



UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y NUCLEAR
MASTER EN SEGURIDAD INDUSTRIAL Y MEDIO AMBIENTE

**TRATAMIENTO TERCIARIO MEDIANTE UF+OI DE AGUAS
DEPURADAS DE UNA PTAR EN EL PROCESO INDUSTRIAL DE
FABRICACION DE CONCRETO PARA SU REUTILIZACION.**

TESIS FINAL DE MASTER

AUTORA:

Shirley Margaret Jiménez Feliz

DIRECTORES:

Jaime Lora García

M. Fernanda López Pérez

Valencia, septiembre de 2017

DEDICATORIA

A mi Padre Celestial,

Porque por mi fe y perseverancia en Él sé que los sueños se pueden hacer realidad, porque nunca me deja rendirme cuando pienso que no puedo más.

A mi familia,

Por haberme brindado su apoyo para cumplir y alcanzar esta meta. Por haber confiado a ciegas en mí una vez más ante los tantos retos que me les he puesto a la vida y saber que al final es satisfactoria la recompensa.

Al Mescyt,

Por confiar en mí y darme la oportunidad de venir a esta universidad a formar parte de mi desarrollo intelectual y profesional, para dar lo mejor de mí a nuestra sociedad, para ser más competitiva y aportar al desarrollo de nuestra nación.

A mi asesor Jaime Lora García,

Por dedicar total entrega, incondicional y siempre dispuesto a dar de su tiempo y apoyo para plasmar esto que al principio solo eran ideas, pero al final ha sido muy gratificante poder ver los resultados.

A mis compañeros,

Que más que amigos ya son parte de esa familia que necesité durante este tiempo, porque siempre me han ayudado y hacerme entender, que hay ocasiones en la vida en las que precisa correr antes de andar. Porque no todo es tan fácil como pueda parecer, porque tenemos gigantes que vencer y con nuestro sacrificio los podemos lograr.

A mis profesores,

Por haber brindado su apoyo, conocimiento y total entrega en temas que al principio desconocía totalmente y era uno de esos gigantes que tuve que vencer. Llegar al primer mundo, a conocer cosas nuevas, y que al final te das cuenta de que es con lo que has vivido día a día pero que simplemente ignorabas y ahora lo comprendes todo gracias a ellos, escatimar es imposible.

RESUMEN

La realización de este proyecto se fundamenta en la necesidad constante de emplear un uso adecuado y reutilización de las aguas a nivel industrial, mediante metodologías sencillas y a un costo no muy elevado, o que al menos sea recuperable en el tiempo y colaborador en el entorno.

Se empleará un tratamiento terciario para las aguas residuales de una PTAR de una planta de producción de concretos para la construcción, donde su política de sostenibilidad se compromete en cumplir con el objetivo principal de la industria, de hacer una reutilización al 100% de las aguas residuales generadas durante su operación de fabricación, lavado y mantenimiento de equipos. No obstante, la planta está ubicada en una zona cerca de huertos donde se cultivan alimentos y que, en proyección a futuro, puede suministrarse de una manera adecuada esta agua de calidad para el regadío de los campos y cultivos de la zona.

Se aplicarán las técnicas de Filtración, Ultrafiltración y Osmosis Inversa, partiendo de un proceso previo de decantación ya existente en las instalaciones, facilitando este las posteriores etapas del proceso, para garantizar un agua de calidad, reutilizable en la operación en su totalidad y amigable con el medio ambiente.

ABSTRACT

The realization of this project is based on the constant need to use an adequate use and reuse of water at industrial level, using simple methodologies and at a not very high cost, or at least recoverable over time and collaborator in the environment.

Tertiary wastewater treatment of a WWTP of a concrete production plant for construction will be used, where its sustainability policy is committed to comply with the main objective of the industry, to reuse 100% of the water Waste generated during its manufacturing operation, washing and maintenance of equipment. Nevertheless, the plant is located in an area near orchards where food is grown and, in the future, this quality water can be adequately supplied for the irrigation of fields and crops in the area.

Filtration, Ultrafiltration and Reverse Osmosis techniques will be applied, starting from a previous process of decantation already existing in the facilities, facilitating this the subsequent stages of the process, to guarantee a quality water, reusable in the operation in its entirety and friendly with environment.

