



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de un biorreactor de membranas para el
tratamiento del agua residual del campus de Vera de la
Universitat Politècnica de València

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Wen, Jibang

Tutor/a: Mendoza Roca, José Antonio

Cotutor/a: Bes Piá, M^a Amparo

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

DOCUMENTO 1.

MEMORIA

Documento 1. Memoria

Índice de la Memoria

1. Objetivo	1
2. Hipótesis de partida para el diseño y construcción de la planta depuradora	2
3. Motivación y justificación	3
3.1. Motivación	3
3.1.1. Motivación académica y personal	3
3.1.2. Motivación basada en la gestión sostenible del agua y el cambio climático ..	4
3.2. Justificación	6
3.2.1. Aspectos ambientales.....	6
3.2.2. Aspectos económicos	6
3.2.3. Aspectos sociales	7
3.2.4. Proporcionar oportunidades educativas y de investigación para los estudiantes	8
4. Relación con los objetivos de desarrollo sostenible	10
5. Composición y caudal de aguas residuales	12
5.1. Composición de aguas residuales	12
5.2. Análisis del consumo de agua en el campus de Vera y cálculo del caudal de agua a tratar	14
6. Estándares para el tratamiento y reutilización de aguas residuales.....	18
7. Alternativas de tratamiento	21
7.1. Alternativas para el tratamiento de aguas residuales	21
7.2. Alternativas para desinfección de aguas residuales	23
8. Biorreactores de membrana	25
8.1. El pretratamiento	25
8.2. Biorreactor de membrana.....	26
8.2.1. La zona anóxica	27
8.2.2. La zona aeróbica	29
8.2.3. Membranas.....	30
8.2.4. Sistema de aireación	35
8.2.5. Sistema de extracción de fangos	36
9. Diseño del biorreactor de membranas	37

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

9.1. Configuración de la planta depuradora MBR.....	37
9.2. Parámetro de diseño.....	38
9.2.1. Edad de fango (θ)	38
9.2.2. Sólidos en suspensión en el licor de mezcla	41
9.2.3. La carga másica (C_m).....	42
9.3. Cálculos de diseño y operación	43
9.3.1. Volumen del reactor	43
9.3.2. Dimensión del reactor biológico	45
9.3.3. Eliminación de nitrógeno y fósforo.....	46
9.3.4. Consumo total de oxígeno	47
9.3.5. Membrana seleccionada.....	50
9.3.6. Selección de los equipos en el sistema	52
10. Estudio económico	61
11. Conclusiones.....	64
12. Bibliografía	65

Índice de figuras

Figura 1. Situación respecto de la Sequía Prolongada. Marzo 2024.....	5
Figura 2. València, Capital Verde Europea 2024	8
Figura 3. Consumo de agua en el campus de Vera (Valencia)	14
Figura 4. Distribución del uso de agua de pozo UPV.....	15
Figura 5. Esquema de la planta de fangos activos	21
Figura 6. Esquema de SBR	22
Figura 7. Esquema de MBR	22
Figura 8. Canal de pretratamiento de aguas residuales.....	26
Figura 9. Esquema de tratamiento con MBR sin zona anóxica	28
Figura 10. Principio de filtración de membrana en la zona aeróbica (MBR)	31
Figura 11. Capas de la membrana tubular	32
Figura 12. Esquema de la membrana sumergida (izquierda) y externa (derecha)	33
Figura 13. Membrana tubular	33
Figura 14. Un módulo de membranas de fibra hueca.....	34
Figura 15. Difusores de sistema de aireación	35
Figura 16. Esquema del proceso MBR después del pretratamiento.....	38
Figura 17. Temperaturas máximas y mínimas promedio anuales en Valencia.....	39
Figura 18. Temperatura del agua de la red de Valencia	40
Figura 19. Relación entre la Temperatura del Agua y el Volumen del Reactor	44
Figura 20. α -factor vs. MLSS, según varios autores	49
Figura 21. SOTE del difusor de aire DSICO-325.....	49
Figura 22. Módulo de filtración por membrana de Alfa Laval con las membranas planas visibles	50
Figura 23. Difusores para la limpieza de membranas	52
Figura 24. Bomba KSB Etabloc con sistema PumpDrive.....	54
Figura 25. Bomba KSB instalada en seco EtaLine Pro	56
Figura 26. BOMBA GRUNDFOS ALPHA2 25-60.....	57
Figura 27. Agitador KSB AmaProp	57
Figura 28. Compresor pequeño KAESER modelo AIRCENTER	58
Figura 29. Compresor mediano KAESER modelo BSD	59

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Figura 30. El Sistema de desinfección Hidro-óptica Atlantium 60

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición típica de las aguas residuales domésticas	12
Tabla 2. parámetros de puntos de muestreo global.....	13
Tabla 3. Normas de parámetros para la descarga de aguas residuales domésticas.....	18
Tabla 4. Requisitos mínimos aplicables a las aguas regeneradas destinadas al riego agrícola	19
Tabla 5. Edad de fango en función de temperatura	40
Tabla 6. Datos de partida para el diseño del MBR.....	42
Tabla 7. Volumen de reactor en función de temperatura del agua residual.....	44
Tabla 8. Consumo específico de O ₂ (kgO ₂ /kgDBO ₅)	47
Tabla 9. Características de la membrana MFM 200.....	51
Tabla 10. Datos de funcionamiento	51
Tabla 11. Coste mensual en energía	61
Tabla 12. Coste mensual en personal	62
Tabla 13. Coste mensual en material requerido.....	62

1. Objetivo

El objetivo principal de este estudio es diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales para el campus universitario de Vera de la Universitat Politècnica de València (en adelante, UPV). La justificación y motivación para la construcción de esta planta depuradora radican en la necesidad de gestionar de manera eficiente las aguas residuales generadas en el campus, promoviendo la sostenibilidad y reduciendo el impacto ambiental.

Para lograr este objetivo, el primer paso es determinar la cantidad de aguas residuales generadas en el campus y analizar su composición. Esto proporcionará una base sólida para el diseño de la planta, asegurando que se adapte a las necesidades específicas del campus.

Desde una perspectiva tecnológica, se evaluarán las tecnologías más avanzadas y adecuadas para el tratamiento de aguas residuales, garantizando la eficiencia y efectividad del proceso.

Desde la perspectiva económica, se analizará la viabilidad de operar la planta de tratamiento de manera sostenible. Este análisis incluirá una comparación detallada de los costos asociados con la reutilización del agua tratada frente a la compra de agua de la red pública, con el fin de determinar la opción más rentable a largo plazo para la UPV.

Finalmente, se procederá con el diseño detallado de la planta, incluyendo cálculos específicos como el volumen de los reactores, la potencia necesaria para las bombas y otros componentes clave del sistema.

2. Hipótesis de partida para el diseño y construcción de la planta depuradora

Es importante evaluar completamente la viabilidad y los impactos de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus. Esta iniciativa tendrá un impacto significativo no solo en el medio ambiente y las operaciones dentro del campus, sino también en las comunidades y ecosistemas circundantes. Por lo tanto, debemos profundizar sobre diversos factores, incluidos los aspectos ambientales, económicos, sociales y tecnológicos, para asegurarnos de tomar decisiones informadas y maximizar el impacto positivo de las mismas. Es necesario explorar los siguientes aspectos clave de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus:

- Necesidad y demanda de la planta de tratamiento de aguas residuales: Es importante realizar un análisis detallado para determinar la carga actual y futura de aguas residuales generadas en el campus. Este análisis debería incluir no solo las necesidades actuales, basadas en la población estudiantil y administrativa existente, sino también proyecciones futuras que consideren el crecimiento potencial y la expansión del campus. Así mismo, se deben evaluar las capacidades de las infraestructuras existentes y la eficacia de los métodos de tratamiento actuales para manejar eficientemente los volúmenes proyectados.
- Viabilidad económica: El análisis económico debe cubrir todos los costos asociados con la operación y mantenimiento de la planta, comparando el costo de la reutilización de las aguas depuradas con el costo del agua de la red pública, a fin de demostrar que, desde una perspectiva a largo plazo, la reutilización de las aguas depuradas es viable.

A través de una evaluación integral de estos aspectos, podremos comprender mejor el impacto de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus y en la comunidad circundante, y proporcionar información valiosa para futuras decisiones, con el fin de tomar decisiones sabias y sostenibles, garantizando al mismo tiempo que se satisfagan al máximo las necesidades e intereses del campus y la comunidad.

3. Motivación y justificación

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de Vera de la UPV es una iniciativa motivada por múltiples factores que destacan la importancia de este proyecto. En primer lugar, la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la gestión eficiente de los recursos naturales impulsa la necesidad de implementar soluciones innovadoras para el tratamiento de aguas residuales. Además, el cambio climático y sus efectos, como las sequías prolongadas y la disminución de los recursos hídricos, subrayan la urgencia de adoptar medidas proactivas para garantizar la disponibilidad de agua de calidad para su reutilización. Por último, la responsabilidad social y educativa de la universidad en la formación de estudiantes comprometidos con la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible añade una dimensión educativa y de concienciación pública a esta iniciativa. A continuación, se detallarán las distintas motivaciones que justifican y respaldan este proyecto.

3.1. Motivación

A continuación, se presentarán las motivaciones que llevaron a considerar la construcción de una depuradora en la UPV:

- Motivación Académica y Personal
- Motivación Basada en la Gestión Sostenible del Agua y el Cambio Climático

3.1.1. Motivación Académica y Personal

La necesidad de abordar de manera eficiente y sostenible la gestión de los recursos hídricos, especialmente en el contexto del cambio climático, ha cobrado una importancia crucial tanto a nivel institucional como personal. En la UPV, particularmente en el campus de Vera, la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales representa una oportunidad estratégica para enfrentar los desafíos asociados con la escasez de agua y el incremento de las temperaturas.

Mi interés personal en este proyecto se ha visto profundizado por mis estudios de Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales, donde la asignatura de Tecnología del Medio Ambiente despertó en mí una conciencia sobre la importancia de la gestión adecuada de los residuos y recursos naturales. Además, mi vivencia directa de los efectos de la sequía en España, evidenciada por numerosas noticias durante el último año sobre las dificultades de muchas regiones para acceder a agua potable, me ha hecho comprender aún más la necesidad urgente de implementar soluciones sostenibles.

Este Trabajo Fin de Grado no solo busca proponer una solución técnica y viable para la gestión del agua en el campus, sino también contribuir a un cambio significativo en la manera en que gestionamos y valoramos nuestros recursos hídricos, promoviendo un uso más consciente y responsable.

Entre las asignaturas cursadas en el grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales (GITI), la que más me ha inspirado para la realización del TFG es Tecnología del Medio Ambiente. A través de esta asignatura, hemos comprendido profundamente la importancia de la gestión de residuos de diferentes tipos: sólidos, líquidos y gaseosos, así como las graves consecuencias negativas que pueden surgir si

no gestionamos estos residuos de forma adecuada. Estos contenidos están estrechamente relacionados con nuestra vida diaria, ya que nuestras actividades cotidianas generan un flujo continuo de residuos. La correcta eliminación de los residuos que producimos es un problema cada vez más crítico y relevante en la sociedad actual.

Mi interés por la tecnología del medio ambiente no es solo académico, sino también profundamente personal. Desde siempre he sentido una gran pasión por la protección del medio ambiente, entendiendo que cada uno de nosotros tiene la responsabilidad de cuidar y preservar nuestro entorno para las futuras generaciones. Esta pasión ha sido reforzada por el conocimiento adquirido en la asignatura, que ha subrayado la importancia de las acciones individuales y colectivas en la mitigación de los problemas ambientales.

En resumen, mi motivación para este TFG se fundamenta en una sólida base académica y una pasión personal por la protección del medio ambiente. Creo firmemente que todos tenemos un papel que desempeñar en la preservación de nuestro planeta, y a través de este proyecto, espero aportar de manera significativa a la gestión sostenible de los recursos y a la mitigación de los impactos negativos en nuestro entorno.

3.1.2. Motivación Basada en la Gestión Sostenible del Agua y el Cambio Climático

En los últimos años, hemos percibido directamente el impacto del cambio climático, evidenciado por las constantes altas temperaturas durante el verano y las sequías causadas por la disminución de las precipitaciones. Aunque el precio de los recursos hídricos puede no parecer elevado desde una perspectiva económica, para la sociedad humana, los recursos de agua dulce utilizables son extremadamente escasos y valiosos. El agua es uno de los recursos más preciados y a la vez escasos, desempeñando un papel fundamental en el mantenimiento del equilibrio ecológico de la Tierra, la supervivencia humana y el desarrollo. Es bien sabido que alrededor del 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, de la cual la inmensa mayoría es agua salada. El agua dulce representa solamente un 2,5% del total del agua en el planeta y, de este porcentaje, una gran parte está aún atrapada en los glaciares y el hielo perpetuo en los polos.

Según el antecedente del Real Decreto-ley 4/2022, de 15 de marzo, se adoptaron medidas urgentes de apoyo al sector agrario debido a la escasa reserva hídrica almacenada en marzo de 2022. El año hidrológico 2021/2022 finalizó con una precipitación un 25% inferior al valor medio. Desde el inicio del último año hidrológico hasta finales de marzo de 2023, las precipitaciones acumuladas en España fueron un 18% inferiores al promedio para el mismo periodo. A fecha de 3 de mayo de 2023, la reserva hidráulica peninsular se situaba en un 49,6%, un valor inferior al del año anterior (50,6%) y también por debajo de la media de los últimos cinco años (61,8%) y de los últimos diez años (68,7%).

Además, conforme a las previsiones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del Observatorio Europeo de la Sequía, se espera que la situación de escasez de precipitaciones se mantenga, especialmente en la costa mediterránea. Esta situación subraya la creciente preocupación por la disponibilidad de agua en los próximos años, con regiones que podrían enfrentar graves dificultades debido a las sequías prolongadas y la disminución de los recursos hídricos.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

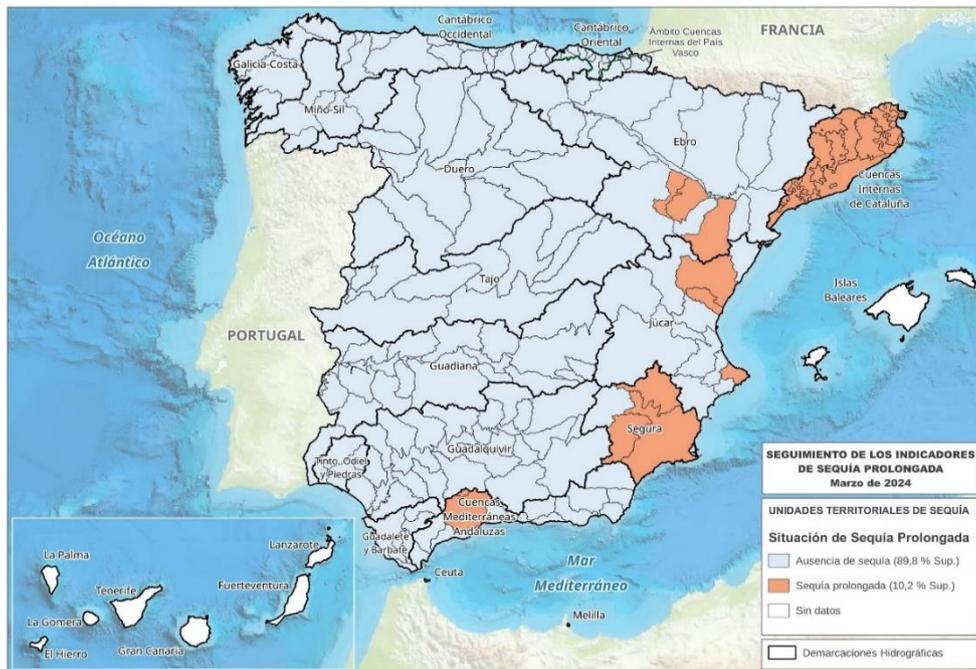


Figura 1. Situación respecto de la Sequía Prolongada. Marzo 2024

(Fuente: Subdirección General de Planificación Hidrológica. Dirección General del Agua)

En la Figura 1, actualizado a fecha de 31 de marzo de 2024, se observan las condiciones actuales de sequía en España. La demarcación del Júcar, en particular, está experimentando un empeoramiento significativo en los últimos meses. A finales de febrero, tres Unidades Territoriales de Escasez (UTE) ya se encontraban en estado de Emergencia: Cenia-Maestrazgo, Palancia-Los Valles y Marina Alta.

Según el Informe Mensual de Seguimiento de la Situación de Sequía y Escasez de abril de 2024, el mes de marzo ha tenido globalmente un carácter muy húmedo respecto a la pluviometría. El valor medio peninsular de la precipitación ha sido de 120 mm, prácticamente el doble del valor medio de los meses de marzo de la serie de referencia 1991-2020, que es de 59,5 mm. En Baleares y Canarias, las precipitaciones de marzo fueron ligeramente superiores a sus valores medios de referencia. El valor global acumulado en la Península en el año hidrológico (desde el 1 de octubre de 2023) es de 471 mm, un 15,7% superior al valor normal para ese periodo, que es de 407 mm.

Aunque el nivel del agua del embalse ha aumentado en comparación con su punto más bajo, aún debemos mantenernos alerta y utilizar los recursos hídricos existentes de manera más eficiente en lugar de consumirlos en exceso.

En este contexto, la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de Vera de la UPV no solo es una respuesta necesaria a la escasez de agua, sino también una medida proactiva para asegurar la disponibilidad de agua reutilizable para diversas aplicaciones. El cambio climático ha incrementado la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como sequías prolongadas y olas de calor, lo que resalta la necesidad de adoptar estrategias preventivas y resilientes. Esta planta permitirá mitigar los efectos adversos de estos eventos, garantizando un suministro continuo y sostenible de agua, incluso en períodos de escasez.

La capacidad de tratar y reutilizar el agua para riego, limpieza y otras aplicaciones no potables es fundamental para reducir la presión sobre los recursos hídricos frescos y contribuir significativamente a la sostenibilidad a largo plazo.

3.2. Justificación

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de la UPV es una iniciativa que se justifica desde múltiples perspectivas. A continuación, se analizarán los aspectos ambientales, económicos, sociales y tecnológicos que sustentan esta propuesta. Estos factores no solo subrayan la necesidad de gestionar eficazmente los recursos hídricos, sino que también destacan los beneficios a largo plazo para la comunidad universitaria y el entorno local.

3.2.1. Aspectos ambientales

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en la UPV tiene un impacto ambiental positivo significativo al reducir la contaminación y mejorar la calidad del agua. Históricamente, las aguas residuales domésticas contienen altas concentraciones de fósforo y nitrógeno. Si se descargan indiscriminadamente, estos nutrientes pueden provocar la eutrofización en lagos cercanos, es decir, un exceso de alimentación para las microalgas responsables del tono verdoso del agua. Este crecimiento excesivo de microalgas puede agotar el oxígeno presente en el agua, causando la mortandad de peces. Hace pocos años, este problema afectó a l'Albufera de València, demostrando las graves consecuencias ambientales de una gestión inadecuada de las aguas residuales.

Aunque actualmente existen plantas de tratamiento de aguas residuales que gestionan las aguas residuales urbanas, Valencia, como ciudad turística, enfrenta un desafío particular. Durante los periodos festivos y el verano, la afluencia de turistas aumenta drásticamente, lo que resulta en un incremento significativo en la generación de residuos, incluyendo aguas residuales. Esta situación puede sobrecargar las infraestructuras de tratamiento existentes, aumentando el riesgo de desbordamientos o fugas de aguas residuales no tratadas que podrían causar eutrofización en los humedales cercanos.

En contraste, la universidad experimenta una disminución en la generación de aguas residuales durante estos mismos periodos debido a la menor actividad académica. Por lo tanto, la planta de tratamiento de aguas residuales de la universidad podría ser utilizada para manejar el exceso de aguas residuales generado por los turistas (contando con el sistema de bombeo adecuado), mitigando así el riesgo de impactos ambientales negativos. Esta capacidad adicional ayudaría a prevenir la eutrofización en los humedales cercanos, como l'Albufera de València, y contribuiría a la protección del ecosistema local, manteniendo la biodiversidad y la calidad del agua.

3.2.2. Aspectos económicos

La viabilidad económica de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en la UPV es un aspecto crucial para considerar. Dado que el objetivo es que el agua tratada sustituya una parte del agua utilizada por la universidad, esta comparación de precios permitirá determinar si la inversión

en la planta de tratamiento resulta rentable a largo plazo, al considerar los ahorros potenciales y la eficiencia en la reutilización del agua tratada. Es necesario comparar el consumo energético y los costes asociados con el tratamiento de aguas residuales utilizando tecnologías de biorreactores de membrana (MBR) y desinfección con radiación UV con el coste actual del agua utilizada por la universidad.

