. Zhao, X., Wu, Y., Zhang, X., Tong, X., Wang, Y., Ikuno, N., Ishii, K., & Hu, H. (2019). Ozonation as an efficient pretreatment method to alleviate reverse osmosis membrane fouling caused by complexes of humic acid and calcium ion. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13(55). <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1139-y>