CONTENIDO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 3 |
| 3 | ANTECEDENTES..... | 4 |
| 3.1 | GENERALIDADES..... | 4 |
| 3.1.1 | Tratamiento y la reutilización de aguas residuales..... | 7 |
| 4 | TECNOLOGIAS DE MEMBRANAS..... | 12 |
| 4.1 | CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS..... | 13 |
| 4.2 | PRETRATAMIENTO..... | 14 |
| 4.3 | FILTRACIÓN..... | 15 |
| 4.3.1 | FILTROS DE ARENA..... | 17 |
| 4.3.1.1 | Tipos de filtros de arena..... | 17 |
| 4.3.1.2 | Filtros de cama de arena..... | 18 |
| 4.3.1.3 | Condiciones de operación de los filtros de arena..... | 19 |
| 4.3.1.4 | Características de filtros de arena rápido y lento..... | 19 |
| 4.3.2 | Filtración por cartucho (filtración de seguridad)..... | 20 |
| 4.3.3 | Floculación - Coagulación..... | 21 |
| 4.4 | ULTRAFILTRACIÓN (UF)..... | 22 |
| 4.4.1 | Eliminación de materia particulada mediante UF..... | 23 |
| 4.4.2 | Aplicaciones industriales de UF..... | 24 |
| 4.5 | OSMOSIS INVERSA (OI)..... | 24 |
| 4.5.1 | Aplicaciones industriales de OI..... | 25 |
| 4.5.2 | Concentrados de OI de plantas de tratamiento de aguas residuales..... | 26 |
| 4.6 | ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS..... | 27 |
| 4.6.1 | Tipos comunes de ensuciamiento..... | 28 |
| 4.6.2 | Limpieza de las membranas..... | 28 |
| 4.6.3 | Antiincrustantes..... | 29 |
| 5 | TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PTAR DE UNA PLANTA DE CONCRETOS.. | 31 |
| 5.1 | DESCRIPCIÓN GENERAL..... | 31 |
| 5.2 | CARACTERÍSTICAS ACTUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES..... | 32 |
| 5.3 | ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA..... | 34 |
| 5.4 | NIVEL DE DEMANDA DE AGUA A PRODUCIR..... | 35 |
| 5.4.1 | Diseño de planta..... | 35 |
| 5.4.2 | Diagrama de flujo del diseño de planta propuesto..... | 38 |

| | | |
|---------|---|----|
| 5.5 | UNIDAD DE FILTRACIÓN PARA EL PRETRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. | 39 |
| 5.6 | HERRAMIENTA EMPLEADA PARA LA SIMULACIÓN DE LA UNIDAD DE UF Y OI | 39 |
| 5.6.1 | Hydranautics Projections Software. HYDRAcap MAX web simulator | 40 |
| 5.6.2 | IMSDesign..... | 40 |
| 5.7 | UNIDAD DE UF PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 41 |
| 5.8 | DISEÑO DE LA UNIDAD DE ULTRAFILTRACIÓN UF | 42 |
| 5.8.1 | Membrana HYDRAcap MAX 40 – Especificaciones. | 42 |
| 5.8.2 | Condiciones de operación de la unidad de UF | 42 |
| 5.8.2.1 | Resultados del diseño..... | 43 |
| 5.8.3 | Elementos de bombeo y aireación del sistema de UF | 43 |
| 5.8.4 | Modelado del sistema de UF..... | 44 |
| 5.9 | UNIDAD DE LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS DE UF | 45 |
| 5.9.1 | Antiincrustantes | 45 |
| 5.10 | CONTROL DE PH | 46 |
| 5.11 | DISEÑO DE LA UNIDAD DE OSMOSIS INVERSA OI | 46 |
| 5.12 | MODELADO DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA..... | 49 |
| 5.13 | UNIDAD DE LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS DE OI | 50 |
| 6 | ESTUDIO ECONÓMICO | 51 |
| 6.1 | COSTES DE CONSTRUCCION | 51 |
| 6.1.1 | Costes unidad de UF..... | 51 |
| 6.1.2 | Calculo de la inversión unidad de OI..... | 52 |
| 6.1.3 | Costes totales para equipos de unidades UF y OI..... | 52 |
| 6.2 | AMORTIZACION DE LA INVERSION..... | 53 |
| 6.3 | VARIABLES ECONOMICAS..... | 53 |
| 6.4 | COSTES VARIABLES..... | 53 |
| 6.4.1 | Costes de energía | 54 |
| 6.4.2 | Reemplazo de membranas..... | 54 |
| 6.4.3 | Productos químicos..... | 55 |
| 6.5 | COSTES FIJOS..... | 55 |
| 6.6 | COSTES DE CAPITAL..... | 56 |
| 6.6.1 | Costes de capital directo | 56 |
| 6.6.2 | Costes de capital indirectos..... | 56 |
| 7 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 58 |
| 8 | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |
| | ANEXOS | 61 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 4-1 Tipos de membranas según tamaño de partícula..... | 12 |
| Figura 4-2 Proceso de Ultrafiltración..... | 22 |
| Figura 5-1. Localización geográfica de la planta. Fuente: Google Maps..... | 31 |
| Figura 5-2 Plano general de la planta Fuente: Google Maps..... | 31 |
| Figura 5-3 Diagrama de flujo de planta de tratamiento de aguas residuales. | 33 |
| Figura 5-4. Diagrama de flujo diseño de planta propuesto..... | 38 |
| Figura 5-5. Filtros de cartucho para pretratamiento | 39 |
| Figura 5-6. Simulación unidad de UF. Fuente: Hydranautics projections..... | 45 |
| Figura 5-7. Diagrama de flujo de la unidad de Osmosis Inversa | 49 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Características de los filtros según presión de trabajo..... | 19 |
| Tabla 2. Resultados análisis químico del agua residual industrial | 34 |
| Tabla 3. Dureza del agua. | 35 |
| Tabla 4. Diseño de planta de producción. | 36 |
| Tabla 5. Volumen de aguas residuales producidas en planta | 36 |
| Tabla 6. Condiciones del agua de entrada a la unidad de UF. | 41 |
| Tabla 7. Resumen de diseño de planta de UF | 43 |
| Tabla 8. Elementos de bombeo y aireación del sistema. Fuente: Hydranautics..... | 44 |
| Tabla 9. Datos de entrada de alimentación de la unidad de OI. Fuente: IMSDesign. ... | 47 |
| Tabla 10. Trenes de alimentación. | 47 |
| Tabla 11. Configuración del sistema..... | 48 |
| Tabla 12. Resultados de cálculo para la unidad de OI..... | 48 |
| Tabla 13. Comparación y evolución de las diferentes etapas del permeado en OI..... | 49 |
| Tabla 14. Cálculo de la inversión unidad UF..... | 51 |
| Tabla 15. Cálculo de la inversión unidad OI | 52 |
| Tabla 16. Amortización de la inversión | 53 |
| Tabla 17. Componente variable del coste | 53 |
| Tabla 18. Costes de Energía UF | 54 |
| Tabla 19. Costes de Energía OI | 54 |
| Tabla 20. Reemplazo Membranas y Filtros | 54 |
| Tabla 21 Calculo del coste de productos químicos | 55 |
| Tabla 22. Costes del agua reciclada..... | 55 |
| Tabla 23. Costes de capital directos | 56 |
| Tabla 24 Costes de capital indirectos | 56 |