El coste energético del tratamiento de aguas residuales utilizando tecnología MBR es de aproximadamente 0,64 kWh/m³, y sumado al coste para las membranas, resultaría en un coste de operación de 0,198 €/m³ (Pretel, I. R., Robles, A., Ruano, M. V., Seco, A., & Ferrer, J., 2016). En las plantas de tratamiento reales en Canadá, el coste energético anual para la desinfección de aguas residuales mediante UV es de 5.781,6 kWh para un flujo base de 1.363 m³/día (Sean A. MacIsaac, Kyle D. Rauch, Taylor Prest, Richard M. Simons, Graham A. Gagnon & Amina K. Stoddart, 2023), Por lo tanto, el cálculo para obtener coste energético de UV para desinfección arroja un resultado de 0,012 kWh/m³. Asumiendo un coste de energía de 0,12 €/kWh, el coste para el tratamiento de 1 m³ de agua residual sería.

El coste total para tratar y desinfectar 1 m³ de agua usando MBR y UV es:

$$\text{Coste unitario} = 0,198 + 0,012 * 0,12 \approx \frac{0,2\text{€}}{\text{m}^3}$$

En 2023, la UPV consumió 133.094 m³ de agua, con un coste total de 363.158 euros (upv.es). Esto nos da un coste promedio por metro cúbico de:

$$\text{Precio unitario} = \frac{363.158}{133.094} = 2,73 \frac{\text{€}}{\text{m}^3}$$

En conclusión, al comparar el coste del agua potable utilizada actualmente por la UPV, que es de 2,73 €/m³, con el coste de tratamiento y desinfección del agua residual mediante tecnologías MBR y UV, estimado en 0,2 €/m³, se observa una diferencia significativa en los costes. La reutilización del agua tratada para aplicaciones no potables como riego, limpieza y descarga de inodoros representa una alternativa económicamente viable y sostenible. A largo plazo, la inversión en la planta de tratamiento de aguas residuales no solo permitirá a la universidad reducir sus costes operativos, sino que también contribuirá a la conservación de los recursos hídricos y a la protección del medio ambiente. Por lo tanto, la construcción de esta planta de tratamiento resulta ser una estrategia rentable y beneficiosa para la universidad.

Aunque el precio de la reutilización de las aguas residuales depuradas es significativamente más bajo que el del agua de la red pública, no se podría sustituir toda el agua utilizada en la UPV, ya que el agua depurada no puede emplearse como agua potable.

3.2.3. Aspectos Sociales

La Comisión Europea concede anualmente reconocimientos a aquellos municipios que destacan por sus políticas enfocadas en el compromiso ambiental, la lucha contra el cambio climático, la descarbonización y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. La ciudad española de Valencia fue elegida oficialmente como Capital Verde Europea 2024 (Figura 2), lo que subraya su compromiso con la sostenibilidad y la protección del medio ambiente.



Figura 2. València, Capital Verde Europea 2024

(Fuente: Noticias UPV)

En este contexto, la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en la UPV responde al llamado de la comunidad y refuerza su compromiso con las políticas ambientales. Con la mejora del nivel educativo y el desarrollo de la tecnología de la información, la conciencia de la sociedad sobre la protección del medio ambiente sigue aumentando. El público presta cada vez más atención a cuestiones como la contaminación ambiental, el desperdicio de recursos y el daño ecológico, y ha planteado requisitos más estrictos para el comportamiento ambiental de los gobiernos y las empresas.

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales perteneciente a la universidad demuestra su compromiso y sentido de responsabilidad hacia la protección del medio ambiente. Esta iniciativa no solo promueve el desarrollo sostenible y la protección ecológica, sino que también mejora la imagen de la universidad como una institución que actúa proactivamente en estos ámbitos. Al tratar sus propias aguas residuales, la universidad puede demostrar plenamente su responsabilidad social y su respeto por el entorno local, ganándose el reconocimiento y el respeto de todos los sectores de la sociedad.

3.2.4. Proporcionar oportunidades educativas y de investigación para los estudiantes

El tratamiento de aguas residuales abarca diversos campos disciplinarios, como la ingeniería ambiental, la química y la biología. La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en la UPV brinda a los estudiantes una valiosa oportunidad para participar en proyectos prácticos que complementan su formación teórica. Esta experiencia práctica les permite involucrarse en el proceso de tratamiento de aguas residuales, comprender los principios de funcionamiento de las tecnologías y equipos utilizados, y fortalecer su comprensión de los conocimientos adquiridos en el aula.

Los estudiantes pueden llevar a cabo investigaciones basadas en la práctica del tratamiento de aguas residuales, lo que les permite explorar temas relacionados y desarrollar proyectos de investigación. Esta experiencia contribuye al desarrollo de habilidades de investigación y fomenta la conciencia innovadora. Además, les otorga una mayor competitividad en el mercado laboral (Teresa Nogueira, José Magano, Eunice Fontão, Marina Sousa and Ângela Leite, 2021), ya que están mejor preparados para adaptarse a entornos de trabajo diversos y pueden establecer una base sólida para su futuro

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

desarrollo profesional. Los estudiantes con experiencia en este campo tendrán una ventaja significativa en la búsqueda de empleo, ya que las soluciones de tratamiento de aguas residuales con tecnología avanzada suelen ofrecer soluciones más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Las universidades pueden beneficiarse de la cooperación comercial y el apoyo financiero de inversores interesados en proyectos innovadores y competitivos que cumplan con los requisitos ambientales y de desarrollo sostenible. Esto es de suma importancia para el desarrollo de las instituciones educativas, ya que no solo brinda oportunidades para la práctica y la investigación, sino que también ayuda a establecer relaciones con socios de la industria, promueve la aplicación de resultados de investigación y fortalece la influencia y la competitividad de las instituciones en el ámbito de la investigación científica.

4. Relación con los objetivos de desarrollo sostenible

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de Vera de la UPV es fundamental para abordar varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. En particular, este proyecto tiene una relevancia significativa en los siguientes ODS:

ODS 6: Agua Limpia y Saneamiento

Meta 6.3: Mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación de vertidos y la minimización de la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización segura de agua a nivel mundial.

Contribución del proyecto: La planta de tratamiento de aguas residuales permitirá tratar eficientemente las aguas residuales generadas en el campus, mejorando la calidad del agua y permitiendo su reutilización segura en aplicaciones no potables como riego y limpieza, lo que reduce la contaminación y minimiza el impacto ambiental.

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

Meta 11.6: Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de desechos municipales y de otro tipo.

Contribución del proyecto: En los últimos años, España ha experimentado una disminución en las precipitaciones debido a los cambios climáticos, lo que ha exacerbado los desafíos en la gestión del agua. Valencia, como una ciudad que recibe numerosos turistas especialmente durante los meses de verano, enfrenta una mayor demanda de agua y generación de aguas residuales. La construcción de una planta de tratamiento en el campus permitirá gestionar eficientemente las aguas residuales generadas por la propia universidad, reduciendo la carga sobre las infraestructuras públicas y minimizando el riesgo de desbordamientos y vertidos. Esto, a su vez, mejora la sostenibilidad urbana y ayuda a mantener la calidad del agua en la ciudad.

ODS 13: Acción por el Clima

Meta 13.2: Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales.

Contribución del proyecto: La variabilidad y reducción de las precipitaciones en España debido al cambio climático subraya la necesidad de soluciones innovadoras para la gestión del agua. La planta de tratamiento de aguas residuales contribuirá significativamente a la resiliencia climática de la universidad y la ciudad de Valencia. Al reutilizar el agua tratada para aplicaciones no potables, se reduce la dependencia de los recursos hídricos frescos, conservando así el agua potable para usos

esenciales. Además, este proyecto se alinea con las políticas nacionales y locales de sostenibilidad, demostrando un compromiso concreto con la mitigación y adaptación al cambio climático.

ODS 15: Vida de Ecosistemas Terrestres

Meta 15.1: Asegurar la conservación, restauración y uso sostenible de los ecosistemas terrestres y de agua dulce y sus servicios, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las tierras secas.

Contribución del proyecto: Al evitar la contaminación y reducir el riesgo de eutrofización en humedales cercanos de València, la planta contribuye a la protección y conservación de estos ecosistemas cruciales, manteniendo su biodiversidad y funcionalidad.

En conclusión, la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de Vera no solo responde a una necesidad ambiental y económica inmediata, sino que también demuestra un compromiso profundo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Este proyecto fortalece el papel de la UPV como líder en sostenibilidad y responsabilidad ambiental, promoviendo una cultura de gestión eficiente de los recursos y protección del medio ambiente tanto dentro como fuera del campus. Además, contribuye significativamente a la resiliencia climática y la sostenibilidad urbana, abordando de manera efectiva los desafíos impuestos por el cambio climático y la variabilidad en las precipitaciones.

5. Composición y caudal de aguas residuales

La composición y el caudal de las aguas residuales son datos muy importantes para el diseño de la planta depuradora. La composición indica las concentraciones de los contaminantes: materias orgánicas y nutrientes, fundamentalmente, y con estos datos de composición se puede elegir la tecnología más adecuada para la planta en el momento del diseño. El valor del caudal afecta el tamaño de la planta que debe diseñarse, para que tenga una capacidad suficiente para tratar las aguas residuales generadas por la UPV.

5.1. Composición de aguas residuales

Las aguas residuales domésticas pueden clasificarse en diferentes niveles de contaminación: débil, media y fuerte. La clasificación se basa en parámetros como la concentración de materia orgánica, medido como **la Demanda Biológica de Oxígeno a 5 días (DBO₅)** y **la Demanda Química de Oxígeno (DQO)**, nutrientes como **el nitrógeno** y **el fósforo**, y **los sólidos en suspensión (SS)**. Según los distintos niveles de contaminación, se puede elegir la tecnología más adecuada para el tratamiento de estas aguas residuales. Así, se puede garantizar la efectiva eliminación de los contaminantes sin un consumo excesivo de recursos.

Tabla 1. Composición típica de las aguas residuales domésticas

(Fuente: Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales, Redes de Alcantarillado y Bombeo, 1995.)

Parámetro (Uds.)	CONCENTRACIÓN		
	FUERTE	MEDIA	DÉBIL
Sólidos en suspensión (SS)(mg/l)	350	220	100
SS volátiles (mg/l)	275	165	80
DQO (mg/l)	1.000	500	250
DBO ₅ (mg/l)	400	220	110
Nitrógeno total (mg/l)	85	48	20
Fosforo total (mg/l)	15	8	4

Basándose en las diferentes partes constituyentes del campus y sus diferentes servicios, como restaurantes, residencias de estudiantes, laboratorios y edificio de aulas, se emitirán distintos tipos de aguas residuales:

Aguas Residuales de Catering: Estas aguas contienen altos niveles de materia orgánica, restos de alimentos y grasas, además de detergentes, lo que incrementa considerablemente la DQO y DBO₅, así

como los sólidos en suspensión. Los detergentes y restos de alimentos también enriquecen el agua con fósforo.

Aguas Residuales de Laboratorios: Aunque los estudiantes y los profesores cumplen estrictamente con las normas en el manejo de los residuos generados por los experimentos en el laboratorio, como depositarlos en contenedores específicos, al limpiar el equipo experimental, algunos químicos que quedan en él pueden fluir a través de las aguas residuales. Por tanto, aguas residuales de laboratorios pueden incluir una variedad de químicos como disolventes y metales pesados, aumentando la DQO y presentando desafíos específicos para su tratamiento debido a la toxicidad y la diversidad de contaminantes.

Aguas Residuales Domésticas: La mayoría de ellas se originan en residencias estudiantiles y otras viviendas del campus, así como en las actividades normales de los estudiantes. Estas aguas, originadas sobre todo en los aseos de todo el campus, contienen urea, amoníaco y detergentes que aumentan las concentraciones de nitrógeno, fósforo, DQO y DBO₅, reflejando la composición variada y la carga orgánica significativa.

Para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales en el Campus de Vera de la UPV, conocer las características y las composiciones de las aguas residuales es de suma importancia. Para ello, se ha consultado el programa de muestreo de las aguas residuales en el campus, llevado a cabo por GENERAL DE ANÁLISIS, MATERIALES Y SERVICIOS S.L., la empresa encargada del servicio de análisis de las aguas residuales de la UPV. Según el informe de uno de estos análisis, que ha suministrado la Unidad de Medio Ambiente de la UPV, se pueden obtener los valores los parámetros importantes: DBO₅, DQO, SS, nitrógeno y fósforo. Estos parámetros son fundamentales para determinar la capacidad y las tecnologías necesarias para el diseño eficaz de la planta de tratamiento.

Tabla 2. parámetros de puntos de muestreo global

(Fuente: informe de analíticas de aguas residuales de la UPV, nº expediente MY22/UMA/SE74, 26 de abril de 2022)

Parámetros	Unidad	Resultado
DBO ₅	mg/l	136
DQO	mg/l	255
Nitrógeno nítrico	mg/l	1,13
Nitrógeno Kjeldahl Total	mg/l	34,3
Nitrógeno Total	mg/l	35,43
Fósforo total	mg/l	12,8
SS	mg/l	160
Conductividad 25°C	μS/cm	1.650
pH		7,6

Según el informe del análisis, en comparación con el nivel de la clasificación de aguas residuales domésticas, las aguas residuales generadas por la UPV contienen bajas concentraciones de materia orgánica según sus valores de DQO y DBO₅, mientras que las concentraciones de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno tienen valores medio-altos. El pH está ligeramente por encima del neutro, es decir, ligeramente básico. Se puede considerar en general un agua con contaminación media-débil.

5.2. Análisis del consumo de agua en el campus de Vera y cálculo del caudal de agua a tratar

La UPV está dividida en tres campus: Alcoy, Gandía y Vera. Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se enfoca en el diseño y construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales específicamente para el Campus de Vera. En primer lugar, se estudiarán los datos correspondientes a caudales de agua consumidos, para después estimar el caudal de agua residual a tratar.

El agua consumida en el Campus de Vera de la UPV proviene de dos fuentes principales. Una parte proviene de la red pública de suministro de agua, garantizando así una fuente confiable y regulada. La otra parte se obtiene de varios pozos situados en el propio campus, lo que permite una cierta independencia en el abastecimiento de agua. La Figura 3 muestra la cantidad de agua consumida de los pozos y de la red pública en el campus de Vera desde el año 2014 hasta el año 2022.

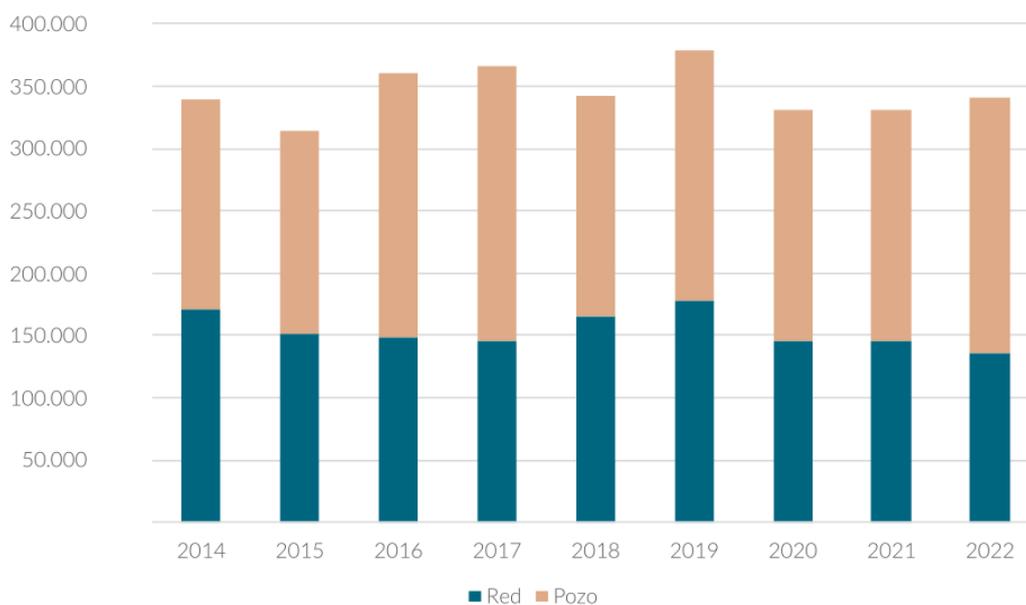


Figura 3. Consumo de agua en el campus de Vera (Valencia)

(Fuente: Unidad de Medioambiente de la UPV)

A partir del análisis del consumo de agua en el Campus de Vera de la UPV, se puede concluir que el consumo total de agua ha mantenido una estabilidad notable a lo largo de los años, fluctuando entre aproximadamente 300.000 y 370.000 metros cúbicos anuales. Esta consistencia en el uso del agua destaca una gestión eficaz y predecible de los recursos hídricos del campus. Además, se observa una dependencia equilibrada entre las dos fuentes principales de agua: la red pública y los pozos. En la

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

mayoría de los años analizados, la cantidad de agua proveniente de los pozos es comparable a la suministrada por la red, lo que indica una estrategia bien balanceada de aprovechamiento de recursos hídricos. En este contexto, el agua de pozo constituye una parte significativa del suministro total, subrayando su importancia como recurso esencial para el campus.

Según los datos del gráfico, el consumo total oscila entre 320.000 y 370.000 m³. Por lo tanto, elegir un valor intermedio (350.000 m³) puede suavizar efectivamente estas fluctuaciones y evitar que los valores extremos afecten el diseño. Sin embargo, considerando el impacto de la pandemia de COVID-19, el consumo en años de alta demanda (como 2019) fue de aproximadamente 370.000 m³, mientras que durante la pandemia (2020-2022) el consumo se mantuvo por debajo de los 350.000 m³. Durante la pandemia, muchos estudiantes y empleados trabajaron y estudiaron desde casa, lo que redujo significativamente la cantidad de personas en el campus, disminuyendo así el consumo total de agua. Además, algunas instalaciones del campus podrían haber estado temporalmente cerradas o con uso reducido, lo que disminuyó aún más la demanda de agua.

A medida que la pandemia ha terminado y las actividades en el campus se han reanudado, se espera que el consumo de agua aumente, pese a que el teletrabajo y la menor presencia de estudiantes en las aulas son hechos constatables en el curso actual 2023-24. En cualquier caso, se puede suponer que el consumo de agua volverá a niveles cercanos a los anteriores a la pandemia, e incluso podría ser ligeramente superior. Por lo tanto, el rango estimado puede establecerse entre 340.000 y 370.000 m³ anuales para proporcionar un margen de diseño adecuado. Para asegurar un margen de seguridad en el diseño, se puede elegir un valor promedio más alto, como 360.000 m³, este valor proporciona un margen de diseño suficiente para garantizar que las instalaciones de tratamiento de aguas residuales puedan satisfacer las variaciones futuras en el consumo de agua.

En la UPV, según los datos de Directrices ambientales del consumo del agua en la UPV, el agua subterránea representa el 49% del consumo total de agua, mientras que el agua potable municipal representa el 51%. Entre ellas, el agua de pozo se utiliza para diversos usos: uso sanitario, uso piscina, uso acuicultura y uso riego.

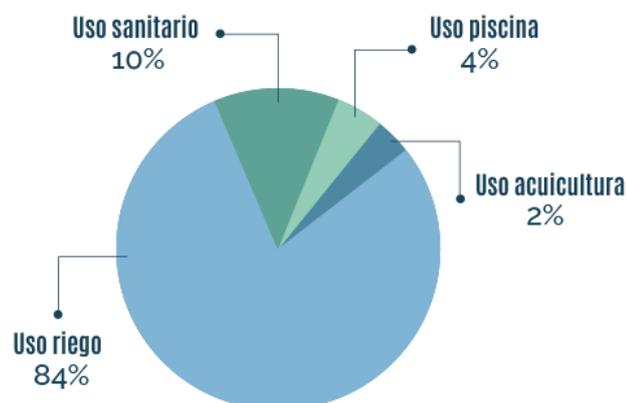


Figura 4. Distribución del uso de agua de pozo UPV

(Fuente: Directrices ambientales del consumo del agua en la UPV)

La distribución del uso de agua de pozo (agua subterránea) se muestra en la Figura 4. Del total de esta agua subterránea, el 84% se utiliza para riego, mientras que el 16% restante genera aguas residuales que necesitan ser tratadas. Para reducir el consumo ineficiente de agua de riego, la universidad ha implementado una serie de medidas para disminuir el gasto. Por ejemplo, han reparado o reemplazado hidrantes con cierres defectuosos y mangueras perforadas para reducir el desperdicio de recursos hídricos. Además, la universidad ajusta los horarios de riego según las condiciones meteorológicas para maximizar la eficiencia del uso del agua. Estas medidas han reducido significativamente el desperdicio de agua de riego, logrando que la mayor parte del agua utilizada para riego se evapore o sea absorbida por las plantas, y no entre en el sistema de aguas residuales. Por lo tanto, al diseñar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales del campus, es razonable excluir esta parte del agua de riego del volumen total de tratamiento necesario. Esto ayudará a optimizar el diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y apoyar los objetivos de desarrollo sostenible del campus.

Una vez que se haya determinado el consumo promedio anual de agua de 360.000 m³ como la base para el cálculo del caudal de la planta de tratamiento de aguas residuales, podemos utilizar los datos mencionados anteriormente para calcular el caudal de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Proceso de Cálculo del Caudal de Diseño para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales:

1. Determinación del Consumo Total de Agua:

- Consumo Total Anual Estimado (V_{total})
 $V_{total} = 360.000 \text{ m}^3/\text{año}$

2. Cálculo del Volumen de Agua de la Red:

- Proporción del Agua de la Red: 51%
- Volumen de Agua de la Red (V_{red})
 $V_{red} = 0,51 \times V_{total} = 183.600 \text{ m}^3/\text{año}$

3. Cálculo del Volumen de Agua Subterránea:

- Proporción del Agua Subterránea: 49%
- Volumen de Agua Subterránea (V_{pozo})
 $V_{pozo} = 0,49 \times V_{total} = 176.400 \text{ m}^3/\text{año}$

4. Cálculo del Volumen de Agua Subterránea para Tratamiento:

- Proporción del Agua Subterránea para Tratamiento: 16%
- Volumen de Agua Subterránea para Tratamiento (V_{p_trata})
 $V_{p_trata} = 0,16 \times V_{pozo} = 28.224 \text{ m}^3/\text{año}$

5. Cálculo del Volumen Total a Tratar:

- Volumen Total a Tratar ($V_{\text{total_trata}}$)
$$V_{\text{total_trata}} = V_{\text{red}} + V_{\text{p_trata}} = 211.824 \text{ m}^3/\text{año}$$

Tras un análisis exhaustivo de los datos de consumo de agua del Campus de Vera de la UPV, se ha llevado a cabo una estimación detallada del caudal necesario para la planta de tratamiento de aguas residuales. Se analizaron los datos históricos, considerando las variaciones debidas a la pandemia de COVID-19, y se determinó un consumo promedio anual de 360.000 m³. Distribuyendo este consumo entre las fuentes de agua, se obtuvo que el 51% proviene de la red pública y el 49% de agua subterránea. Dado que una gran parte del agua subterránea se utiliza para riego y no requiere tratamiento, se calculó que solo el 16% del agua subterránea necesita tratamiento. Finalmente, sumando el agua de la red y el agua subterránea tratable, se concluyó que el caudal anual a tratar en la planta de tratamiento de aguas residuales es de aproximadamente **211.824 m³/año**. Este valor asegura que la planta podrá manejar eficazmente las aguas residuales generadas, cumpliendo con los requerimientos operativos y ambientales del campus.

Proporción de conversión: Según el informe publicado por la Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS) en 2017, el volumen promedio de aguas residuales generadas por persona en España es de aproximadamente 102 litros por día. Por otro lado, de acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), el consumo promedio de agua por persona en España es de aproximadamente 133 litros por día. Utilizando estos datos, podemos calcular la proporción de agua de uso doméstico que se convierte en aguas residuales. **La proporción de conversión es aproximadamente del 77%.**

- Volumen total para tratar ($V_{\text{total_tratar}}$)
$$V_{\text{total_trata}} = V_{\text{total_consumido}} \times 77\% = 163.104,48 \text{ m}^3/\text{año}$$

Para estimar el caudal de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales en la UPV, se ha considerado que la mayor parte del agua residual se genera durante los días laborables del año. Teniendo en cuenta las vacaciones de agosto, se ha deducido que el año académico consta de 334 días. La cantidad total de aguas residuales generadas anualmente en el campus es de 163.104,48 m³/año, el caudal diario promedio se calcula dividiendo el volumen anual entre los 334 días, resultando en aproximadamente 488,03 m³/día.

Para evitar que el diseño sea demasiado ajustado, se ha decidido aumentar y redondear adecuadamente el caudal estimado. De esta manera, **el caudal de diseño** se puede establecer en **500 m³/día**. Esta precaución permite que la planta tenga la capacidad suficiente para tratar las aguas residuales generadas. Al mismo tiempo, también proporciona un margen para afrontar las variaciones del caudal en algunas circunstancias especiales.

6. Estándares para el tratamiento y reutilización de aguas residuales

Para asegurar que la planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de la UPV cumpla con los estándares legales, es fundamental garantizar que el efluente tratado se ajuste a las normativas establecidas en el Real Decreto 509/1996 (BOE-A-1996-7159), que regula las condiciones para el vertido de aguas residuales procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales. Esta norma es la transposición al derecho estatal de la Directiva 91/271. Específicamente, esta normativa incluye una serie de parámetros de calidad del agua tratada para poder ser vertida a cuerpos de agua naturales, como ríos o lagos, definidos en la Tabla 3 del decreto, que deben ser monitoreados y cumplidos rigurosamente.

Tabla 3. Normas de parámetros para la descarga de aguas residuales domésticas

(Fuente: el Real Decreto 509/1996, BOE-A-1996-7159)

Parámetros	Concentración (mg/l)
DBO ₅	25
DQO	125
Sólidos en suspensión	35
Fósforo total	2
Nitrógeno total	15

El propósito del diseño de esta planta depuradora no solo es verter las aguas residuales tratadas, sino reutilizar estas aguas para el riego de las zonas verdes del campus, la irrigación de campos agrícolas adyacentes y el uso en sistemas de descarga de inodoros. Por tanto, las aguas residuales tratadas no solo deben cumplir con las normativas de vertido, como se muestra en la Tabla 3, sino también deben cumplir las normativas de reutilización de aguas regeneradas.

El 26 de junio de 2023 entró en vigor el 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. Sustituye al Reglamento 1620/2007 en lo referente a la reutilización de agua para riego. Para estos fines, es imperativo que el agua reciclada también cumpla con los estándares establecidos en el Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo, que regula el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. Esta normativa incluye requisitos específicos, detallados en la Tabla 4, que aseguran la seguridad y calidad del agua reutilizada en diferentes aplicaciones.

Tabla 4. Requisitos mínimos aplicables a las aguas regeneradas destinadas al riego agrícola

4.1. Clases de calidad de las aguas regeneradas y uso agrícola y método de riego permitidos

Clase de calidad mínima de las aguas regeneradas	Categoría de cultivo
A	Todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas y los tubérculos que se consumen crudos
B	Los cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche
C	Los cultivos de alimentos que se consumen crudos cuando la parte comestible se produce por encima del nivel del suelo y no está en contacto directo con las aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche (Riego por goteo u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo)
D	Cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas

4.2. Requisitos de calidad de las aguas regeneradas para el riego agrícola*

Clase de calidad de las aguas regeneradas	Tratamiento indicativo	E. coli (número/100 ml)	DBO5 (mg/l)	STS (mg/l)	Turbidez (UNT)
A	Tratamiento secundario, filtración y desinfección	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5
B	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 100	De conformidad con la Directiva 91/271/CEE (anexo I, cuadro 1)	De conformidad con la Directiva 91/271/CEE (anexo I, cuadro 1)	–
C	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 1.000			–
D	Tratamiento secundario y desinfección	≤ 10.000			–

* *Legionella* spp.: < 1.000 UFC/l cuando exista un riesgo de aerosolización Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤ 1 huevo/l para el riego de pastos o forraje.

El uso principal de las aguas residuales tratadas provenientes de la depuradora es reemplazar la necesidad de riego de la vegetación diversa del campus de Vera, conforme a lo dispuesto en el Reglamento (UE) 2020/741. Este reglamento establece que para el riego de jardines y parques en zonas públicas se debe utilizar agua de calidad **Clase A**, garantizando que no representará un riesgo para la salud pública.

Hoy en día, la gente presta cada vez más atención a las cuestiones de salud y seguridad, por lo que las normas sobre el uso de agua regenerada para el riego son más estrictas que antes. Debido a estas estrictas normas, a la hora de construir una planta de tratamiento de aguas residuales, la elección de la tecnología a utilizar en la planta juega un papel decisivo. Elegir una tecnología adecuada puede garantizar que las aguas residuales tratadas cumplan con las especificaciones de los estándares de riego y evitar accidentes sanitarios debido a especificaciones deficientes.

7. Alternativas de tratamiento

Para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de Vera de la UPV, fue crucial un análisis en profundidad de las tecnologías existentes, especialmente aquellas que están probadas en el mercado y ampliamente utilizadas. Elegir la tecnología más adecuada requiere una comparación exhaustiva de las ventajas y limitaciones de cada tecnología y la consideración de su idoneidad para escenarios de aplicación específicos. Es necesario considerar múltiples factores al tomar decisiones, incluida la eficiencia de la eliminación de contaminantes, los costes de operación y mantenimiento, la complejidad técnica y los requisitos de espacio. Además, los estándares de efluentes de cada tecnología también son una de las condiciones importantes para la selección, porque el agua tratada debe cumplir con los estándares de reciclaje correspondientes. Este enfoque garantiza que las soluciones seleccionadas no sólo se adapten a las necesidades específicas del entorno universitario, sino que también cumplan con los objetivos a largo plazo de protección del medio ambiente y recuperación de recursos.

7.1. Alternativas para el tratamiento de aguas residuales.

Actualmente existen en el mercado diferentes procesos para el tratamiento de aguas residuales, las cuales se van a clasificar de acuerdo con el proceso de tratamiento secundario (biológico) seguido:

Proceso de Fangos Activos Convencional: La Figura 5 muestra el esquema de una planta de fangos activos, es un proceso continuo que se basa en la utilización de una biomasa (microorganismos), que se mantiene en suspensión y en constante agitación en presencia de oxígeno. Este proceso es ampliamente reconocido por su eficacia en la eliminación de contaminantes orgánicos biodegradables mediante la actividad metabólica de los microorganismos.

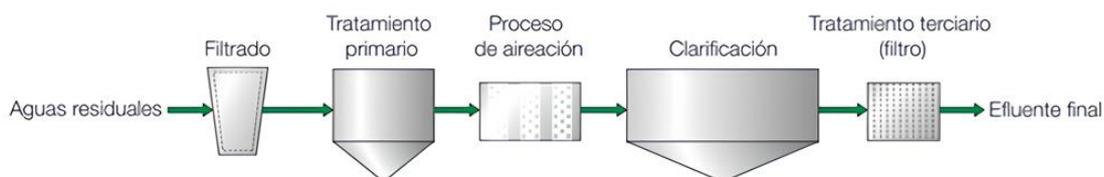


Figura 5. Esquema de la planta de fangos activos

(Fuente: Alfa Laval. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de alfalaval.es)

- **Ventajas:** Ofrece alta eficiencia en la reducción de DBO₅ y DQO, adaptabilidad a variaciones en la carga de contaminantes y la posibilidad de acoplarse con otros procesos para la eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo.
- **Desventajas:** Requiere una inversión significativa en infraestructura y mantenimiento, produce una cantidad considerable de fangos que deben ser tratados y dispuestos adecuadamente, y puede ser sensible a las fluctuaciones en las condiciones de alimentación y operación.

Reactor biológico secuencial: el tratamiento secundario se lleva a cabo en un único reactor con fases secuenciales de llenado, reacción, decantación y extracción (Figura 6). Este método permite un control

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

preciso de las condiciones ambientales durante cada fase del ciclo de tratamiento. Es necesario previamente un pretratamiento con tanque de homogeneización y posteriormente un tratamiento terciario, al igual que el proceso de fangos activos convencional.

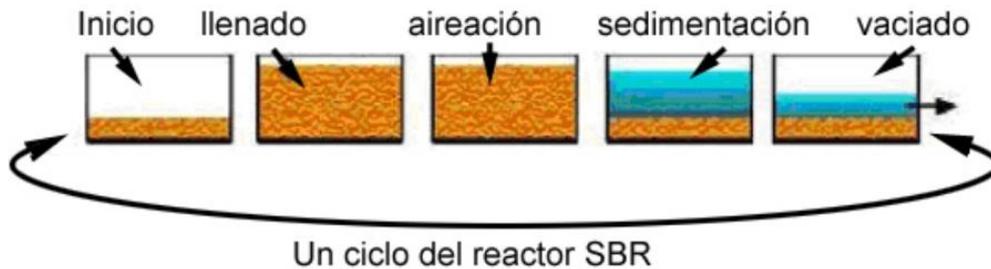


Figura 6. Esquema de SBR

(Fuente: Techno-Plast. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de techno-plast.bg)

- Ventajas: Flexibilidad operativa para tratar variaciones en la carga de entrada y en la composición del agua residual. Reduce la necesidad de grandes áreas de terreno, ya que el proceso se realiza en un solo tanque.
- Desventajas: La naturaleza discontinua del proceso puede afectar la uniformidad del tratamiento y requiere una gestión cuidadosa del tiempo y las operaciones para garantizar la eficacia.

Reactor Biológico de Membranas (MBR): La Figura 7 muestra el esquema de MBR, esta tecnología integra el proceso de fangos activos con la filtración por membranas. Las membranas, que pueden ser de microfiltración o ultrafiltración, permiten retener la biomasa del reactor, lo que intensifica el proceso biológico y mejora la calidad del efluente tratado.

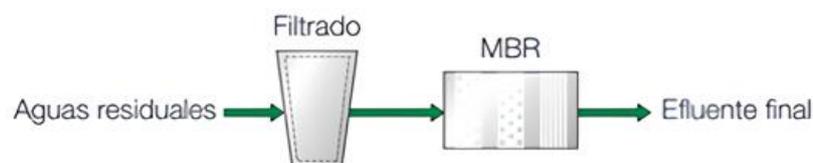


Figura 7. Esquema de MBR

(Fuente: Alfa Laval. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de alfalaval.es)

- Ventajas: Produce un efluente de excelente calidad, adecuado para la reutilización directa en aplicaciones agrícolas o industriales. El sistema MBR ocupa menos espacio que los sistemas convencionales y maneja eficazmente altas cargas de contaminantes reduciendo el volumen de fangos generados.
- Desventajas: El coste inicial y los gastos operativos son altos debido al coste de las membranas y su mantenimiento. Además, las membranas pueden sufrir ensuciamiento o envejecimiento, lo que reduce su eficiencia y requiere limpiezas periódicas.

Para cumplir con nuestros criterios específicos, que incluyen la minimización del espacio ocupado, la obtención de un efluente de alta calidad apto para la reutilización en el riego (Bertanza, G., Canato, M.,

Laera, G. et al, 2017) y la minimización del impacto ambiental en términos de ruido y olores, la tecnología MBR se presenta como una solución óptima. En comparación con otros procesos, el proceso MBR se considera la opción más adecuada porque esta tecnología es más eficaz en el tratamiento de aguas residuales domésticas y la calidad obtenida de las aguas residuales tratadas es superior a otras tecnologías.

Los controles automatizados de los sistemas MBR minimizan las emisiones olfativas y sonoras, aspectos críticos en áreas urbanas o campus universitarios donde la calidad de vida y el respeto por el entorno son prioritarios.

7.2. Alternativas para desinfección de aguas residuales

Para asegurar que el agua tratada por la planta de tratamiento de aguas residuales en el campus de la UPV cumpla con los estándares requeridos para su reutilización en riego agrícola, riego de césped en la universidad y como agua de descarga en inodoros, es necesario considerar la implementación de un proceso adicional de desinfección tras el proceso de tratamiento biológico. La desinfección es crucial para eliminar patógenos y asegurar la seguridad sanitaria del agua reutilizada.

La desinfección adicional del agua tratada es esencial para garantizar que el efluente cumpla con las normativas de calidad para reutilización, que suelen ser más estrictas debido a los riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente. Hoy en día, existen varias tecnologías de desinfección que son eficientes, económicas y ocupan poco espacio, adecuadas para instalaciones como las que se proyectan en el campus universitario:

Cloración: Es una técnica de desinfección que implica la adición de compuestos de cloro, como el hipoclorito de sodio o cloro gaseoso, al agua tratada. El cloro reacciona con los microorganismos patógenos, oxidándolos y desactivándolos.

- **Ventajas:** La cloración es altamente efectiva para inactivar una amplia gama de patógenos, incluyendo bacterias, virus y protozoos. Es una tecnología probada, relativamente económica y fácil de implementar.
- **Desventajas:** La cloración puede formar subproductos de desinfección como trihalometanos y ácidos haloacéticos, que son perjudiciales para la salud. Además, el cloro es un químico tóxico que requiere un manejo y almacenamiento cuidadosos para evitar riesgos de exposición y accidentes. La presencia de amoníaco y otros compuestos en el agua puede reducir la eficacia del cloro, requiriendo dosis más altas para lograr la desinfección adecuada.

Radiación Ultravioleta (UV): La radiación UV utiliza lámparas que emiten luz ultravioleta de alta intensidad para desinfectar el agua. La luz UV penetra en los microorganismos y daña su material genético (el ADN), impidiendo su replicación y capacidad de infección.

- **Ventajas:** La radiación UV no introduce compuestos químicos en el agua, eliminando el riesgo de formación de subproductos tóxicos. Es efectiva contra una amplia gama de patógenos, incluyendo bacterias, virus y protozoos. La acción de desinfección es rápida y el mantenimiento de las lámparas UV es relativamente sencillo, requiriendo solo una limpieza periódica y reemplazo de lámparas cada X tiempo.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

- Desventajas: La eficacia de la desinfección UV puede disminuir si el agua contiene altos niveles de sólidos en suspensión o turbidez, que pueden bloquear la luz UV. Además, el coste de instalación de un sistema UV puede ser más alto en comparación con la cloración y requiere un suministro constante de energía eléctrica para funcionar, lo que puede ser un inconveniente en áreas con suministro eléctrico inestable.

Ozonización: Se utiliza ozono (O_3), un gas altamente reactivo, como agente desinfectante. El ozono se genera in situ a partir de oxígeno mediante un generador de ozono y se inyecta en el agua, donde oxida y destruye los patógenos y otros contaminantes.

- Ventajas: La ozonización es uno de los métodos de desinfección más potentes, capaz de destruir una amplia gama de patógenos y eliminar compuestos orgánicos y metales pesados. Al descomponerse, el ozono vuelve a formar oxígeno, sin dejar residuos tóxicos en el agua, y mejora la calidad del agua al eliminar olores, sabores y decoloraciones.
- Desventajas: Los costes de instalación y operación son altos debido a la necesidad de generadores de ozono y sistemas de control especializados. Además, la ozonización es un proceso más complejo que requiere personal capacitado para su operación y mantenimiento. El ozono es un gas tóxico y corrosivo, que requiere medidas de seguridad estrictas para su producción y manejo, lo que añade otra capa de complejidad y coste al proceso.

Considerando las necesidades específicas del campus de Vera de la UPV y los objetivos de sostenibilidad y eficiencia, se recomienda la implementación de la tecnología MBR en combinación con la desinfección por Radiación Ultravioleta. El sistema MBR asegura una alta calidad del agua tratada al eliminar eficientemente contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos, mientras que la desinfección UV proporciona una barrera adicional eficaz contra patógenos sin introducir productos químicos adicionales, garantizando así la seguridad y la calidad del agua reciclada para su uso en riego y otras aplicaciones no potables. Esta combinación de tecnologías no solo cumplirá con las normativas ambientales vigentes, sino que también promoverá una gestión eficiente y sostenible del recurso hídrico en el campus, asegurando que el agua tratada sea segura para su reutilización.

La combinación MBR+UV puede considerarse una solución avanzada y eficaz para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en contextos donde se busca la reutilización del agua tratada. Los MBR integran procesos biológicos y de filtración mediante membranas, ofreciendo una alta eficiencia en la eliminación de contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos.

8. Biorreactores de membrana

El MBR fusiona el proceso de fangos activados convencional con la filtración mediante membranas, logrando así la clarificación y desinfección del agua tratada en un solo paso. Este sistema innovador se destaca por su capacidad para operar a altas concentraciones de biomasa, lo que resulta en una reducción significativa del tamaño del reactor y de los requisitos de espacio en comparación con las plantas de tratamiento convencionales.

La utilización de membranas de microfiltración o ultrafiltración en los sistemas MBR garantiza la eliminación casi total de sólidos suspendidos y patógenos, proporcionando una barrera física que complementa la acción biológica. Además, la flexibilidad de diseño de los MBR permite su aplicación en una amplia gama de contextos, desde pequeñas comunidades hasta grandes instalaciones industriales, ofreciendo una solución versátil y eficiente para el tratamiento de aguas residuales.

A continuación, se explorarán en detalle los componentes clave, el funcionamiento, las ventajas y los desafíos de los sistemas MBR.

8.1. El pretratamiento

Una etapa de pretratamiento es necesario para el MBR ya que es necesario eliminar los sólidos de mayor tamaño y otros contaminantes que pueden obstruir o dañar las membranas en etapas posteriores.