1 INTRODUCCIÓN

A través de los años se han estudiado diferentes métodos de optimización y recuperación de los recursos medioambientales, en especial las reservas hídricas existentes en el planeta. Sus usos y explotación en la industrialización, la agricultura y consumo urbano suponen consecuencias tanto positivas como negativas al medio ambiente; contaminación por distintos elementos (nitratos, sales, gases, etc.) que son depurados y expulsados luego de determinados procesos son los más alarmantes en la actualidad, dado que estos afectan y modifican los ecosistemas.

El art. 93 del Texto Refundido de la Ley de Aguas define contaminación como “la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores, con la salud humana, o con los ecosistemas acuáticos o terrestres directamente asociados a los acuáticos; causen daños a los bienes; y deterioren o dificulten el disfrute y los usos del medio ambiente”. [1]

A consecuencia de lo antes mencionado, se considera contaminado todo curso fluvial cuando la composición de sus aguas o su propio estado ha sido alterado o modificado de manera directa o indirecta por actividad humana, en la medida tal que las posibilidades de hacer un uso correcto de estas se limitan, afectando su estado natural.

Entre las principales causas de contaminación de los recursos hídricos se encuentran los generados por los vertidos industriales, agropecuarios, contaminación difusa procedente de escorrentías, tormentas, vía atmosférica, aguas residuales urbanas no tratadas, lluvias, residuos domésticos, residuos hospitalarios y sanitarios, y lo más alarmante, cuando se mezclan cada uno de estos vertidos en el núcleo urbano.

Se entiende por depuración, o tratamiento de las aguas residuales, el “conjunto de operaciones encaminadas a eliminar o reducir los agentes contaminantes presentes en el agua residual”. En el equilibrio propio de la naturaleza, la depuración se realiza en los cursos de agua, mediante los mecanismos de autodepuración. Sin embargo, en la

actualidad, para mantener el ciclo natural y posibilitar la recuperación de la capacidad de autodepuración de los ríos, se hace necesario emplear sistemas de tratamiento de las aguas residuales. [1]

Hoy día se conocen sistemas de tratamiento mediante depuradoras y biorreactores, que se encargan de eliminar elementos y materias resultantes del proceso de producción, pero no garantizan del todo la calidad y reutilización de estas aguas para otros procedimientos.

Es por ello por lo que, por medio de esta investigación se pretende hacer un tratamiento terciario de las aguas de una PTAR procedentes de una planta de producción de hormigón para ser tratadas mediante un sistema de tecnología de membranas de ultrafiltración y osmosis inversa, para reutilizar estas aguas en el proceso de elaboración de concreto.