Eliminación de sólidos grandes

El propósito de esta etapa es eliminar sólidos como ramas, hojas, plásticos y otros desechos que pueden obstruir el sistema de tamaño variable entre centímetros y milímetros. Para lograrlo, se utilizan tamices de entrada o rejillas que actúan como una barrera física, reteniendo estos materiales y permitiendo que solo las partículas más pequeñas pasen a las siguientes etapas del tratamiento. Mantener estas pantallas limpias es crucial para asegurar su eficacia y proteger las membranas en la siguiente fase del tratamiento, previniendo obstrucciones y daños en el sistema, lo que garantiza una operación eficiente y continua. Dado que es esencial filtrar los sólidos que podrían dañar las membranas de microfiltración, es necesario utilizar una combinación de una pantalla estática seguida de una rejilla fina. La pantalla estática eliminará los sólidos grandes, mientras que la rejilla fina capturará las partículas más pequeñas, proporcionando una doble barrera antes de que el agua llegue a las membranas de microfiltración, asegurando así que no se dañen.

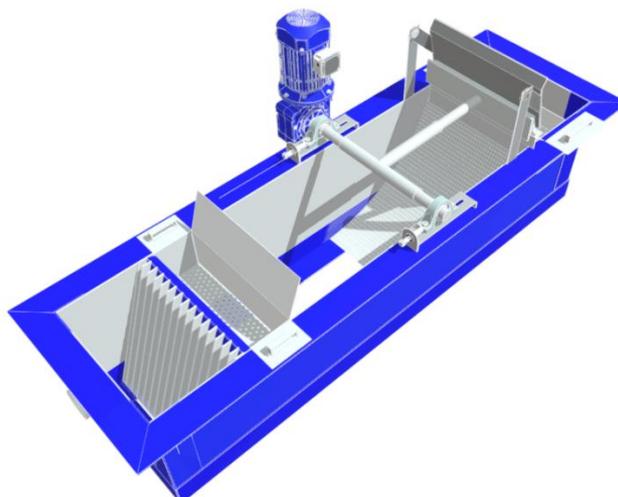


Figura 8. Canal de pretratamiento de aguas residuales

(Fuente: Synertech. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de synertech.com.co)

La Figura 8 muestra un canal de pretratamiento para aguas residuales, producido por la empresa Synertech. La primera parte del canal está equipada con rejillas, que se utilizan para filtrar sólidos grandes. A continuación, hay un sistema de tamiz de acero inoxidable para filtrar los sólidos más pequeños.

8.2. Biorreactor de membrana

En el siguiente apartado se indica los detalles específicos del biorreactor de membrana, el cual se divide en dos secciones principales: la zona anóxica y la zona aeróbica. En la zona anóxica se realizan procesos de desnitrificación, mientras que en la zona aeróbica se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica mediante microorganismos aeróbicos. Además, se describe la membrana asociada a la zona aeróbica, que se utiliza para la filtración de aguas residuales, reteniendo sólidos y patógenos, y asegurando así una alta calidad del agua tratada.

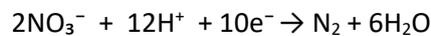
La capacidad del biorreactor es un factor crítico en el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales. El tamaño del reactor debe ser suficiente para proporcionar **el tiempo de retención** hidráulico (TRH) necesario para que los microorganismos completen la biodegradación de los contaminantes. Un TRH adecuado asegura que los procesos biológicos tengan el tiempo suficiente para actuar sobre los contaminantes antes de que el agua pase a través de las membranas.

La edad de fango es un parámetro crucial que está directamente relacionado con el tamaño del reactor biológico. La edad de fango se refiere al tiempo promedio que los sólidos en suspensión, o biomasa, permanecen en el sistema. Un reactor más grande puede mantener una mayor cantidad de biomasa, lo cual permite una mayor edad de fango. Esta mayor edad de fango es beneficiosa porque proporciona un entorno estable para que los microorganismos se adapten y crezcan, mejorando la eficiencia en la degradación de los contaminantes.

Una edad de fango adecuada es esencial para la eliminación eficiente de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Si el reactor es demasiado pequeño, la edad de fango será pequeña, lo que puede resultar en una biomasa insuficiente para la degradación completa de los contaminantes. Esto puede llevar a una menor calidad del efluente y un mayor riesgo de incumplimiento de las normativas ambientales.

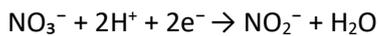
8.2.1. La zona anóxica

En muchos sistemas MBR, dentro del biorreactor se encuentra una zona anóxica. El propósito de la zona anóxica es facilitar la desnitrificación (Guanghao Chen; Mark C.M. van Loosdrecht; George A. Ekama; Damir Brdjanovic, 2023), un proceso biológico en el cual los nitratos (NO_3^-) son convertidos en nitrógeno gas (N_2) por bacterias desnitrificantes en ausencia de oxígeno. Este proceso es crucial para reducir los niveles de nitrógeno en el efluente, lo que es especialmente importante para cumplir con las normativas de calidad del agua y para prevenir problemas ambientales como la eutrofización.

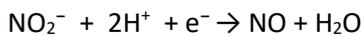


Este proceso se realiza en varias etapas:

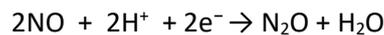
1. los nitratos (NO_3^-) son reducidos a nitritos (NO_2^-)



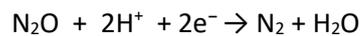
2. los nitritos (NO_2^-) son reducidos óxido nítrico (NO)



3. el óxido nítrico (NO) se reduce a óxido nitroso (N_2O)



4. el óxido nitroso (N_2O) es reducido a nitrógeno gas N_2



En los reactores biológicos, bacterias desnitrificantes como *Pseudomonas* y *Bacillus* llevan a cabo estas reacciones en condiciones anóxicas, utilizando compuestos orgánicos como donadores de electrones. Para optimizar este proceso, es crucial mantener una relación adecuada de carbono a nitrógeno (C/N ratio), típicamente entre 5:1 y 10:1. Si el C/N ratio es insuficiente, se puede añadir una fuente externa de carbono o recircular fangos desde la zona aeróbica, aumentando así la disponibilidad de materia orgánica.

Además, para asegurar que los compuestos orgánicos y los nitratos estén uniformemente distribuidos en todo el reactor, se utiliza un mecánico agitador. Este equipo garantiza una mezcla homogénea, lo que mejora la eficiencia y estabilidad del proceso de desnitrificación

Sin embargo, algunos sistemas MBR optan por eliminar la zona anóxica (Figura 9). Las razones específicas para esta decisión pueden incluir factores como:

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

- **Carga de Nitrógeno Baja:** En sistemas donde la carga de nitrógeno en el influente es baja, la necesidad de desnitrificación es mínima, lo que puede justificar la exclusión de la zona anóxica.
- **Requerimientos de Tratamiento Menos Estrictos:** En aplicaciones donde el efluente no necesita cumplir con estrictos límites de nitrógeno, como en ciertos usos industriales o de riego no sensible, una zona anóxica puede no ser necesario.

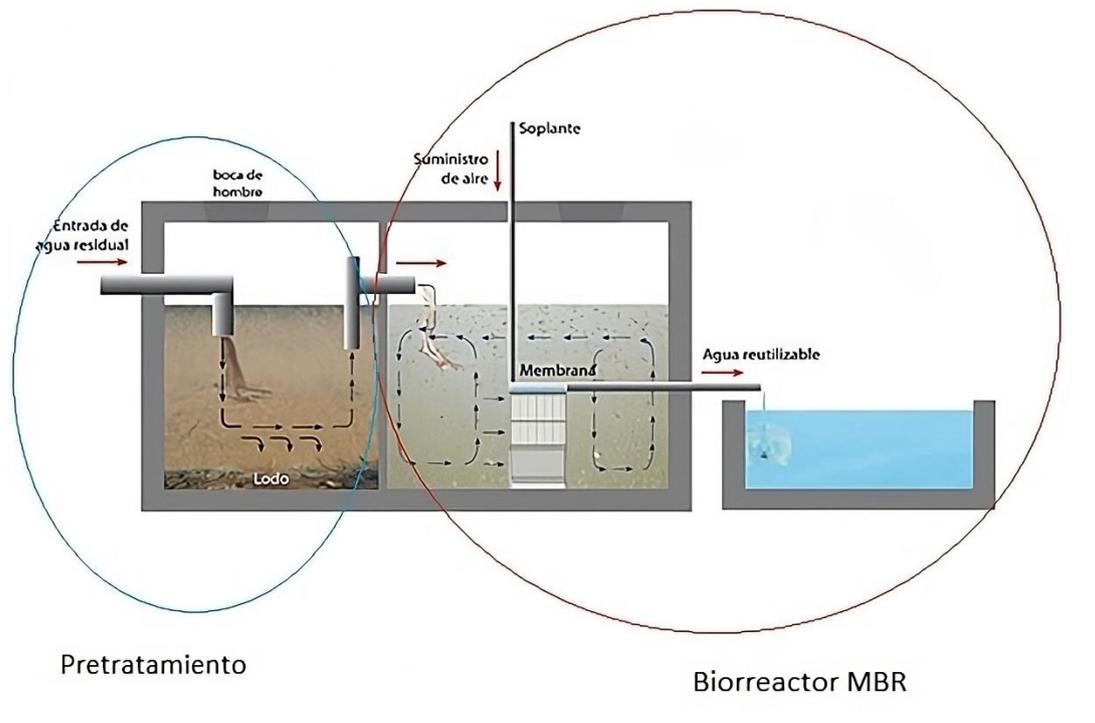


Figura 9. Esquema de tratamiento con MBR sin zona anóxica

(Fuente: Bioazul. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de bioazul.com)

Aunque la exclusión de la zona anóxica puede simplificar el diseño y la operación del sistema, reduciendo los costes iniciales y operativos, es fundamental incluir una zona anóxica en la planta de tratamiento de aguas residuales del campus Vera de la UPV. Esto se debe a varias razones específicas del proyecto:

- **Eliminación de Nitrógeno:** Las aguas residuales del campus contienen niveles significativos de nitrógeno que deben ser eliminados para cumplir con las normativas de calidad del agua para su reutilización. La zona anóxica facilita la desnitrificación, un proceso crucial para convertir nitratos en nitrógeno gas, reduciendo así la concentración de nitrógeno en el efluente. Según estudios, la eficiencia de eliminación de nitrógeno en sistemas MBR con zona anóxica puede alcanzar hasta el 72,3% (Qian Ma, Fengze Han, Feng Lyu and Xiaojun Yang, 2023).
- **Reducir la edad de fango en el sistema** (Sornsiri Sriboonnak, Aegkapan Yanun, Phacharapol Induvesa , Chayakorn Pumas, Kritsana Duangjan , Pharkphum Rakruam, Saoharit Nitayavardhana, Prattakorn Sittisom and Aunnop Wongrueng, 2022). Al reducir la edad de fango de diseño, se puede disminuir la capacidad del biorreactor, lo que a su vez reduce el tamaño y la ocupación de espacio de la planta de tratamiento de aguas residuales MBR. Esto

resulta en una planta de tratamiento más compacta y eficiente, optimizando el uso del terreno y los recursos disponibles.

- **Cumplimiento Normativo:** Para asegurar que el agua tratada cumpla con los estándares establecidos por el Real Decreto 1620/2007 para la reutilización de aguas depuradas, es necesario reducir los niveles de nitrógeno a niveles aceptables. La inclusión del tanque anóxico es esencial para alcanzar estos estándares.
- **Reutilización del Agua Tratada:** El objetivo del proyecto es reutilizar el agua tratada para riego y otras aplicaciones dentro del campus. La zona anóxica asegura que el efluente tenga una calidad adecuada para estos fines, evitando problemas como la eutrofización que puede ocurrir si se utilizan aguas con altos niveles de nitrógeno.
- **Mejora de la Calidad del Efluente:** La inclusión de una zona anóxica no solo ayuda a reducir el nitrógeno, sino que también mejora la eficiencia general del proceso de tratamiento, resultando en un efluente de mayor calidad.

En sistemas de tratamiento de aguas residuales que utilizan MBR, es común que el volumen de la zona anóxica represente aproximadamente el 50% del volumen total del reactor, mientras que la zona aeróbica ocupa el 50% restante (Dome Adoonsook, Chang Chia-Yuan, Aunnop Wongrueng, Chayakorn Pumas, 2019). Esta distribución permite una desnitrificación efectiva en la zona anóxica y una degradación biológica óptima en la zona aeróbica.

8.2.2. La zona aeróbica

Esta unidad combina la eficiencia de la biodegradación de contaminantes con la eficacia de la separación física de las membranas, permitiendo así la producción de un efluente de alta calidad que cumple con las normativas más exigentes de reutilización y vertido.

En la zona aeróbica del biorreactor, las aguas residuales entran y se mezclan con una biomasa activa compuesta por una densa concentración de microorganismos. Estos microorganismos, a través de procesos metabólicos complejos, degradan los contaminantes orgánicos presentes en el agua residual. La aireación, proporcionada por difusores de aire y sopladores, asegura un suministro constante y uniforme de oxígeno. Este oxígeno es esencial para mantener la actividad metabólica de los microorganismos aeróbicos, facilitando la oxidación biológica de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua. Además, la aireación ayuda a mantener los fangos en suspensión, mejorando la eficiencia del proceso de tratamiento biológico.

La interacción continua entre el suministro de oxígeno y la actividad microbiana en el reactor biológico resulta en la transformación eficiente de los compuestos orgánicos e inorgánicos, reduciendo significativamente la carga contaminante del agua residual antes de su paso por las membranas.

Es el corazón del sistema donde se lleva a cabo la degradación biológica de los contaminantes orgánicos. En el reactor biológico, una densa población de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y protozoos, descompone los materiales orgánicos presentes en el agua residual mediante procesos metabólicos aeróbicos y, en algunos casos, anóxicos. Estos microorganismos utilizan la

materia orgánica como fuente de energía y nutrientes, transformándola en productos finales más simples y menos nocivos, como dióxido de carbono, agua y biomasa microbiana.

El proceso de biodegradación incluye la oxidación de materia orgánica y la generación de nueva biomasa celular. Para simplificar, generalmente se utiliza la ecuación de reacción de oxidación total para representarlo:



Es necesario prestar atención a la temperatura de la zona aeróbica, ya que esta influye en la velocidad de crecimiento de los microorganismos. Temperaturas demasiado altas o bajas pueden inhibir el crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos. Los microorganismos aeróbicos suelen rendir mejor en un rango de temperatura de 20°C a 40°C. Valencia tiene cierta ventaja en este aspecto, ya que la temperatura media anual es de alrededor de 20°C. Sin embargo, es necesario prestar especial atención durante el invierno.

La reproducción y el crecimiento de los microorganismos requieren suficiente oxígeno para llevar a cabo el metabolismo aeróbico. Es necesario utilizar un sistema de aireación eficiente (como sopladores o difusores) para aumentar el nivel de oxígeno disuelto en el reactor, asegurando así que el entorno dentro del reactor mantenga una concentración adecuada de oxígeno disuelto.

El nitrógeno y el fósforo son elementos nutritivos esenciales para el crecimiento de los microorganismos. Es necesario asegurar que el reactor contenga suficientes nutrientes para los microorganismos, garantizando que puedan realizar un metabolismo y una reproducción efectivos, logrando así un tratamiento eficiente de las aguas residuales.

Por otro lado, un reactor de tamaño adecuado que permite una edad de fango óptima ayuda a mantener una población microbiana saludable y activa. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso de tratamiento, sino que también minimiza la producción de fangos y reduce los costes operativos asociados con la gestión de estos fangos.

8.2.3. Membranas

Las membranas desempeñan un papel crucial en los MBR, actuando como una barrera física que permite la separación eficiente de los sólidos suspendidos y los microorganismos del efluente tratado. Esta tecnología ha revolucionado el tratamiento de aguas residuales, permitiendo obtener una calidad de efluente superior en comparación con los métodos tradicionales. Las membranas MBR han evolucionado significativamente desde su introducción, mejorando en términos de durabilidad, eficiencia y resistencia a la contaminación, lo que ha llevado a una mayor adopción en aplicaciones industriales y municipales.

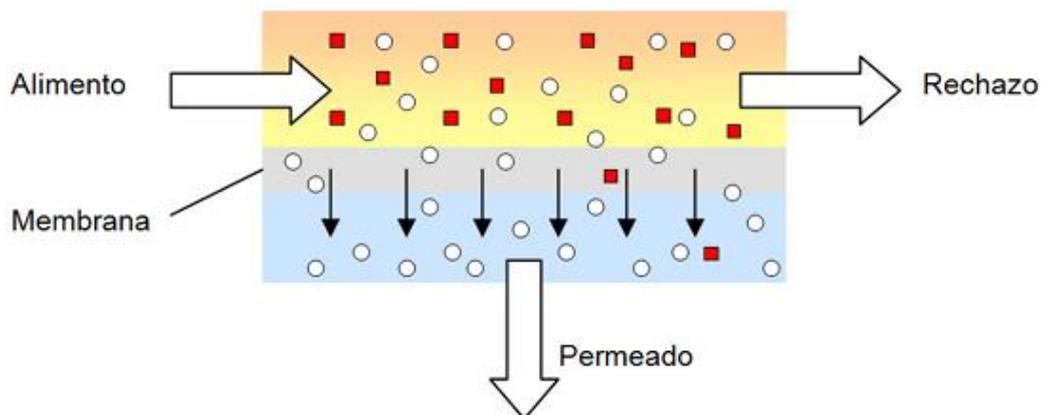


Figura 10. Principio de filtración de membrana en la zona aeróbica (MBR)

En la Figura 10, se puede observar el principio de funcionamiento de la membrana en un reactor biológico aeróbico MBR para la filtración de aguas residuales. La membrana actúa como una barrera selectiva que separa los componentes del agua residual en diferentes flujos:

Alimento: Es la corriente de agua residual, que contiene una mezcla de sólidos suspendidos, contaminantes y microorganismos, se introduce en el sistema y llega a la superficie de la membrana.

Membrana: La membrana está diseñada con poros muy finos que permiten el paso de moléculas pequeñas y agua, mientras que retienen las partículas más grandes, sólidos suspendidos y microorganismos en su superficie.

Partículas Rechazadas: Las partículas que no pueden atravesar la membrana (cuadrados rojos y círculos blancos en el esquema) se acumulan en la superficie de la membrana y son eventualmente removidas como rechazo.

Rechazo: El rechazo es el flujo de sólidos y contaminantes que son retenidos por la membrana y no pueden pasar a través de ella. Este flujo debe ser gestionado adecuadamente para evitar el ensuciamiento de la membrana y mantener la eficiencia del sistema.

Permeado: El permeado es el flujo de agua limpia que ha pasado a través de la membrana, libre de sólidos suspendidos y microorganismos. Esta agua tratada puede ser reutilizada o descargada según las normas de calidad del agua.

Una vez que los contaminantes han sido degradados biológicamente, el agua tratada pasa a través de las membranas de ultrafiltración de fibra hueca. Estas membranas de ultrafiltración tienen poros con tamaños típicos entre **0,01** y **0,1 micras**, lo que les permite actuar como una barrera física extremadamente efectiva.

Las membranas de ultrafiltración utilizadas en los sistemas MBR hoy en día suelen estar hechas de materiales como la polietersulfona (PES), fluoruro de polivinilideno (PVDF) y polipropileno (PP). Estos materiales son conocidos por su durabilidad, resistencia química y capacidad para soportar

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

condiciones operativas rigurosas. Además, su estructura permite una alta permeabilidad y una eficiente retención de contaminantes.

La Figura 11 muestra las diferentes capas de una membrana tubular, que se compone principalmente de dos partes: la capa activa y la capa de soporte. La capa activa es la superficie donde ocurre la filtración; ésta contiene poros muy finos que permiten la separación eficiente de partículas y contaminantes del agua residual. Esta capa es crucial para la eficacia del proceso de filtración, ya que determina el tamaño de las partículas que pueden ser separadas. La capa de soporte, por otro lado, proporciona estructura y estabilidad a la membrana. Esta capa más gruesa y robusta sostiene la capa activa, asegurando que la membrana mantenga su integridad y funcionalidad bajo las condiciones de operación del reactor. La combinación de estas dos capas permite a la membrana ofrecer una alta eficiencia de filtración y una durabilidad prolongada, esenciales para el funcionamiento continuo y efectivo del sistema de tratamiento de aguas residuales.

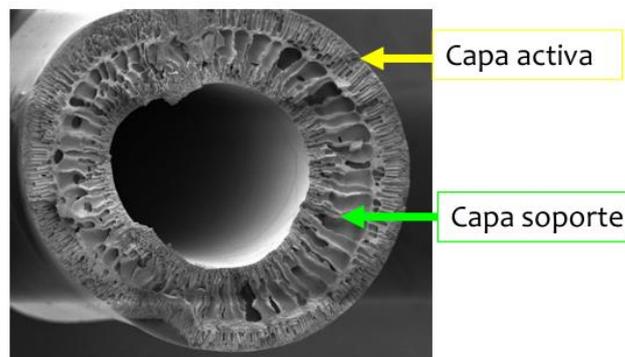


Figura 11. Capas de la membrana tubular

El tamaño de los poros de la capa activa determina el tamaño de las partículas que pueden ser eliminadas. Basado en el tamaño de estos poros, las membranas se clasifican en microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF).

- **Microfiltración:** 0,1 μ m a 0,5 μ m
- **Ultrafiltración:** 0,01 μ m a 0,1 μ m

Las membranas de ultrafiltración retienen sólidos suspendidos, bacterias, otros microorganismos y las finas partículas de fango que resultan de la biodegradación. Para poner esto en perspectiva:

- **Sólidos suspendidos:** Típicamente tienen tamaños de partículas superiores a **1 micra**, por lo cual son fácilmente retenidos por las membranas de ultrafiltración.
- **Bacterias:** Generalmente tienen tamaños que varían entre **0,2 y 2 micras**. Dado que el tamaño de los poros de las membranas de ultrafiltración es considerablemente menor, las bacterias no pueden pasar a través de ellas.
- **Partículas de fango:** Las finas partículas de fango resultantes de la biodegradación tienen tamaños que pueden ser inferiores a 1 micra. Las membranas de ultrafiltración son efectivas en retener estas partículas finas, asegurando que el efluente sea de alta calidad y libre de sólidos.
- **Otros microorganismos:** Incluyendo protozoos y virus. Los protozoos suelen tener tamaños mucho mayores que las bacterias, mientras que los virus, aunque más pequeños (**20-300**

nanómetros), también son retenidos eficientemente por las membranas de ultrafiltración debido a la estructura y diseño de estas.

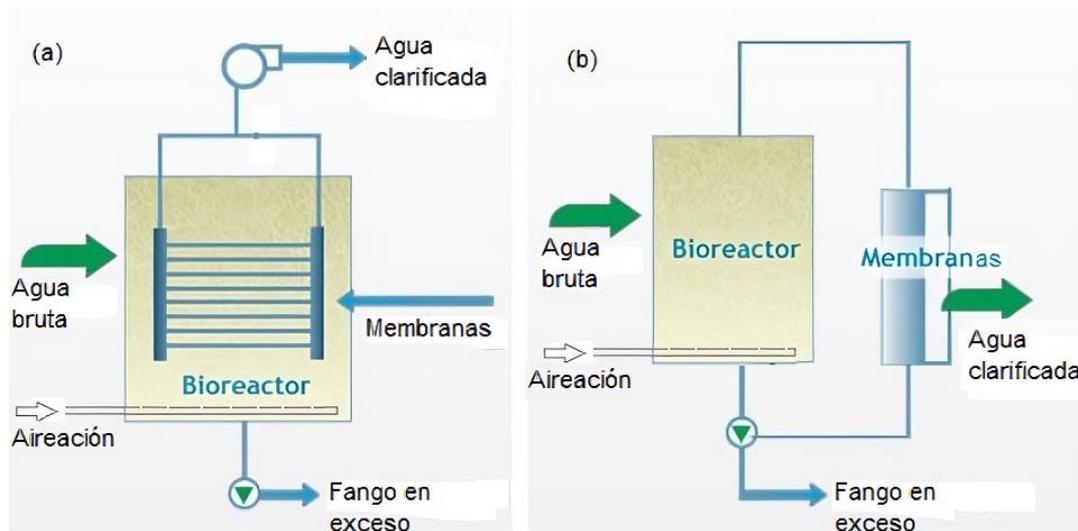


Figura 12. Esquema de la membrana sumergida (izquierda) y externa (derecha)

(Fuente: Gedar. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de gedar.com)

Los MBR se pueden clasificar en dos configuraciones según la ubicación de las membranas: dentro del reactor biológico (sumergidas) o fuera del reactor biológico (externas), como se muestra en la Figura 12. En la actualidad, para aplicación a aguas residuales domésticas, la mayoría de las membranas de están sumergidas dentro del biorreactor. Este enfoque permite un diseño más compacto del equipo y, al mismo tiempo, las corrientes de aire generadas durante la aireación en el biorreactor ayudan a limpiar las membranas, reduciendo el ensuciamiento y mejorando la eficiencia operativa.



Figura 13. Membrana tubular

(Fuente: RisingSun Membrane Technology. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de made-in-china.com)

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Las membranas tubulares (Figura 13) están diseñadas para operar fuera del reactor biológico, configuración externa, ofreciendo una configuración que facilita el mantenimiento y la limpieza. Estas membranas están alojadas en módulos independientes donde el agua residual es bombeada desde el reactor biológico hacia los módulos de membrana. La configuración externa permite un mayor control sobre las condiciones de operación, como la presión y el flujo, y simplifica el acceso para la limpieza y el reemplazo de las membranas. Esta disposición también ayuda a minimizar el ensuciamiento de las membranas, ya que se pueden implementar técnicas de limpieza más efectivas sin interrumpir el funcionamiento del reactor biológico.

Las membranas de fibra hueca (Figura 14) son comúnmente utilizadas dentro del reactor biológico debido a su diseño compacto y eficiente. Estas membranas están sumergidas directamente en el licor mixto del reactor, donde el agua residual fluye a través de las fibras huecas. La estructura de fibra hueca permite una alta densidad de superficie de filtración en un espacio reducido, lo que maximiza la capacidad de tratamiento del reactor.



Figura 14. Un módulo de membranas de fibra hueca

(Fuente: Juntai Plastic. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de chinambbr.com)

Las membranas de fibra hueca son comúnmente utilizadas dentro del reactor biológico debido a su diseño compacto y eficiente. Estas membranas están sumergidas directamente en el licor mixto del reactor, donde el agua residual fluye a través de las fibras huecas. La estructura de fibra hueca permite una alta densidad de superficie de filtración en un espacio reducido, lo que maximiza la capacidad de tratamiento del reactor.

Actualmente, la mayoría de los sistemas MBR utilizan un diseño con membranas sumergidas debido a su configuración compacta y alta eficiencia en el uso del espacio. Este diseño permite una integración más sencilla y eficiente dentro del reactor biológico. Una de las principales ventajas de las membranas internas es la capacidad de utilizar las burbujas generadas por el sistema de aireación para limpiar la superficie externa de las membranas. Este proceso de limpieza continua ayuda a reducir el ensuciamiento de las membranas, extendiendo los intervalos entre limpiezas necesarias y mejorando la eficiencia operativa del sistema.

8.2.4. Sistema de aireación

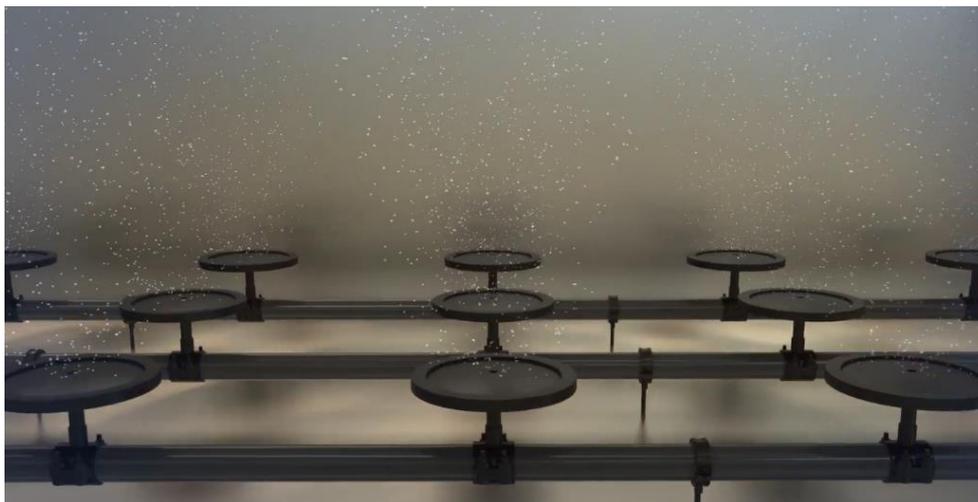


Figura 15. Difusores de sistema de aireación

(Fuente: SigmaDAF Clarifiers. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de sigmadafclarifiers.com)

El sistema de aireación, compuesto por difusores de aire y soplantes para introducir el aire en los difusores, juega un papel crucial en el funcionamiento del reactor biológico. Este sistema introduce burbujas de aire en el reactor (Figura 15), proporcionando oxígeno a los microorganismos y manteniendo la biomasa en suspensión. La aireación es esencial para los siguientes procesos y funciones:

- **Provisión de Oxígeno:** El oxígeno es fundamental para los microorganismos aeróbicos, que degradan la materia orgánica presente en el agua residual. La aireación asegura un suministro constante y adecuado de oxígeno, facilitando la oxidación biológica de los contaminantes.
- **Mantenimiento de la Biomasa en Suspensión:** Al mantener la biomasa en suspensión, el sistema de aireación previene la sedimentación de los fangos, asegurando una mezcla homogénea y una eficiencia óptima en la degradación de los contaminantes.
- **Procesos de Nitrificación:** La nitrificación, que es la conversión de nitrógeno amoniacal en nitratos, y es un proceso que requiere oxígeno. La aireación adecuada es crucial para mantener este proceso y asegurar la oxidación efectiva de compuestos nitrogenados a nitratos pasando primero por nitritos.
- **Limpieza de Membranas:** Además de proporcionar oxígeno, el sistema de aireación también se utiliza para limpiar las membranas sumergidas. Las corrientes de aire generadas durante la aireación ayudan a eliminar las partículas y el *biofouling* acumulado en las superficies de las membranas, mejorando su eficiencia y prolongando su vida útil. Por esta razón, los difusores de aire suelen ubicarse debajo del módulo de membranas.

En resumen, el sistema de aireación es vital para la eficiencia del reactor biológico, no solo en términos de oxigenación y mezcla, sino también en el mantenimiento y limpieza de las membranas sumergidas. La integración adecuada de este sistema asegura el funcionamiento óptimo y la longevidad del sistema MBR.

8.2.5. Sistema de extracción de fangos

Aunque la tecnología MBR genera una cantidad relativamente baja de fangos, la extracción regular de fangos es esencial para mantener una concentración óptima de biomasa activa en el reactor biológico. Esto asegura que los microorganismos responsables de la degradación de los contaminantes orgánicos operen en condiciones óptimas. Además, previene la sobrecarga de sólidos que podría llevar a la sedimentación y estratificación dentro del reactor, lo cual podría inhibir el contacto eficiente entre los microorganismos y los contaminantes. La acumulación excesiva de fangos puede causar problemas operativos, como la obstrucción de tuberías, bombas y membranas. Por lo tanto, se requiere un sistema de extracción de fangos que garantice la eliminación eficiente de los sólidos suspendidos y los fangos excedentes, evitando así la acumulación excesiva que podría afectar negativamente la eficiencia del tratamiento biológico y la calidad del efluente. Debido a la presión del agua, este sistema puede funcionar sin la necesidad de asistencia motorizada.

Los fangos extraídos son sometidos a tratamientos adicionales. Una parte de los fangos puede ser tratada mediante digestión anaerobia. La recirculación de los fangos a la zona anóxica puede mejorar el proceso de desnitrificación, ya que los fangos contienen microorganismos desnitrificantes que ayudan a convertir los nitratos en nitrógeno gas y a mantener un equilibrio adecuado entre el reactor biológico y la zona anóxica. Otra parte de los fangos puede ser sometida a procesos de compostaje, convirtiendo los fangos en compost que puede ser utilizado como enmienda del suelo en aplicaciones agrícolas.

9. Diseño del biorreactor de membranas

Para lograr un diseño eficiente del MBR, es fundamental realizar cálculos precisos y detallados sobre varios aspectos del sistema. Primero, se debe determinar el tamaño óptimo del biorreactor (zona anóxica y zona aeróbica). La zona anóxica es esencial para el proceso de desnitrificación, donde los nitratos son convertidos en nitrógeno gas en condiciones de anoxia. Por otro lado, el reactor biológico debe dimensionarse para maximizar la degradación de la materia orgánica, utilizando la DBO_5 como parámetro clave para evaluar la eficiencia de este proceso.

Otro aspecto crítico es el consumo de oxígeno, necesario para la oxidación de la materia orgánica y el proceso de nitrificación. Este parámetro influye directamente en el diseño de los sistemas de aireación y en la selección de los soplantes adecuados para garantizar un suministro constante de oxígeno.

El área de las membranas es fundamental para el MBR, ya que determina la capacidad del sistema para separar la biomasa del agua tratada. Es esencial calcular la superficie total de las membranas para evitar obstrucciones y garantizar una operación eficiente.

Finalmente, la potencia de los motores que impulsan dos componentes críticos del sistema debe calcularse meticulosamente. Esto incluye el sistema de aireación, necesario para suministrar oxígeno al reactor biológico y asegurar el correcto funcionamiento del sistema de filtración, así como la separación eficiente de sólidos y líquidos.

9.1. Configuración de la planta depuradora MBR

En el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales mediante tecnología MBR para la UPV, se ha optado por la configuración de **membrana sumergida**, ya que las membranas externas suelen emplearse en el tratamiento de aguas residuales con niveles de contaminación significativamente altos y materia orgánica difícilmente biodegradable (lixiviados, aguas residuales de curtidos, etc.). En nuestro caso, el efluente a tratar presenta una carga contaminante relativamente baja, lo cual hace que las membranas sumergidas sean una opción más adecuada y eficiente. Y la configuración de membrana sumergida ofrece una ventaja significativa en términos de diseño compacto y menor superficie ocupada. Este aspecto es particularmente relevante para la ubicación de la planta en el campus Vera de la UPV, donde el espacio disponible es limitado. La implementación de un sistema de membranas sumergidas no solo optimiza el uso del terreno, sino que también facilita la integración de la planta en el entorno del campus, contribuyendo a una solución de tratamiento de aguas residuales eficiente y sostenible.

Para asegurar que las membranas no se colmatan con sustancias de elevado tamaño presentes en el agua residual, es necesario realizar un pretratamiento.

El pretratamiento incluye el paso del agua a través de rejillas con aberturas grandes más de 5 cm, para eliminar sólidos grandes y las hojas, después otras rejillas más finas de 1-5 cm, seguido de un tamiz con aberturas de 1-5 mm, garantizando la protección de la membrana de ultrafiltración al evitar la entrada de sólidos que puedan dañarla.

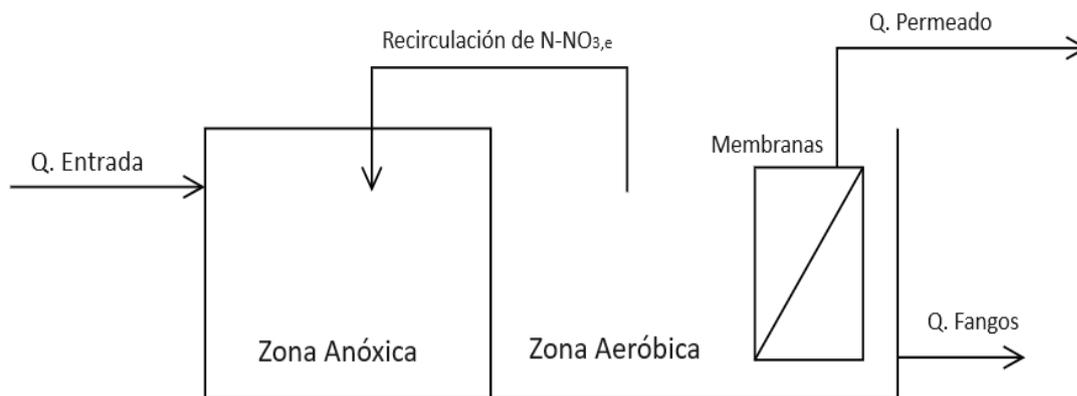


Figura 16. Esquema del proceso MBR después del pretratamiento

La Figura 16 muestra el esquema del proceso MBR. El caudal (Q_f) entra al sistema después del pretratamiento, pasando primero por la zona anóxica, donde se lleva a cabo la desnitrificación. Desde la zona anóxica, el flujo se dirige a la zona aerobia, donde se realiza la nitrificación y la eliminación de materia orgánica.

En la zona aeróbica, el agua tratada pasa a través de las membranas de ultrafiltración, produciendo el permeado, que es el efluente tratado final. El fango de la zona aeróbica se recircula de nuevo al reactor anóxico para mantener una concentración similar de SSLM en ambos reactores y para suministrar nitratos al reactor anóxico para su desnitrificación. El exceso de fango se retira del sistema para evitar que aumente la concentración de SSLM.

Este diseño compacto y eficiente asegura un tratamiento adecuado de las aguas residuales, optimizando el uso del espacio y los recursos, y es especialmente adecuado para su implementación en el campus Vera de la UPV.

9.2. Parámetros de diseño

9.2.1. Edad de fango (θ)

La edad del fango es un parámetro fundamental en el diseño y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en sistemas MBR. La edad del fango se refiere al tiempo promedio que los sólidos suspendidos (microorganismos) permanecen en el sistema de tratamiento. Es importante para el equilibrio del proceso biológico, ya que influye en la capacidad del sistema para degradar la materia orgánica y otros contaminantes.

Una edad de fango adecuada asegura que haya suficientes microorganismos para degradar la materia orgánica y otros contaminantes presentes en las aguas residuales, y garantiza que los procesos de nitrificación y desnitrificación funcionen correctamente, ya que las bacterias responsables de la nitrificación son las de crecimiento más lento. Además, ayuda a mantener una población microbiana balanceada y eficiente. Una edad de fango demasiado pequeña puede resultar en la pérdida de

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

microorganismos antes de que completen su ciclo de vida útil, mientras que una edad de fango excesivamente grande puede llevar a la acumulación de sólidos y al exceso de microorganismos envejecidos y menos eficientes.

Los MBR que **no incluyen la zona anóxica**, la edad del fango crítica (θ_c) se puede calcular utilizando la fórmula:

$$\theta_c = \frac{1}{\mu_{nitro}}$$

Y para MBR que **incluyen la zona anóxica**, la fórmula para calcular θ_c es:

$$\theta_c = \frac{1}{\mu_{nitro} \times (1 - f_{anox})}$$

En donde f_{anox} es la fracción anóxica del reactor, en este caso es 0,5, ya que se necesita un elevado volumen de zona anóxica para contrarrestar el oxígeno que se podría introducir debido a la turbulencia creada por la elevada recirculación. μ_{nitro} es la velocidad específica de crecimiento de las bacterias nitrosomonas (oxidantes de nitrógeno amoniacal) en d^{-1} . Las nitrosomonas son bacterias autotróficas que desempeñan un papel fundamental en la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-), un paso clave en el ciclo del nitrógeno. El valor del balance de nitrosomonas depende de la temperatura. En el rango de temperaturas en el que se encuentra el agua, las bacterias oxidantes de amonio (nitrosomonas) son de crecimiento más lento que las bacterias oxidantes de nitritos. Es por ello por lo que la edad crítica del fango se calcula a partir del balance de las bacterias oxidantes de amonio en el proceso.

Como la edad de fango está relacionada con la temperatura, a la hora de diseñar la planta depuradora hay que fijarse en el clima de Valencia.

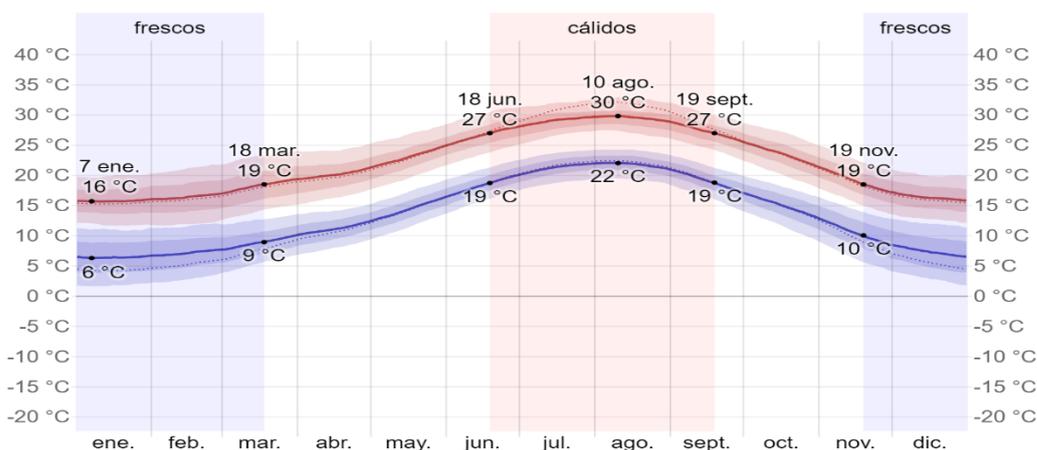


Figura 17. Temperaturas máximas y mínimas promedio anuales en Valencia

(Fuente: WeatherSpark. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de weatherspark.com)

La Figura 17 muestra las temperaturas máximas y mínimas promedio anuales en Valencia, la temperatura mínima de Valencia está alrededor de 6°C, es el caso más desfavorable.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Es importante destacar que la temperatura del aire no siempre representa la temperatura del agua residual, aunque la temperatura del aire influye en la temperatura del agua residual hasta cierto punto. La Figura 18 muestra cómo varía la temperatura del agua a lo largo del año de Valencia.