2 OBJETIVOS

Objetivo general:

Como punto de partida, se trabaja con las aguas depuradas de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una planta de producción de concretos para la construcción, se diseñará una planta de tratamiento terciario combinando las tecnologías de UF+OI para la reutilización de estas aguas en el proceso industrial de producción.

Para ello se requiere de un proceso de depuración adecuado en el que se pueda reutilizar al máximo cada milímetro de agua que se genere de las distintas fases del proceso, aplicando un tratamiento y producir un agua de muy alta calidad, para aprovechar su uso en otras actividades a nivel industrial y que su impacto al ambiente sea el mínimo.

Objetivos específicos:

- Implementar un sistema de pretratamiento, filtración, floculación-coagulación, Ultrafiltración y Osmosis Inversa partiendo de las condiciones del agua a tratar.
- Simular el caudal de trabajo y calidad del agua procedente de la PTAR por medio de las herramientas de simulación y determinar qué tipo de membrana se ajusta a las condiciones presentes.
- Realizar un estudio económico para demostrar la factibilidad del proyecto a través del tiempo.
- Garantizar la calidad de estas aguas bajo los estándares esperados para la producción.

3 ANTECEDENTES

3.1 GENERALIDADES

Actualmente la humanidad enfrenta uno de los problemas más importantes y que afectan al desarrollo de los pueblos y se trata del abastecimiento de energía, su producción y el abastecimiento de agua en cantidades suficientes como para sostener y mantener su bienestar y desarrollo.

En el caso de la energía los recursos disponibles proceden mayoritariamente de fuentes no renovables (y por tanto limitadas en el tiempo) y, además, su empleo provoca graves problemas ambientales (lluvia ácida, deterioro de la capa de ozono, cambio climático, contaminación radioactiva). Actualmente son claramente insuficientes para abastecer a todos los países, sobre todo, si se tiene en cuenta la demanda creciente de las economías emergentes. [2]

El agua cuenta con la ventaja a diferencia de otros recursos, (como por ejemplo el energético) es que es un recurso renovable, dado que cumple con su ciclo natural. La problemática surge cuando enfrenta la desigualdad entre su disponibilidad provocando desequilibrios en las necesidades del recurso, por su mala distribución geográfica y temporal

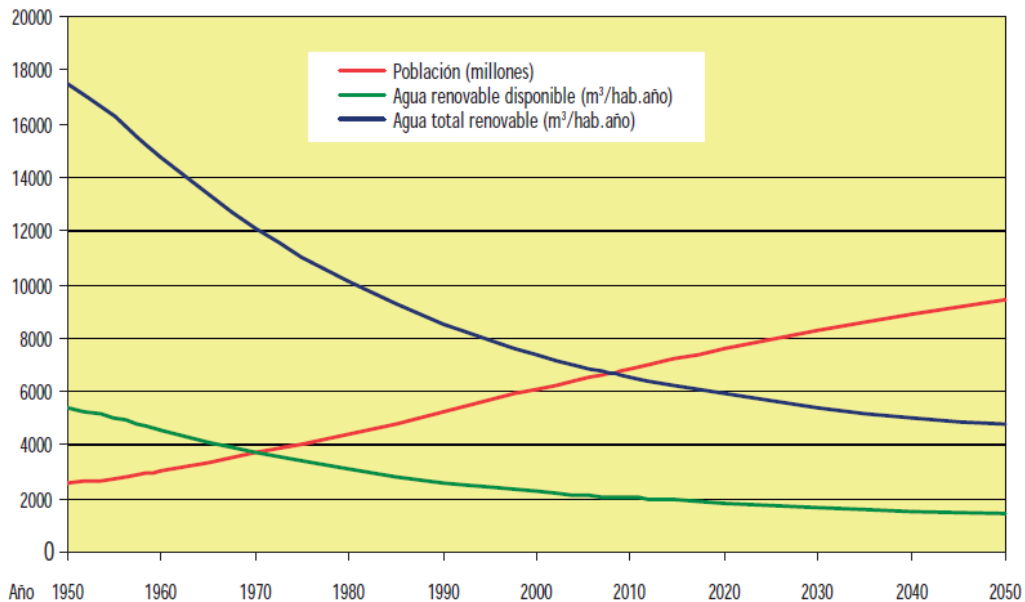
Cuando la demanda de agua excede a las disponibilidades, se puede esperar la competencia creciente por el agua entre los usuarios. Con el aumento de la escasez de agua y la presión sobre los recursos hay una mayor probabilidad de conflictos y problemas para su administración, de que se contamine, de que se originen problemas de salud, así como del cierre de actividades económicas como áreas de regadío, etc. Los desequilibrios que existen actualmente tienden a acentuarse a escala mundial. Se pueden indicar hasta siete causas importantes de carácter general:

- El crecimiento de la población y su mayor longevidad.
- El creciente desarrollo de países muy poblados. Mayores demandas de seguridad alimentaria y bienestar económico.

- Los grandes cambios demográficos con desplazamiento de la población del entorno rural al urbano.
- La contaminación de las aguas.
- Los periodos de sequía.
- La progresiva deforestación y desertización en muchas regiones.
- Las consecuencias imprevisibles del cambio climático.

Todos estos factores son importantes e influyen en la progresiva escasez de recursos hídricos de calidad a escala mundial. El efecto del crecimiento de la población es fácilmente cuantificable, como se puede apreciar en el gráfico 1, donde se representa la evolución de la disponibilidad de agua renovable por habitante y año, con una proyección hasta 2050. La línea azul representa la disponibilidad total y la línea verde la disponibilidad real, una vez restados los caudales de los grandes ríos que van al mar, las escorrentías de ramblas que desembocan en el mar, los recursos en zonas no habitadas, etc. [2]

Gráfico 1: Evolución del número de habitantes en el mundo y de la disponibilidad media de agua.



Fuente: *La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas*. Daniel Prats-Rico Universidad de Alicante. Alicante, España.

En 2016, con una población mundial de 7.400 millones de habitantes, el caudal de agua renovable disponible es inferior a 2.000 m³/hab. año. Si se tiene en cuenta que la propia ONU estima en 1.500 m³/hab-año el caudal razonable para cubrir todas las necesidades, se deduce la grave situación actual y futura para muchos países y regiones, dados los desequilibrios geográficos y temporales de la distribución de agua y las desigualdades en las disponibilidades técnicas y económicas para su aprovechamiento. [2]

Para minimizar o resolver la problemática del agua en las regiones con déficit hídrico caben dos tipos de actuaciones, gestionar mejor y obtener nuevos recursos. La reutilización planificada del agua es una forma evidente de obtener nuevos recursos. [2]

El notable desarrollo alcanzado por la reutilización planificada del agua, especialmente en países con recursos hídricos insuficientes, se ha debido tanto a la necesidad de ampliar los recursos de agua para atender una demanda en permanente expansión, como a la exigencia de mejorar las formas de gestión de los vertidos de aguas depuradas. Las aguas regeneradas deben considerarse como un recurso no convencional, cuya gestión debe incluirse en una planificación integral de los recursos hídricos, que tenga en cuenta los aspectos económicos, sociales y medioambientales. La mejora de la calidad de los efluentes es el elemento clave en el aprovechamiento y la gestión del agua. Así, el agua regenerada puede sustituir usos en los que se esté utilizando agua de gran calidad, como determinados usos urbanos o industriales, y liberar estos caudales para otros usos más exigentes. [2]

Cabe citar, al menos, las siguientes ventajas de la reutilización directa planificada:

- El aumento de la disponibilidad de agua en zonas sin reutilización.
- El uso integrado y sostenible de los recursos hídricos.
- Mantener el agua potable para beber y el agua regenerada para uso no potable.
- Reducir la extracción de agua superficial y subterránea.
- Contribuir a la reducción del consumo de energía en comparación con el uso de los recursos de aguas subterráneas profundas, aguas trasvasadas o aguas desaladas.
- Reducir las cargas de contaminantes a las aguas receptoras.
- Aumentar la producción agrícola.

- Reducir el uso de fertilizantes.
- Al ser un recurso estable, permite mayor fiabilidad en su disponibilidad.
- Una mayor protección del medio ambiente mediante la restauración de arroyos, humedales y lagunas.
- Aumentar el empleo y la economía local (por ejemplo, turismo, agricultura).

Ahora bien, hay que considerar de igual modo una serie de inconvenientes que pueden limitar, o en algunos casos imposibilitar, la alternativa de la reutilización. [2] Entre los inconvenientes se pueden indicar:

- La necesaria calidad asociada al uso, lo que implica un tratamiento apropiado.
- La necesidad de disponer de las apropiadas infraestructuras de almacenamiento y distribución.
- La aceptación social, que suele estar directamente relacionada con la garantía de calidad físico-química y microbiológica.
- Los costes asociados a la reutilización, que pueden ser elevados.

3.1.1 Tratamiento y la reutilización de aguas residuales

A medida que la población humana continúe creciendo y urbanizándose, los desafíos para asegurar los recursos hídricos y deshacerse del agua superficial serán cada vez más difíciles. Hoy en día, las aguas residuales generalmente se transportan a través de alcantarillas de recolección a una EDAR centralizada a la altura más baja del sistema de recolección cerca del punto de disposición al medio ambiente.