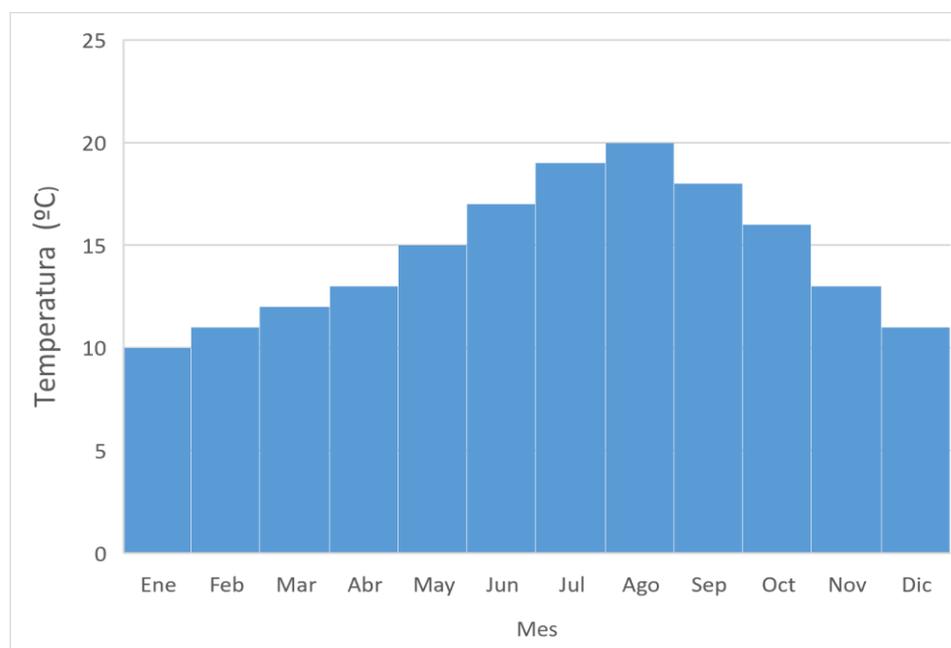


Figura 18. Temperatura del agua de la red de Valencia

(Fuente: IDEA)

La temperatura del agua influye significativamente en el valor del balance de nitrosomonas, y la edad del fango crítico depende del balance de nitrosomonas como se ha comentado anteriormente. En este caso, el MBR diseñado **incluye la zona anóxica**, y f_{anox} igual a **0,5**, ya que la zona anóxica ocupa el 50% del volumen total del reactor, lo cual es un diseño típico para un reactor MBR con eliminación de nitrógeno como también se ha comentado anteriormente.

Tabla 5. Edad de fango en función de temperatura

Temperatura(agua) (°C)	$\mu(\text{día}^{-1})$	Edad de fango (día)	Margen de seguridad X2 (día)	Margen de seguridad X3 (día)
6	0,189	10,58	21,16	31,75
10	0,290	6,90	13,79	20,69
15	0,490	4,08	8,16	12,24
18	0,560	3,57	7,14	10,71
20	0,650	3,08	6,15	9,23
23	0,790	2,53	5,06	7,59

Un aumento en la temperatura generalmente incrementa la velocidad específica de crecimiento de nitrosomonas, mientras que una disminución en la temperatura reduce esta tasa. Esto, a su vez, afecta la edad del fango (θ_c), ya que una menor temperatura el balance de nitrosomonas requiere una mayor edad del fango para mantener la eficiencia del proceso de nitrificación. Al calcular la edad del fango, es necesario aplicar un margen de seguridad para compensar las variaciones y asegurar un rendimiento óptimo del sistema. Este margen de seguridad generalmente se encuentra entre 2 y 3.

Para evitar que, durante el clima extremo en invierno, la planta de tratamiento de aguas residuales no funcione adecuadamente, se deben considerar las condiciones más extremas al diseñar. Consideramos edad de fango en el caso extremo 6,90 días cuando la temperatura del agua sea mínima en 10°C, y multiplica por margen de seguridad (entre 2-3), en este caso el margen de seguridad multiplica por 3, porque se ha considerado el caso extremo. Por tanto, edad de fango de diseño es: **21 días**

Ec.1:

$$\theta = \frac{V \times SSLM}{\Delta X}$$

Donde

- ΔX es la producción neta de fangos (kg/día)
- V es el volumen del reactor biológico (m³)
- $SSLM$ es la concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla (kg/m³)

9.2.2. Sólidos en suspensión en el licor de mezcla

Los sólidos en suspensión en el licor de mezcla (SSLM) se refieren a la concentración de sólidos suspendidos en el fango activo dentro de un reactor biológico en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Este parámetro es crucial para la operación eficiente de sistemas biológicos, ya que influye en la capacidad de tratamiento, la eficiencia de la transferencia de oxígeno y los costes energéticos.

Un aumento en la concentración de SSLM permite una reducción en el volumen necesario del reactor biológico. Esto se debe a que una mayor cantidad de biomasa puede procesar más carga de contaminación en un espacio más reducido. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración de SSLM, la eficiencia de la transferencia de oxígeno disminuye (SCHARZ, A.O., RITTMANN, B.E., CRAWFORD, G.V., KLEIN, A.M., DAIGGER, G.T, 2006). Esto se debe a que una mayor densidad de sólidos suspendidos puede dificultar el movimiento del oxígeno a través del medio líquido. Esto hace que aumente el coste energético en el sistema de aireación para mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto en el reactor, compensando la disminución en la eficiencia de la transferencia de oxígeno.

La concentración de SSLM se mide en gramos por litro (g/L) y típicamente varía entre 8 g/L y 10 g/L en sistemas bien gestionados con membrana sumergida. Para este caso se toma el valor más conservado de 8 g/L.

9.2.3. La carga másica (C_m)

La carga másica C_m es un parámetro utilizado para describir la relación entre la carga orgánica que entra en el sistema (expresada en DBO_5 o DQO) y la cantidad de microorganismos en el reactor.

Ec.2:

$$C_m = \frac{Q_f \times DBO_{5,f}}{SSLM \times V}$$

Donde:

- Q_f es el caudal de entrada (m^3/d)
- $DBO_{5,f}$ es la concentración de materia orgánica en la entrada ($kg\ DBO_5/m^3$)
- V es el volumen del reactor (m^3)
- $SSLM$ es la concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla (kg/m^3)

El rango adecuado de la carga másica varía según el tipo de sistema y las condiciones operativas específicas. En el caso de los sistemas MBR, estos suelen operar con una carga másica baja, comprendida entre 0,08 y 0,30 $kg\ DBO_5 / (kg\ SSLM \cdot día)$. Este rango contribuye a mejorar la eficiencia en la eliminación de materia orgánica y la calidad del efluente, además de reducir la producción de fango y el ensuciamiento orgánico (fouling) de las membranas (Wang, L.K., Wu, Z., Shammam, N.K, 2009). Al diseñar los reactores, es fundamental garantizar que el valor de la carga másica (C_m) se mantenga lo más bajo posible, idealmente por debajo de 0,12 $kg\ DBO_5 / (kg\ SSLM \cdot día)$, para optimizar el rendimiento del sistema y asegurar su estabilidad operativa. El valor de este parámetro se calculará teniendo en cuenta la edad del fango calculada como parámetro de diseño.

Después de establecer estos valores concretos de algunos parámetros, procederemos a realizar cálculos más detallados para la planta de tratamiento de aguas residuales, asegurando la eficiencia en la eliminación de contaminantes y la estabilidad del proceso.

Tabla 6. Datos de partida para el diseño del MBR

Parámetros	Valor
Q_f ($m^3/día$)	500
θ (día)	21
SSLM (kg/m^3)	8
DBO_5 de Q_f (mg/L)	136
Sólido en suspensión (mg/L)	160
Nitrógeno (mg/L)	35,43
Fósforo (mg/L)	12,8

Cabe comentar que los valores de DBO_5 , SS, N y P son considerados iguales en el agua residual bruta y tras el pretratamiento (alimentación al MBR), ya que las rejillas y el tamiz solo eliminarán sólidos de gran tamaño que no se contabilizan en los análisis de los parámetros mencionados.

9.3. Cálculos de diseño y operación

9.3.1. Volumen del reactor

Para calcular el volumen del reactor de la planta MBR con la Ec.1, hay que calcular el valor de la producción neta de fangos ΔX .

Ec.3:

$$\Delta X = Pe \times DBO_{5,f}$$

Donde:

- **Pe** es la producción específica de fango (ATV A-131), con unidades: kg SS/ kg DBO₅

La fórmula para determina Pe es:

$$Pe = 0,75 + 0,6 \times \frac{SS}{DBO_{5,f}} - \frac{0,8 \times 0,17 \times 0,75 \times \theta \times F_T}{1 + 0,17 \times \theta \times F_T}$$

Donde:

- SS es la concentración de sólidos en suspensión en el agua de entrada:

$$SS = 160 \frac{mg}{L}$$

- DBO_{5,f} es la concentración de DBO₅ de nle el agua de entrada:

$$DBO_{5,f} = 136 \frac{mg}{L}$$

- F_T es un parámetro que depende de la temperatura del agua. Se calcula con la fórmula:

$$F_T = 1,072^{(T-15)}$$

Una vez calculada la producción neta de fangos (ΔX) con la Ec.3, despeja la Ec.1 para calcular el volumen del reactor.

$$V = \frac{\theta \times \Delta X}{SSLM}$$

Donde:

- El valor de **SSLM** es 8 kg/m³

Con los pasos anteriores se puede obtener una tabla que muestra el volumen del reactor variando con el valor de la temperatura del agua residual, considerando la edad de fango igual a 21 días (9.1.1. justificación)

Tabla 7. Volumen de reactor en función de temperatura del agua residual

θ (día)	T. del agua (°C)	FT	Pe (kg SS/kg DBO ₅)	ΔX (kg SS/día)	V (m ³)
21	10	0,706	1,0263	69,785	183,19
21	12	0,812	1,0098	68,667	180,25
21	15	1,000	0,9872	67,128	176,21
21	18	1,232	0,9670	65,758	172,62
21	20	1,416	0,9550	64,939	170,47

La Tabla 7 muestra cómo los parámetros Pe, Cm, ΔX y volumen de reactor (V) varían con la temperatura del agua residual en Valencia en un rango de 10°C a 20°C. A medida que la temperatura del agua aumenta, Pe y ΔX disminuyen, indicando una menor producción de sólidos. Simultáneamente, Cm aumenta ligeramente, reflejando una mayor carga orgánica tratada por la biomasa. El volumen del reactor necesario disminuye, sugiriendo una mayor eficiencia del proceso de tratamiento a temperaturas más altas.

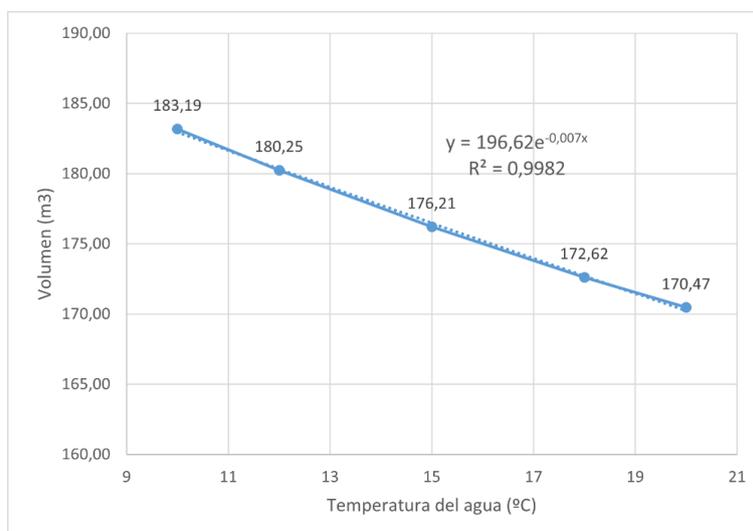


Figura 19. Relación entre la Temperatura del Agua y el Volumen del Reactor

La Figura 19 muestra de manera más intuitiva cómo el volumen del reactor varía en función de la temperatura del agua. A medida que la temperatura aumenta, el volumen del reactor necesario disminuye. Esto se evidencia en la curva de tendencia, que sigue una relación exponencial decreciente. La ecuación que describe esta relación es:

$$V = 196,62e^{-0,007x}$$

El coeficiente (R^2) de determinación de 0,9982 indica un ajuste excelente del modelo a los datos observados.

$$V = 183,19 \text{ m}^3$$

$$V_{anox} = V_{aero} = 50\% \times V = 91,60 \text{ m}^3$$

Una vez determinado el volumen del reactor, se sustituye los valores en Ec.2 para calcular la **carga másica C_m** :

$$C_m = \frac{Q_f \times DBO_{5,f}}{SSLM \times V} = \frac{500 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 136 \frac{\text{mg } DBO_5}{L}}{8 \frac{\text{kg } SS}{\text{m}^3} \times 183,19 \text{m}^3} = 0,0464 \frac{\text{kg } DBO_5}{\text{kg } SS}$$

El valor de la carga másica C_m es igual a $0,0464 \frac{\text{kg } DBO_5}{\text{kg } SS}$, que es menor que $0,12 \frac{\text{kg } DBO_5}{\text{kg } SS}$, por tanto, cumple con el orden de magnitud de la C_m para el diseño del MBR.

ΔX para edad de fango de 21 días y con una temperatura de agua de 10°C , sustituyendo en Ec 3:

$$\Delta X = P_{e_{10^\circ\text{C}}} \times DBO_{5,f} = 1,0623 \frac{\text{kg } SS}{\text{kg } DBO_5} \times \frac{136 \text{ mg } DBO_5}{L} \times 500 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\Delta X = 72,24 \text{ kgss/día}$$

9.3.2. Dimensión del reactor biológico

Sabiendo que el volumen del reactor biológico calculado es de $183,19 \text{ m}^3$ y que la profundidad del reactor se supone a $3,2 \text{ m}$, se procederá a la instalación de un sistema de difusores de aire en el fondo del reactor biológico. Teniendo en cuenta estas dimensiones, la superficie que ocupa el reactor biológico es de $57,25 \text{ m}^2$. Los difusores de aire se colocarán a una profundidad de 3 m , dejando un margen de 20 cm desde el fondo del reactor para la instalación de las tuberías y los difusores. Para evitar que el reactor sea demasiado largo y mantener una apariencia estética y compacta, se ha decidido que el ancho sea de $6,5 \text{ metros}$. Con esta medida, la longitud del reactor sale a $8,81 \text{ m}$. Además, el reactor de la zona aeróbica necesita extenderse $1,8 \text{ metros}$ adicionales para la colocación del módulo de membrana, asegurando así la funcionalidad y eficiencia del sistema. Por tanto, la dimensión del reactor biológico sería:

- **Longitud: 10,61 metros**
- **Ancho: 6,5 metros**
- **Altura: 3,2 metros**

La zona anóxica del reactor biológico ocupa $91,60 \text{ m}^3$ (50%Vtotal). La zona aeróbica del reactor biológico ocupa $91,60 \text{ m}^3$ más el volumen que necesitan para los módulos de membranas ($37,49 \text{ m}^3$), resultando un total de volumen del reactor biológico ocupada de **$220,69 \text{ m}^3$** . Como los módulos están en zona aireada, el volumen total de la zona aerobia será de $129,09 \text{ m}^3$.

La sala de control está adyacente al reactor, permitiendo la supervisión y control de todos los aspectos de la planta de tratamiento de aguas residuales. Esta sala mide 4 metros de longitud, con la misma altura y ancho que el reactor, lo que garantiza un acceso y una visualización óptima de todos los procesos. La sala está equipada con sistemas de monitoreo avanzados para medir y controlar los parámetros críticos de operación de la planta, asegurando una gestión eficiente y segura del tratamiento de aguas residuales.

Es necesario instalar un tanque para el almacenamiento del agua tratada por la planta MBR. Este tanque tendrá la función de almacenar el agua depurada para su posterior reutilización. Las especificaciones del tanque son una **altura de 8 metros** y un **diámetro de 7 metros**, el volumen del tanque es de aproximadamente 307,88 m³.

9.3.3. Eliminación de nitrógeno y fósforo

La relación de recirculación r : En una planta de tratamiento de aguas residuales con tecnología MBR, este parámetro es fundamental para igualar la concentración de SLM en ambas zonas y para recircular nitratos desde la zona aeróbica al anóxico, facilitando así los procesos de desnitrificación. Se ha seleccionado una r de 3. A continuación se calculará con este dato el rendimiento de desnitrificación para ver si es el adecuado.

$$\text{Rendimiento} = \frac{Q_{ff} \times r \times N_{NO_{3,e}}}{Q_f \times (1 + r) \times N_{NO_{3,e}}} = \frac{3}{1 + 3} = 0,75$$

Con estos datos, se procede a realizar un balance de N a la instalación de tratamiento biológico.

En primer lugar, se calcula el nitrógeno total a la entrada, que estará mayoritariamente en forma amoniacal.

$$N_{total} = 500m^3/d \times \frac{35,45}{1.000} kg/m^3 = 17,725kg/dia$$

Parte del N de entrada se asimilará por los microorganismos, ya que lo necesitan para su crecimiento. El nitrógeno asimilado se considera el 12% de la producción de volátiles (ΔX_v), suponiendo que el porcentaje de volátiles es del 80% ($\Delta X_v = \Delta X \cdot 0,8$):

$$N_{asimilación\ nutrientes} = 72,24 \frac{kg\ SS}{día} \times 0,8 \times \frac{12}{100} = 6,935\ kg/dia$$

Nitrógeno eliminado por nitrificación-desnitrificación:

$$N_{nitrificación-desnitrificación} = \text{Rendimiento} \times (N_{total} - N_{asimilación\ nutrientes})$$

Sustituye por valor numérico:

$$N_{nitrificación-desnitrificación} = 0,75 \times (17,725 - 6,935) = 8,0925\ kg/dia$$

Nitrógeno restante en el permeado:

$$N_{nitrificación-desnitrificación} = (1 - \text{Rendimiento}) \times (N_{total} - N_{asimilación\ nutrientes})$$

Sustituye por valor numérico:

$$N_{restante} = (1 - 0,75) \times (17,725 - 6,935) = 2,6975\ kg/dia$$

Concentración de nitrógeno en el permeado, se supone $Q_{entrada} = Q_{permeado} = 500\ m^3$:

$$C_{permeado} = \frac{2,6975 \frac{kg}{día}}{500 \frac{m^3}{día}} = 5,395\ mg/L$$

La concentración de nitrógeno igual a 5,395 mg/L es menor que 15 mg/L, por tanto, cumple el requisito de la legislación.

Fósforo eliminado por la nutrición de la producción de volátiles (ΔX_v): 2% de la masa de la producción volátiles, se supone que el porcentaje de volátiles es 80% de la producción neta de fangos de ΔX :

$$P_{nutriente} = 72,24 \frac{kg\ SS}{día} \times 0,8 \times \frac{2}{100} = 1,175\ kg/día$$

9.3.4. Consumo total de oxígeno

Consumo total de oxígeno: Es la suma de oxígeno consumido por los procesos químicos de oxidación de la materia orgánica y por el proceso de nitrificación-desnitrificación.

Tabla 8. Consumo específico de O_2 ($kgO_2/kgDBO_5$)

(Fuente: Henze et al. Wastewater Treatment, 2002)

EDAD DEL FANGO	SÍNTESIS	ENDOGENESIS
4	0,54	0,32
5	0,55	0,36
6	0,56	0,40
8	0,58	0,46
10	0,60	0,5
12	0,62	0,53
15	0,62	0,57
20	0,62	0,62
25	0,62	0,65

Consumo de oxígeno por síntesis, para la edad de fango de 21 días es:

$$O_{2,síntesis} = 0,62 \frac{kg\ O_2}{kg\ DBO_5} \times 136 \frac{mg\ DBO_5}{L} \times 500 \frac{m^3}{día} = 42,16\ kg\ O_2$$

Consumo de oxígeno por endogénesis para la edad de fango a 21 días se calcula como se muestra a continuación, interpolando para obtener el valor a 21 días:

$$O_{2,endogenesis} = \left[0,62 + 1 \times \left(\frac{0,65 - 0,62}{25 - 20} \right) \right] \frac{kg\ O_2}{kg\ DBO_5} \times 136 \frac{mg\ DBO_5}{L} \times 500 \frac{m^3}{día}$$

$$O_{2,endogenesis} = 42,568\ kg\ O_2$$

En el caso de calcular el consumo de oxígeno para nitrificación y desnitrificación, se supone que:

- 100% de nitrificación en zona aerobia, es decir, todo el nitrógeno a la entrada se nitrifica.
- 100% de desnitrificación en zona anóxica.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Consumo de oxígeno asociado al nitrógeno que se nitrifica pero no se desnitrifica:

$$O_{2,nitrificacion} = 4,6 \frac{kg O_2}{kg N - NO_{3,e}} \times 2,6975 \frac{kg N - NO_{3,e}}{día} = 12,409 kg O_2$$

Consumo de oxígeno teniendo en cuenta ahorro por desnitrificación asociado al nitrógeno que se desnitrifica:

$$O_{2,desnitrificacion} = (4,6 - 2,86) \frac{kg O_2}{kg N - NO_{3,e}} \times r \times 2,6975 \frac{kg N - NO_{3,e}}{día} = 14,081 kg O_2$$

Donde:

- r es la relación de recirculación de la corriente que va del reactor/zona aerobia al reactor/zona anóxica de valor 3, y que tiene la concentración de nitratos igual a la de nitrógeno de entrada ($N-NO_{3,e}$),

Consumo total de oxígeno:

$$O_{total} = O_{2,síntesis} + O_{2,endogenesis} + O_{2,nitrificación} + O_{2,desnitrificación} = 111,118 kg O_2$$

A continuación, se calcula el volumen del aire necesario consume sabiendo:

- Fracción de O_2 en el aire ($F_{Oxígeno}$) 21% en volumen
- Temperatura de trabajo: 20°C
- Presión atmosférica: 1 atm
- Masa molecular de O_2 : 32 g/mol

Para calcular el volumen de O_2 necesario, se utiliza la ecuación de los gases ideales:

$$PV = nRT$$

Donde R es la constante de los gases ideales, 0,0821 L·atm/(mol·K)

Despejando la ecuación de los gases ideales y sustituyendo los valores de la condición de trabajo, el volumen de 1 mol de O_2 a 20°C y 1 atm es aproximadamente 24,06 litros.

$$V_{Oxígeno} = \left(\frac{1.000}{32}\right) \frac{mol}{kg} \times 111,118 kg \times \frac{24,06 L}{mol} \times \frac{1 m^3}{1000 L} = 83,547 m^3/día$$

Al construir el sistema de aireación en una planta de tratamiento de aguas residuales que utiliza la tecnología MBR, es necesario calcular adicionalmente el factor alfa (α). Su valor está influenciado por varios parámetros de diseño, incluidos el tipo de equipo de aireación, la profundidad de inmersión del equipo en el tanque, la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de sólidos en el lodo. Al calcular la cantidad de aire que se debe suministrar diariamente, es fundamental incorporar este factor para asegurar la eficiencia del sistema.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

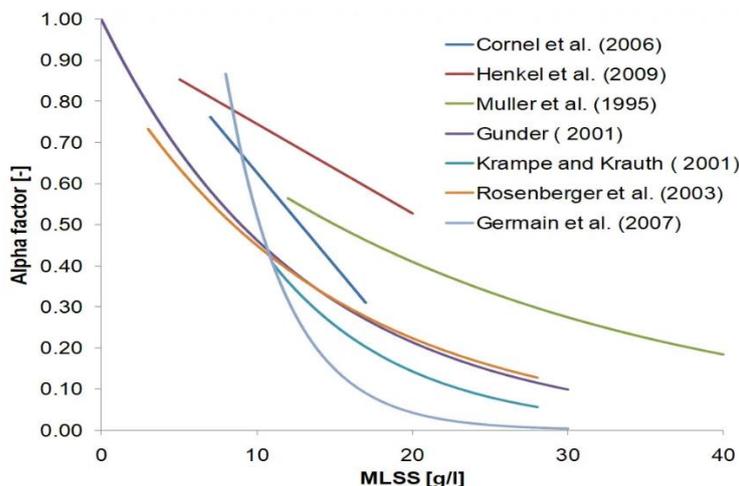


Figura 20. α -factor vs. MLSS, según varios autores

(Fuente: The MBR Site. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de thembrsite.com)

La Figura 20 muestra el rango de variación del factor α en diferentes estudios. Cuando el valor de MLSS es igual a 8 g/L, el factor α se sitúa entre 0,5 y 0,8. Tomando el valor promedio de estos, el factor α se calcula en aproximadamente 0,65.

Para calcular la cantidad de aire necesario en un sistema de tratamiento de aguas residuales, es crucial conocer el SOTE (Eficiencia Estándar de Transferencia de Oxígeno) del difusor de aire. El SOTE indica la eficiencia con la que el difusor transfiere oxígeno del aire al agua. Un mayor SOTE significa una mejor eficiencia de transferencia de oxígeno, lo que permite determinar con mayor precisión la cantidad de aire requerida para satisfacer las necesidades de oxigenación del sistema.

En este caso, se utiliza el difusor de aire DISCO-325 de la empresa BLOWTAC, su curva de SOTE es:

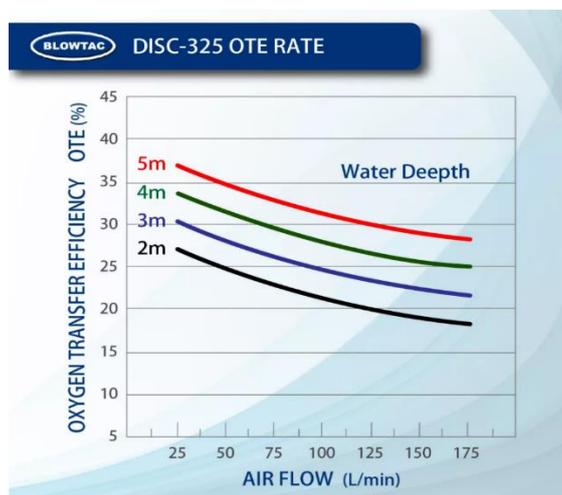


Figura 21. SOTE del difusor de aire DISCO-325

(Fuente: BLOWTAC. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de blowtac.com.tw)

Los difusores de aire se instalan a la profundidad de 3 metros, el valor intermedio del flujo de aire (seleccionado de la Figura 21) es 87,5 L/min, y el valor correspondiente de SOTE es 25%.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

$$V_{aire} = \frac{V_{Oxigeno}}{SOTE \times F_{Oxigeno} \times \alpha} = \frac{83,547 m^3/día}{0,25 \times 0,21 \times 0,65} = 2.448,26 m^3/día$$

Se supone que el difusor de aire trabaja en 87,5 L/(min·difusor) (126 m³/(día·difusor)), por tanto, el número de difusores necesarios será:

$$\text{Número de difusores} = \frac{2.448,26 \frac{m^3}{día}}{126 \frac{m^3}{día \cdot difusor}} = 19,43 \approx 20 \text{ unidad}$$

Es necesario instalar un mínimo de 20 difusores en la zona aeróbica del biorreactor.

9.3.5. La membrana seleccionada

La membrana seleccionada para el MBR es de la empresa Alfa Laval, modelo MFM 200. Se trata de un módulo de membranas planas (Figura 22)

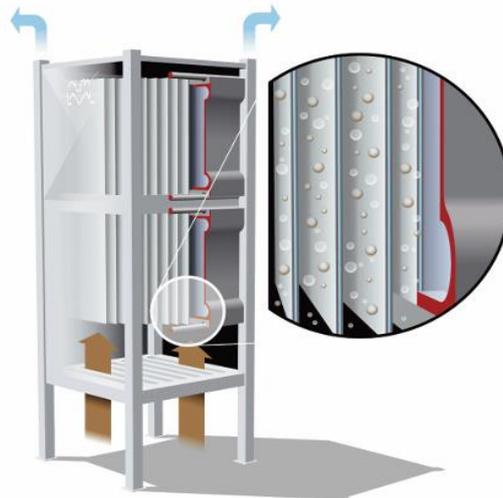


Figura 22. Módulo de filtración por membrana de Alfa Laval con las membranas planas visibles

(Fuente: Alfa Laval. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de controlvi.com)

Tabla 9. Características de la membrana MFM 200

(Fuente: Alfa Laval. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de controlvi.com)

Área de la membrana (m ²)	308
Anchura (mm)	1.122
Profundidad (mm)	1.062
Altura (mm)	2.878
Necesidades de aire de limpieza (NI/m ² /min)	5 - 6
Tamaño de poro de la membrana (µm)	0,20

Tabla 10. Datos de funcionamiento

(Fuente: Alfa Laval. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de controlvi.com)

PTM típica en funcionamiento (bar)	0,01 - 0,04
Intervalo típico de flujo neto (LMH)	10 - 30
Temperatura máxima (°C)	50
Intervalo de pH	1 - 11

Se necesita 3 módulo de membrana:

$$3 \times 308 \text{ m}^2 \times \frac{\text{LMH}}{1000} \times 24 \text{ H} = 500 \text{ m}^3$$

$$\text{LMH} = 22,55 \text{ LMH}$$

La membrana trabaja en 22,55 LMH, dentro del intervalo de densidad de flujo de permeado recomendado.

La membrana del reactor en la zona aeróbica también requiere difusores de aire, pero con un propósito diferente. Mientras que los difusores en la zona aeróbica están diseñados para suministrar oxígeno al proceso biológico, los difusores destinados a la membrana están orientados principalmente a su limpieza. Por esta razón, los difusores para la membrana necesitan un caudal de aire mayor que los utilizados para la aireación.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Según las características de la membrana MFM 200, requiere de aire 5-6 NL/m²/min. Para el diseño, se toma el valor intermedio 5,5 NL/m²/min.

$$Flujo_{aire} = 5,5 \frac{L}{m^2 \cdot min} \times 308 m^2 \times \frac{60 min}{h} = 101,64 m^3/h$$

Por esta razón, se ha cambiado a un difusor con una capacidad de flujo de aire más elevada para asegurar una limpieza efectiva de la membrana: DAGYEE MODEL φ63*500 (Figura 23).

DAGYEE



Figura 23. Difusores para la limpieza de membranas

(Fuente: Wastewater Machinery. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de wastewatermachinery.com)

El rango de flujo de aire de difusor DAGYEE MODEL φ63*500 está entre 2-14 m³/h, se toma el valor intermedio 8 m³/h

$$difusores = \frac{101,64 m^3/h}{8 m^3/h} = 12,7 \approx 13 \text{ unidad}$$

Es necesario instalar un mínimo de 13 difusores debajo de cada módulo de membrana. Para mantener la simetría, se instalarán 14 difusores por cada módulo. Como hay 3 módulos, se necesitan 42 difusores en total.

9.3.6. Selección de los equipos en el sistema

Bomba de alimentación

La Bomba de alimentación se encarga de transportar las aguas residuales del alcantarillado hacia el reactor a través de una red de tuberías. Durante este proceso, el agua debe pasar por rejillas y tamices que sirven para eliminar sólidos gruesos y finos, asegurando así que el agua llegue al reactor con menos impurezas.

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Datos:

- Tubería DN 100
- Longitud de la tubería: 30 m
- f Coeficiente de fricción: 0,05
- La profundidad del alcantarillado: 2 mca
- Perdida de carga en la rejilla: 1 mca
- Perdida en el tamiz: 4 mca
- Q_e : 500 m³ /día

Perdida por la fricción:

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- $Q_f = \frac{500}{24 \times 3.600} = 0,00579 \text{ m}^3/s$
- $v = \frac{0,00579}{\frac{\pi \times 0,1^2}{4}} = 0,738 \text{ m/s}$
- $g : 9,81 \text{ m/s}^2$

Sustituyendo por los valores numéricos:

$$H_f = 0,05 \times \frac{30}{0,1} \times \frac{0,738^2}{2 \times 9,81} = 0,415 \text{ m}$$

$$H_{total} = H_{rejilla} + H_{tamiz} + Profundidad + H_{reactor} + H_f = 10,615 \text{ m}$$

Potencia de la bomba:

$$P = \frac{\rho \times Q \times g \times H}{\eta}$$

Donde:

- ρ es la densidad del agua residual: 1.000 kg/m³
- η es el rendimiento de la bomba: 0,75

Sustituyendo por los valores numéricos:

$$P = \frac{1.000 \times 0,00579 \times 9,81 \times 10,615}{0,75} = 803,91 \text{ W} = 0,804 \text{ kw}$$



Figura 24. Bomba KSB Etabloc con sistema PumpDrive

(Fuente: KSB. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de [ksb.com](https://www.ksb.com))

La Bomba KSB Etabloc con sistema PumpDrive (Figura 24) se destaca por su alta eficiencia y capacidad para manejar el flujo y la presión necesarios para el transporte de aguas residuales hacia un reactor. Gracias a su sistema de control de velocidad variable esta bomba puede ajustar automáticamente su potencia para adaptarse a las condiciones operativas, optimizando así el consumo energético. Según los cálculos realizados, el modelo **Etabloc PumpDrive 100-080-250/3004 GB** cumple con los requisitos de diseño establecidos para esta aplicación.

Bomba de recirculación

La bomba de recirculación tiene como función principal transportar las aguas residuales desde la zona aeróbica hasta la zona anóxica. Esta bomba opera con una relación de recirculación de 3:1, lo que significa que el volumen de agua recirculada es tres veces el volumen del agua tratada en cada ciclo.

Datos:

- Tubería DN 150
- Longitud de la tubería: 8 m
- Q_r : 1500 m³/día
- La altura de elevación: 1 mca

Perdida por la fricción:

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- $Q_e = \frac{1.500}{24 \times 3.600} = 0,01736 \text{ m}^3/\text{s}$
- $v = \frac{0,00579}{\frac{\pi \times 0,15^2}{4}} = 0,983 \text{ m/s}$

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Sustituyendo por los valores numéricos:

$$H_f = 0,05 \times \frac{8}{0,15} \times \frac{0,983^2}{2 \times 9,81} = 0,131 \text{ m}$$

$$H_{total} = H_f + H_{elevacion} = 0,131 + 1 = 1,131 \text{ m}$$

Potencia de la bomba:

$$P = \frac{1.000 \times 0,01736 \times 9,81 \times 1,131}{0,75} = 256,81 \text{ W} = 0,257 \text{ kW}$$

La bomba seleccionada para la recirculación cumple la misma función que la bomba de alimentación, es decir, el transporte del agua. Por lo tanto, la bomba utilizada para la recirculación también será la Bomba KSB Etabloc con sistema PumpDrive (Figura 24). Según los cálculos realizados, el modelo **Etabloc PumpDrive 150-125-200/754 GB** cumple con los requisitos de diseño para la recirculación.

Bomba para membrana

La principal función de la bomba para membrana es generar la presión de succión necesaria para forzar el paso del agua a través de las membranas semipermeables, separando el permeado de los sólidos y contaminantes retenidos. Este proceso asegura un flujo constante y eficiente del permeado, optimizando la operación del sistema de filtración.

La potencia de esta bomba es ajustable debido a la variabilidad en la eficiencia de las membranas. Para mantener un flujo de permeado constante de 166,67 m³/día (ya que hay tres módulos de membrana), la potencia de la bomba debe variar en respuesta a la eficiencia cambiante de las membranas, que a su vez requiere un aumento de la presión. Sin embargo, la presión no debe superar los -0,5 bar (presión de vacío) para evitar dañar las membranas. Cuando la eficiencia de las membranas disminuye y no se puede restaurar mediante limpieza, es necesario hacer limpieza química o reemplazarlas por nuevas, en caso de no poder recuperarlas.

Datos:

- P1 = 3 mca (punto más bajo de la membrana sumergida en el agua a una profundidad de 3 metros)
- P2 = 0,122 mca (punto más alto de la membrana sumergida en el agua a una profundidad de 0,122 metros)
- P3 = -0,5 bar

$$PTM = \frac{P1 + P2}{2} - P3$$

Sustituyendo por los valores numéricos, la PTM máxima sería:

$$PTM = \left(\frac{3 + 0,122}{2} \right) \times 0,098 \frac{\text{bar}}{\text{metro de columna de agua}} + 0,5 = 0,653 \text{ bar}$$

$$Q_{permeado} = \frac{166,67}{24 \times 3.600} = 0,00193 \text{ m}^3/\text{s}$$

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Potencia:

$$P = \frac{Q \times PTM}{\eta} = \frac{0,00193 \times 65.300Pa}{0,75} = 168,04 W = 0,168 kW$$

Como hay 3 módulos, por tanto, se necesita 3 bombas de 168,04 W para obtener 500 m³/día de permeado.



Figura 25. Bomba KSB instalada en seco EtaLine Pro

(Fuente: KSB. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de [ksb.com](https://www.ksb.com))

La serie de la bomba KSB EtaLine Pro (Figura 25) destaca por su capacidad para manejar óptimamente el flujo y la presión en procesos de filtración, asegurando un rendimiento continuo y estable. Según los cálculos realizados, el modelo **EtaLine Pro 032-032-070** cumple con los requisitos de diseño para nuestras necesidades de filtración de aguas residuales.

Bomba de limpieza

La bomba de limpieza se utiliza en sistemas de membrana plana para la introducción y circulación de agentes de limpieza a través de las membranas. Este proceso es esencial para mantener la eficiencia de filtración y prolongar la vida útil de las membranas. El reactivo de limpieza generalmente se coloca en un nivel más alto, utilizando la diferencia de altura para facilitar su entrada en las membranas. Luego, se deja que el agente químico actúe durante un periodo de tiempo antes de ser evacuado del sistema.

Para asegurar una operación efectiva y continua, se recomienda la instalación de una bomba auxiliar que, aunque de baja potencia, garantiza un flujo constante del agente de limpieza a través de las membranas. La potencia adecuada para esta bomba auxiliar, basada en la práctica común y las especificaciones de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con MBR, es generalmente baja, típicamente alrededor de **0,1 kW**. Esta potencia es suficiente para manejar las necesidades del proceso de limpieza sin incurrir en altos costes de energía.



Figura 26. BOMBA GRUNDFOS ALPHA2 25-60

(Fuente: Grundfos. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de [grundfos.com](https://www.grundfos.com))

La **Bomba Grundfos ALPHA2 25-60 180** (Figura 26) es adecuada para asistir en la limpieza de las membranas de filtración MBR, cumpliendo con las demandas de flujo y presión necesarias según los requisitos establecidos: caudal bajo y altura baja.

El agitador

La función principal del agitador en la zona anóxica es mantener en suspensión los sólidos y garantizar una mezcla homogénea de los contenidos del tanque. Esto es vital para mejorar la eficiencia de los procesos biológicos, como la desnitrificación, facilitando la conversión de nitratos en nitrógeno gaseoso.

El volumen de la zona anóxica es 91,6 m³, y se ha determinado que la potencia adecuada para el agitador, basada en un criterio de diseño de 1 W/m³ (Metcalf & Eddy, 2014), es de aproximadamente **0,1 kW**. Esta potencia asegura una mezcla eficiente y constante.

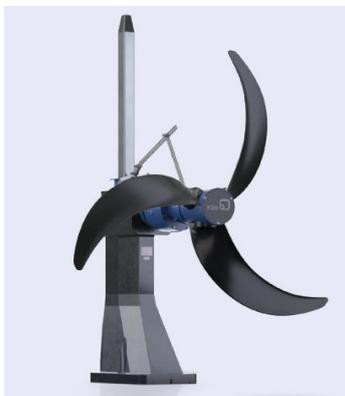


Figura 27. Agitador KSB AmaProp

(Fuente: KSB. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de [ksb.com](https://www.ksb.com))

La Figura 27 muestra el agitador de la empresa KSB, perteneciente a la serie AmaProp, diseñado específicamente para operaciones bajo el agua. Este modelo es adecuado para la agitación en la zona anóxica del reactor biológico. En particular, el modelo **AmaProp-A11B V 027-2603/014** cumple con los requisitos de diseño establecidos, asegurando una mezcla eficiente en condiciones anóxicas

Turbocompresor para suministro de O₂

El turbo compresor de aire (o soplante) tiene como función principal suministrar aire a través de los difusores, incrementando la cantidad de oxígeno disuelto en la zona aeróbica del reactor. Este proceso es esencial para mantener el contenido de oxígeno en niveles óptimos, lo que favorece la proliferación de microorganismos necesarios para la degradación biológica de los contaminantes presentes en el agua, también la nitrificación y desnitrificación. Según los cálculos anteriores, se necesita un flujo de aire de 1.591,372 m³/día, y los difusores están ubicados a 3 metros de profundidad bajo el agua.

La potencia del turbo compresor:

$$P = \frac{Q_{aire} \times p_{hidrostática}}{\eta}$$
$$Q_{aire} = \frac{1.591,372}{24 \times 3.600} = 0,0184 \text{ m}^3/s$$

ρ es la densidad del agua residual en la zona aeróbica, que es igual a la densidad del agua más SSLM. Por lo tanto, se puede expresar como $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 + 8 \text{ kg/m}^3 = 1008 \text{ kg/m}^3$

η del compresor del aire: 0,75

$$p_{hidrostática} = 3 \times g \times \rho = 3 \times 9,81 \times 1.008 = 29.665 \text{ Pa}$$

Sustituyendo por los valores numéricos:

$$P = \frac{0,0184 \times 29.665}{0,75} = 727,78 \text{ W} = 0,728 \text{ kW}$$



Figura 28. Compresor pequeño KAESER modelo AIRCENTER

(Fuente: Kaeser. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de [kaeser.com](https://www.kaeser.com))

La Figura 28 muestra el compresor pequeño de la empresa KAESER, modelo **AIRCENTER 13 SFC**, que opera a una presión inferior a 7,5 bar y con un caudal de aire entre 0,39 y 1,4 m³/min, cumpliendo con los requisitos de nuestro diseño.