Debido a que las EDAR centralizadas están generalmente dispuestas para dirigir las aguas residuales a estos lugares remotos para su tratamiento, la reutilización del agua en las áreas urbanas es a menudo inhibida por la falta de sistemas de distribución dual. Los costos de infraestructura para almacenar y transportar agua recuperada a los puntos de uso son a menudo prohibitivos, lo que hace que la reutilización sea menos viable económicamente. Por lo tanto, los sistemas descentralizados de gestión de aguas residuales deberían considerarse más seriamente en el futuro para tratar las aguas residuales en o cerca de los puntos de generación de residuos. También es una

alternativa al enfoque convencional de transporte de agua recuperada de una central de tratamiento de aguas residuales, el concepto de tratamiento descentralizado (satélite) en ubicaciones aguas arriba con reutilización localizada y/o la recuperación de sólidos de aguas residuales es cada vez más apreciada.

La reutilización del agua ofrece un tremendo potencial para aumentar las carteras de recursos hídricos ya agotadas, sin embargo, la utilización / eliminación de biosólidos sigue siendo un reto particularmente para los entornos urbanos densos. Tanto en la reutilización del agua como en las aplicaciones de biosólidos a la tierra, el reto principal sigue siendo la percepción pública. Si bien las tecnologías avanzadas pueden ayudar a reducir la huella energética y aumentar la fiabilidad, el obstáculo de la percepción puede ser mucho más desalentador.

Los contaminantes emergentes como los productos farmacéuticos y las bacterias resistentes a los antibióticos son particularmente difíciles de explicar al público. Tanto los ejemplos históricos como los más recientes de enfermedades propagadas por el agua (como el cólera y la criptosporidiosis, respectivamente) pesan en gran medida sobre las preocupaciones del público sobre la seguridad de la reutilización del agua. Las tecnologías avanzadas tales como sensores en línea, membranas y oxidación avanzada pueden ayudar a facilitar la percepción; Sin embargo, una mejor comprensión de cómo la ingeniería de agua reutilizada se compara con las aguas de la fuente existente puede ser muy persuasiva.

El desafío de los constituyentes químicos emergentes se ha exacerbado por las preocupaciones de la toxicidad de la mezcla. La exposición a los productos químicos no ocurre discretamente, sino que las sustancias químicas existen como mezclas complejas de composición muy variable. Las pruebas con animales por sí solas no pueden abordar razonablemente la cuestión fundamental de "¿es seguro?" Esto es particularmente cierto para las mezclas, ya que existe un número aparentemente infinito de cálculos. Por lo tanto, los ensayos rápidos de detección biológica, principalmente *in vitro*, están ganando atención como un medio para evaluar rápida y exhaustivamente las mezclas complejas de productos químicos en agua. Los bioensayos de alto rendimiento pueden

utilizarse con bastante éxito para la identificación cualitativa y cuantitativa de los productos químicos presentes en una amplia gama de criterios biológicos de importancia para la salud pública.

Dado que los nuevos productos químicos se introducen constantemente en el mercado y teniendo en cuenta la cantidad innumerable de posibles productos de transformación, los bioensayos tienen buen sentido en pavimentar un camino que mejor ayudará al público y los reguladores a avanzar con proyectos de reutilización de agua. A medida que las ciudades continúan creciendo y los recursos hídricos continúan siendo más desafiados, sólo la reutilización, desalinización y transporte del agua pueden proporcionar recursos adicionales a los proporcionados por la deposición natural.

La reutilización del agua, en particular, tiene numerosas ventajas, pero también retos reales en términos de aceptación pública. Los científicos tienen la oportunidad de ayudar a avanzar en el campo mediante el desarrollo de una comunicación más efectiva de datos complejos y asegurándose de que la calidad del agua reutilizada se compara con la de los recursos hídricos urbanos existentes. [3]

Ante el inicio de la generación de aguas residuales por parte de una empresa, se debe plantear la conveniencia de una correcta gestión ambiental mediante la adopción de unas políticas ambientales adecuadas, lo que supone fomentar el desarrollo sostenible de la empresa, practicar una conducta seria y responsable con relación a la gestión ambiental, así como implantar la máxima prevención en materia ambiental.

La correcta gestión de las aguas residuales supone numerosas ventajas para la empresa de carácter ambiental, económico, fiscal y de imagen pública:

- Una gestión correcta de las aguas demuestra el interés de la empresa por el medio ambiente y ya es un valor por sí sólo. Además de ser un requisito, no único, pero sí necesario, para la implantación de un sistema de gestión medioambiental certificado tipo ISO 14001 o EMAS.