El turbocompresor del aire para aireación y limpieza de las membranas

El turbo compresor de aire para la limpieza de membranas en sistemas MBR tiene como función generar un flujo de aire turbulento a través de los difusores, lo que ayuda a limpiar las membranas sumergidas en la zona aeróbica. Este proceso mantiene la permeabilidad de las membranas y previene la acumulación de sólidos y biopelículas, asegurando un rendimiento eficiente del sistema de tratamiento de aguas. Sabiendo que cada módulo de la membrana necesita $101,61 \text{ m}^3/\text{h}$ caudal de aire, y se instala 3 módulos de membrana en la zona aeróbica.

Q_{aire} :

$$Q_{\text{aire}} = 101,64 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 3 = 304,92 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0847 \text{ m}^3/\text{s}$$

La presión hidrostática es la misma que la presión anterior del compresor del aire de O_2 : 30.927 Pa .

La potencia del compresor del aire para la limpieza:

$$P = \frac{0,0847 \times 30.927}{0,75} = 3.492,69 \text{ W} = 3,493 \text{ kW}$$



Figura 29. Compresor mediano KAESER modelo BSD

(Fuente: Kaeser. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de [kaeser.com](https://www.kaeser.com))

La Figura 29 muestra el compresor mediano KAESER modelo BSD, el cual ha sido seleccionado debido a la necesidad de un mayor caudal de aire para la aireación y limpieza de las membranas. Por ello, se optó por un compresor de tamaño mediano. El modelo **Kaeser BSD 75 SFC** cumple con los requisitos de diseño, operando en un rango de presión de hasta $7,5 \text{ bar}$ y proporcionando un caudal de aire entre $1,54$ y $7,44 \text{ m}^3/\text{min}$.

La desinfección UV

La desinfección UV es un proceso que utiliza luz ultravioleta para eliminar microorganismos patógenos presentes en el agua tratada, asegurando que cumpla con los estándares de calidad para su reutilización. En este caso, se utiliza un sistema de desinfección UV de tipo tubular, donde las lámparas UV están instaladas dentro de un conducto de acero inoxidable. El agua residual, después de pasar por

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

la filtración de membranas, fluye a través de este conducto antes de ingresar al depósito, asegurando que toda el agua depurada sea debidamente desinfectada por la luz ultravioleta antes de su almacenamiento.



Figura 30. El Sistema de desinfección Hidro-óptica Atlantium

(Fuente: Atlantium. Fecha de acceso: 20 de julio de 2024. Recuperado de atlantium.com.mx)

La Figura 30 muestra el sistema de desinfección Hidro-óptica de la empresa Atlantium. El modelo **RZ 104-11** cumple con los requisitos de diseño, siendo capaz de tratar un caudal máximo de 38 m³/h y operando con una potencia de 1 kW.

Autómata

El sistema de biorreactor de membrana (MBR) se controla mediante un sistema de automatización centralizado, comúnmente conocido como un sistema de control automático o autómata. Este sistema es esencial para gestionar todas las operaciones del MBR, supervisando y ajustando en tiempo real la potencia de las bombas, el caudal y los procesos de limpieza para asegurar un rendimiento óptimo. Además, gestiona las señales de los sensores de nivel superior e inferior tanto en el reactor biológico como en el tanque de almacenamiento, previniendo desbordamientos y asegurando niveles adecuados de agua. La potencia requerida para el funcionamiento de este sistema se estima en aproximadamente **1kW**, ya que se trata de una planta pequeña.

10. Estudio económico

En esta sección, se procederá a calcular los OPEX (Operational Expenditures), que representan los gastos operativos necesarios para el funcionamiento diario del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante biorreactores de membrana (MBR). Los OPEX incluyen costes tales como energía eléctrica, productos químicos, mantenimiento, mano de obra y otros gastos recurrentes que aseguran el funcionamiento eficiente y continuo del sistema. Este análisis es crucial para evaluar la viabilidad económica y la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Energía:

Tabla 11. Coste mensual en energía

Equipo	Cantidad	Consumo (kW)	Precio (€/kWh)	Coste (€/h)	Hora de trabajo (h)	Coste mensual (€)
Bomba de alimentación	1	0,804	0,154	0,123816	720	89,15
Bomba de recirculación	1	0,257	0,154	0,039578	720	28,50
Bomba para la membrana	3	0,168	0,154	0,077616	720	55,88
Bomba de limpieza	3	0,1	0,154	0,0462	1	0,0462
Bomba de fango	1	0,1	0,154	0,0154	720	11,09
Turbo compresor de O ₂	1	0,728	0,154	0,11211	720	80,72
Turbo compresor de aireación de las membranas	1	3,493	0,154	0,537922	720	387,30
Agitador	1	0,1	0,154	0,0154	720	11,09
autómata	1	1	0,154	0,154	720	110,88
Lámparas de radiación UV	1	1	0,154	0,154	720	110,88
					Total	885,53

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Potencia contratada:

Potencia consumida: 20 KW

Precio de la potencia contratada: 0,0643€/kW día

$$\text{Coste mensual} = 20 \times 0,0643 \times 30 = 38,58 \text{ €/mes}$$

Personal:

Tabla 12. Coste mensual en personal

Persona contratada	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/hora)	Coste mensual (€)
Operario	hora	80	12,34	987,20
Ingeniero	hora	12	23,50	282,00
			Total	1.269,20

Material:

Tabla 13. Coste mensual en material requerido

Material	Consumo mensual (litros)	Precio unitario (€/litro)	Coste mensual (€)
Hipoclorito sódico	100	1,26	126

Material	Unidad	Precio unitario (€)	Frecuencia	Coste anual (€)	Amortización mensual (€)
Módulo de membrana	3	3.000	1 vez/5 año	1.800	150
Tubo de luz ultravioleta	1	750	1 vez/año	750	60
				Total	210

Diseño de un biorreactor de membranas para el tratamiento del agua residual del campus de Vera de la Universitat Politècnica de València

Mantenimiento:

El coste de mantenimiento en las plantas de tratamiento de aguas residuales suele representar aproximadamente el 15% de los costes operativos totales (la suma de los costes de potencia, personal y material).

$$Coste_{mantenimiento} = 0,15 \times (885,53 + 38,58 + 1.269,20 + 126 + 210) = 379,40 \text{ €}$$

Coste total mensual:

$$Coste_{mensual} = 885,53 + 38,58 + 1.269,20 + 126 + 210 + 379,40 = 2.908,71 \text{ €}$$

Precio del agua depurada para reutilizar:

$$Precio_{agua\ depurada} = \frac{2.908,71\text{€/mes}}{500\text{ m}^3/d \times 30d/mes} = 0,194 \text{ €/m}^3$$

Se ha determinado que el coste total mensual de esta planta depuradora es de 2.908,71 €/mes. Con un volumen diario de tratamiento de aguas residuales de 500 m³, tomando en cuenta un mes de 30 días, se obtiene un coste de 0,194 € por metro cúbico de agua tratada. Es importante destacar que este es un cálculo teórico, y en la práctica, el coste mensual en energía podría variar dependiendo de las condiciones reales de operación de cada máquina.

11. Conclusiones

Este estudio ha logrado diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales específicamente adaptada a las necesidades del campus de Vera de la UPV. A través de cálculos precisos y un análisis exhaustivo, se ha estimado que el volumen diario de aguas residuales a tratar es de aproximadamente 500 m³/día.

Para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares legales de reutilización, se revisaron las normativas vigentes y se seleccionó la combinación tecnológica más adecuada, optando por el uso de tecnologías MBR y UV. Una vez definida esta tecnología, se procedió a calcular los detalles específicos del sistema. El volumen del reactor biológico calculado para este proceso es de 183,19 m³, y también se determinó la potencia requerida para los equipos utilizados, tales como bombas para el transporte del agua residual, compresores para la aireación, agitadores y sistemas de desinfección UV.

Estos cálculos permitieron estimar el consumo energético de la planta y, consecuentemente, el coste total mensual de operación. El cálculo teórico determinó que el coste de tratamiento por metro cúbico de agua es de 0,194 €/m³. Este valor, considerado razonable, confirma la viabilidad económica de la construcción y operación de esta planta en el campus de Vera.

En conclusión, la implementación de esta planta no solo es técnicamente viable, sino también económicamente sostenible, contribuyendo de manera significativa a la sostenibilidad ambiental del campus y asegurando una gestión eficiente y responsable de las aguas residuales.

Bibliografía

- Bertanza, G., Canato, M., Laera, G. et al. (2017). A comparison between two full-scale MBR and CAS municipal wastewater treatment plants: techno-economic-environmental assessment. *Environ Sci Pollut Res* 24, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9409-3>.
- Dome Adoonsook, Chang Chia-Yuan, Aunnop Wongrueng , Chayakorn Pumas. (2019). A simple way to improve a conventional A/O-MBR for high simultaneous carbon and nutrient removal from synthetic municipal wastewater. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214976>.
- Guanghao Chen; Mark C.M. van Loosdrecht; George A. Ekama; Damir Brdjanovic. (2023). *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- Pretel, I. R., Robles, A., Ruano, M. V., Seco, A., & Ferrer, J. (2016). Economic and environmental sustainability of submerged anaerobic MBR-based (AnMBR-based) technology as compared to aerobic-based technologies for moderate-/high-loaded urban wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 166, 45-52., <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.004>.
- Qian Ma, Fengze Han, Feng Lyu and Xiaojun Yang. (2023). Municipal Sewage Treatment Technology: A2/O-VMBR Integrated Technology for Municipal Treatment and Improved Pollutant Removal. <https://doi.org/10.3390/w15081574>.
- SCHARZ, A.O., RITTMANN, B.E., CRAWFORD, G.V., KLEIN, A.M., DAIGGER, G.T. (2006). Critical review on the effects of mixed liquor suspended solids on membrane reactor operation. *Separation Science and Technology*, v. 41, p. 1489-1511.
- Sean A. MacIsaac, Kyle D. Rauch, Taylor Prest, Richard M. Simons, Graham A. Gagnon & Amina K. Stoddart. (2023). Improved disinfection performance for 280 nm LEDs over 254 nm low-pressure UV lamps in community wastewater. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-34633-7>.
- Sornsiri Sriboonnak, Aegkapan Yanun, Phacharapol Induvesa , Chayakorn Pumas, Kritsana Duangjan , Pharkphum Rakruam, Saoharit Nitayavardhana, Prattakorn Sittisom and Aunnop Wongrueng. (2022). Efficiencies of O-MBR and A/O-MBR for Organic Matter Removal from and Trihalomethane Formation Potential Reduction in Domestic Wastewater. <https://doi.org/10.3390/membranes12080761>.
- Teresa Nogueira, José Magano, Eunice Fontão, Marina Sousa and Ângela Leite. (2021). Engineering Students' Industrial Internship Experience Perception and Satisfaction: Work Experience Scale Validation. <https://doi.org/10.3390/educsci11110671>.
- Wang, L.K., Wu, Z., Shammas, N.K. (2009). Activated Sludge Processes. https://doi.org/10.1007/978-1-60327-156-1_6.

DOCUMENTO 2.

PRESUPUESTO

Documento 2. Presupuesto

Índice de presupuesto

1. Costes obra civil.....	1
2. Mano de obra	2
3. Costes equipos instalados	3
4. Presupuesto ejecución material.....	6
5. Presupuesto base de licitación.....	6

Índice de Tablas

Tabla 1. Unidad de obra 1	1
Tabla 2: Unidad de obra 2	1
Tabla 3: Unidad de obra 3	2
Tabla 4: Equipos auxiliares	3
Tabla 5. Reactor y depósito	4
Tabla 6. Equipos principales	5
Tabla 7. Presupuesto ejecución material	6
Tabla 8. Presupuesto base de licitación	6

1. Costes obra civil:

Preparación del terreno a utilizar U1

Tabla 1. Unidad de obra 1

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
U1.1	372,064	m ²	Despeje, desbroce de terreno.	0,56	208,36
U1.2	372,064	m ²	Limpieza de basuras	0,29	107,90
Total					316,26
U1.3	3	%	Costes Directos Complementarios		9,49
Total Unidad					325,75

Hormigonado U2

Tabla 2: Unidad de obra 2

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
U2.1	372,064	m ²	Superficie de la planta	57	21.207,65
U2.2	3	%	Costes Directos Complementarios		636,23
Total Unidad					21.843,88

$$\text{Costes de obra civil} = 325,75 + 21.843,88 = 22.169,63 \text{ €}$$

2. Mano de obra:

Mano de obra U3

Tabla 3: Unidad de obra 3

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
U3.1	500	h	Peón ordinario	10,55	5.275,00
U3.2	500	h	Peón especializado	10,63	5.315,00
U3.3	400	h	Oficial primera	11,03	4.412,00
U3.4	300	h	Ingeniero industrial	20,60	6.180,00
Total Unidad					21.182,00

3. Costes equipos instalados:

Equipos instalados U4

Tabla 4. Equipos auxiliares

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
U4.1	6	Ud.	Caudalímetro	259,66	1.557,96
U4.2	6	Ud.	Sensor de nivel	99,03	594,18
U4.3	9	Ud.	Válvula	130,89	1.178,01
U4.4	1	Ud.	Oxímetro	142,57	142,57
U4.5	1	Ud.	Sensor de temperatura	72,10	72,10
U4.6	20	Ud.	Difusor de O ₂	15,77	315,40
U4.7	42	Ud.	Difusor para membranas	27,82	1.168,44
U4.8	30	m	Tubería de alimentación DN 100	45,00	1.350,00
U4.9	8	m	Tubería de recirculación DN 150	75,00	600,00
U4.10	3	Ud.	Manómetro	334,75	1.004,25
Total					7.982,91
U4.11	3	%	Costes Directos Complementarios		239,49
Total equipos auxiliares					8.222,40

Tabla 5. Reactor y depósito

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
U4.12	220,69	m ³	Reactor biológico	750,00	165.517,50
U4.13	307,88	m ³	Depósito de almacenamiento	350,00	107.758,00
Total					273.275,50
U4.14	3	%	Costes Directos Complementarios		8.198,27
Total reactor y depósito					281.473,77

Tabla 6. Equipos principales

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario (€)	Importe (€)
U4.15	1	Ud.	Tamiz con rejillas y tamiz	5.500	5.500
U4.16	3	Ud.	Módulo de membranas de Alfa Laval MFM 200	3.000	9.000
U4.17	1	Ud.	Tubo UV 1 KW, Atlantium RZ 104-11	1.500,00	1.500,00
U4.18	1	Ud.	Bomba de alimentación 0,804 KW, KSB Etabloc PumpDrive 100-080-250/3004 GB	6.285,39	6.285,39
U4.19	1	Ud.	Bomba de recirculación 0,275KW, KSB Etabloc PumpDrive 150-125-200/754 GB	17.755,76	17.755,76
U4.20	3	Ud.	Bomba para filtración de membrana 0,168 KW, KSB EtaLine Pro 032-032-070	2.460,28	7.380,84
U4.21	3	Ud.	Bomba para limpieza de membranas 0,1 KW, Bomba Grundfos ALPHA2 25-60 180	840,00	2.520,00
U4.22	1	Ud.	Agitador 0,1KW, KSB AmaProp-A11B V 027-2603/014	15.000,00	15.000,00
U4.23	1	Ud.	Compresor para suministro de O ₂ 0,728 KW, KAESER AIRCENTER 13 SFC	18.750,00	18.750,00
U4.24	1	Ud.	Compresor para las membranas 3,493 KW, KAESER BSD 75 SFC	25.609,00	25.609,00
Total					109.301,00
U4.25	3	%	Costes Directos Complementarios		3.279,03
Total equipos principales					112.580,03

4. Presupuesto ejecución material:

Tabla 7. Presupuesto ejecución material

Obra civil	22.169,63 €
Mano de obra	21.182,00 €
Equipos auxiliares	8.222,40 €
Reactor y depósito	281.473,77 €
Equipos principales	112.580,03 €
presupuesto ejecución material	445.627,83 €

5. Presupuesto base de licitación:

Tabla 8. Presupuesto base de licitación

Presupuesto ejecución material	444.825,50 €
Gastos Generales (13%)	57.931,62 €
Beneficio industrial (6%)	26.737,67 €
Presupuesto de ejecución por contrata	530.297,11€
IVA (21%)	111.362,40 €
Presupuesto base de licitación	641.659,51 €

El presupuesto por base de licitación asciende a **SEISCIENTOS CUARENTA Y UN MIL SEISCIENTOS CINCUENTA Y NUEVE EUROS CON CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS.**

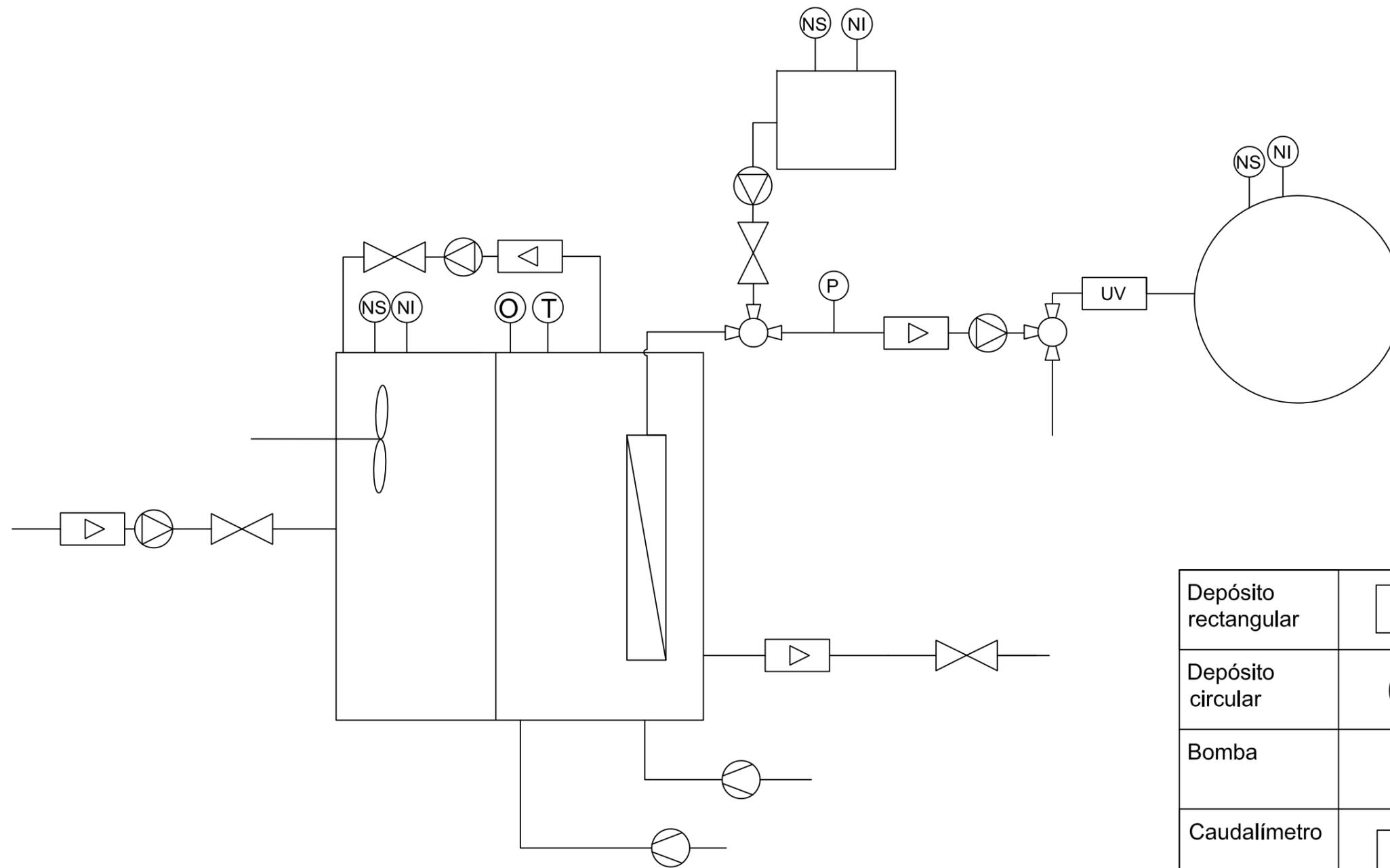
DOCUMENTO 3.

PLANOS

Documento 3. Planos

Índice de planos

Diagrama de flujo	1
Plano de la planta MBR	2



Depósito rectangular		Módulo de membrana	
Depósito circular		Agitador	
Bomba		Manómetro	
Caudalímetro		Oxímetro	
Válvula de paso		Indicadores de nivel	
Válvula de tres vías		Termómetro	
Compresor de aire		Tubo UV	