- El cumplimiento de la normativa vigente local, regional y estatal en materia de vertido de aguas residuales supone un importante ahorro económico en sanciones impuestas por la Administración. En general, las sanciones económicas están calculadas para que de ningún modo salga más rentable liquidar las sanciones que hacer las cosas correctamente desde el primer momento. Es por ello que tratar adecuadamente las aguas residuales es habitualmente la opción más económica. Cabe también destacar que, si el incumplimiento de la normativa es tipificado por la administración como muy grave, incluso puede darse el extremo de que se clausure el vertido, obviando las consecuencias que pueda tener para la actividad de la empresa esta medida.
- El hecho de verter las aguas residuales con un nivel de contaminación bajo supone la reducción de los impuestos que gravan la contaminación vertida (canon de vertido), que dependen del volumen y de la carga contaminante de las aguas residuales evacuadas. Si el caudal es elevado, el ahorro económico que supone reducir el canon de vertido es considerable.

Para tratar adecuadamente las aguas residuales, el primer paso consiste en conocer las características del efluente o de los efluentes que se han de verter. Es necesario realizar una caracterización de las aguas residuales mediante una campaña de análisis. Aunque esta caracterización suponga un coste económico, su realización es clave para garantizar el éxito del diseño y funcionamiento de las futuras instalaciones encargadas de tratar el agua. La campaña de muestreo y análisis debe ser diseñada y ejecutada por un profesional, que determinará de qué efluente y cuándo se deben coger las muestras, las cuales podrán ser simples o integradas. El objetivo es conseguir que las muestras analizadas sean representativas y el conjunto de análisis aporte información de qué vierte la empresa, cómo lo vierte y cuándo lo vierte.

Se debe analizar la normativa local, regional y estatal que pueda regular y limitar el vertido. En función de las características del vertido y de lo recogido en la normativa se establecerá el objetivo a cumplir por las instalaciones de tratamiento de las aguas que se deberán diseñar.

La importancia de la campaña de caracterización reside en el hecho de que, si ésta no es efectiva, el diseño de las instalaciones no será el óptimo y muy probablemente las aguas residuales no resulten adecuadamente tratadas.

Las instalaciones que albergarán los diferentes procesos de tratamiento de las aguas residuales deberán ser diseñadas por una empresa especializada, que disponga de profesionales experimentados y que sea experta en numerosas y variadas técnicas de tratamiento de aguas residuales. Sin duda, la mejor opción para el cliente que no conoce los entresijos del tratamiento de aguas residuales, es contratar el diseño, construcción y entrega llaves en mano de las instalaciones de depuración a una empresa especializada.

Una vez las instalaciones de tratamiento estén construidas y funcionando correctamente, es momento de tramitar ante la administración competente el permiso de vertido. Éste es preceptivo y en sí mismo es uno de los objetivos que justifica toda la inversión realizada.

También debe tenerse en cuenta que se puede dar el caso de que, para reducir al máximo los impuestos, sea económicamente interesante diseñar los procesos de tratamiento no sólo para cumplir los límites de vertido, sino para reducir al máximo la carga contaminante vertida. Así, de este modo, se reducen considerablemente los impuestos ambientales, como es el caso del canon de vertido, que en la mayoría de lugares existe con uno u otro nombre. Reducir la contaminación vertida por encima de lo que obliga la legislación genera unos costes de explotación mayores, pero cuando el caudal es elevado, se compensan sobradamente con la reducción de impuestos. Se debe evaluar esta posibilidad caso a caso.

Finalmente, el hecho de gestionar correctamente las aguas residuales permite poder optar a obtener un certificado de gestión ambiental del tipo ISO 14001 o EMAS, el cual siempre es valorado muy positivamente en un mercado globalizado donde al medio ambiente cada vez se le concede mayor importancia. [4]

4 TECNOLOGIAS DE MEMBRANAS

Entre los procesos que más han evolucionado en las últimas décadas se encuentran los de filtración a través de membrana. De forma general, éstos consisten en forzar el paso del líquido a filtrar a través de una membrana colocada sobre un soporte sólido. El hecho de necesitar cada vez mayores flujos de permeado, producidos a menores presiones de operación, ha llevado a un constante avance en el diseño y fabricación de las membranas.

En función del tamaño de las partículas que se deseen separar del líquido, variará el tipo de membrana a utilizar, siendo posible elegir entre las de filtración, microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

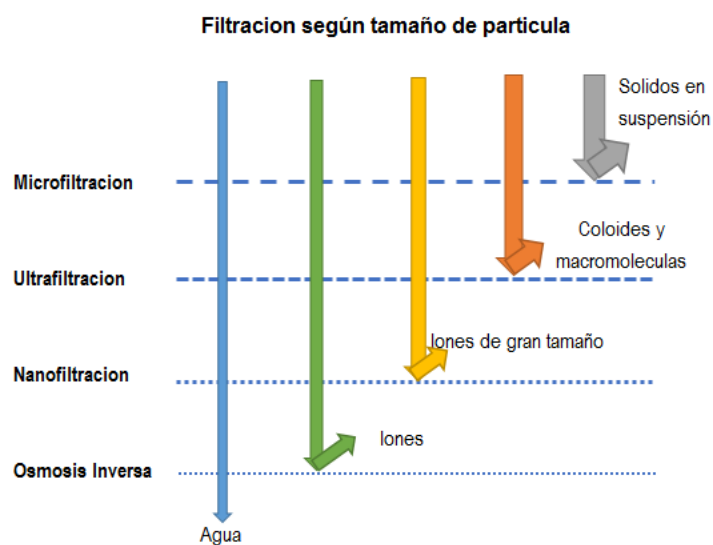


Figura 4-1 Tipos de membranas según tamaño de partícula.

Una membrana se puede considerar que es una barrera o película que permite la transferencia de determinados componentes de un medio al otro a través de ella y evita o restringe el paso de otros componentes. El flujo de estas sustancias a través de la membrana está determinado por la fuerza impulsora aplicada. Esta fuerza impulsora puede ser debida a gradientes de concentración, presión, temperatura o potencial eléctrico.

4.1 CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS

Existen equipos comerciales con diferente disposición de las membranas, para adaptarse a condicionantes diferentes. Así, podemos encontrar las siguientes configuraciones:

- **Cartucho de membranas:** Las membranas están plegadas alrededor del colector de permeado. Son sistemas compactos, ideales para tratar soluciones con una baja concentración de sólidos en suspensión y se suelen utilizar con membranas de filtración y de microfiltración.
- **Membranas en espiral:** Un conjunto de láminas de membrana, separadas entre sí por un soporte poroso, se enrolla alrededor de un tubo que actúa como colector de permeado. Es un diseño muy compacto, presenta una buena relación coste-eficiencia y es apropiado para aplicaciones de gran volumen. Generalmente se utiliza con membranas de nanofiltración y de ósmosis inversa.
- **Membrana tubular:** Las membranas, de forma tubular, están colocadas en el interior de una carcasa rígida. La alimentación entra por el interior de las membranas y el flujo es en dirección al exterior. Debido al diámetro del tubo de la membrana, de 5 a 10 mm, no es probable que existan problemas de colmatación. Es apropiada para efluentes con una concentración elevada de sólidos en suspensión. Se suele utilizar para aplicaciones de ultrafiltración.
- **Filtro de placa y marco:** Se asemeja físicamente a un filtro prensa. Las membranas se colocan sobre los marcos separadas por placas y la alimentación discurre por el espacio entre las placas y las membranas. A un lado de la membrana se concentran los sólidos y en el otro se evacúa el permeado. Esta disposición sólo se utiliza cuando el alimento tiene una elevada viscosidad, generalmente en aplicaciones de las industrias farmacéutica y alimentaria.
- **Fibra hueca:** Consta de un elevado número de membranas con un diámetro inferior a 0,1 mm que constituyen un haz en el interior de una carcasa. Se utiliza

prácticamente sólo para aplicaciones de nanofiltración y ósmosis inversa para tratar efluentes con una baja concentración de sólidos.

Las operaciones de separación mediante membrana son ampliamente utilizadas por las numerosas ventajas que presentan con relación a otras tecnologías. En primer lugar, ofrecen una elevada eficiencia de separación donde el factor clave es el *cut off* de la membrana. Son procesos que se pueden llevar a cabo a temperatura ambiente y de forma continua. El consumo de energía no es elevado y no se requiere el uso de reactivos químicos (excepto antiincrustantes para limpiar las membranas). También se debe valorar la facilidad de combinación de esta técnica con otros procesos. Por último, destacar que se trata de plantas muy compactas que requieren poco espacio físico.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que no es una técnica que elimine el contaminante, sino que lo concentra. Generalmente se genera una corriente de rechazo/residuo que debe ser tratada correctamente. También se debe tener en cuenta el coste de las membranas y su durabilidad. Será muy importante pretratar el efluente para alargar la vida útil de las membranas. Finalmente, en función de la aplicación concreta, se pueden presentar problemas de degradación, ensuciamiento o polarización de la membrana. Problemas que, si bien se pueden solventar, dificultan e incrementan los costes de operación.

Así pues, la filtración mediante membranas es superior a los métodos convencionales por la capacidad de producir separaciones de forma muy eficiente a temperatura ambiente y por la relación coste/eficiencia. [5]

4.2 PRETRATAMIENTO

El objetivo del pretratamiento en las aguas residuales es la eliminación de sólidos gruesos y otros materiales grandes que se encuentran a menudo en aguas residuales crudas. La remoción de estos materiales es necesaria para mejorar el funcionamiento y el mantenimiento de las unidades de tratamiento posteriores. Las operaciones de pretratamiento incluyen típicamente tamizado grueso, eliminación de granos y, en algunos casos, trituración de objetos grandes. En las cámaras de arena, la velocidad del agua a través de la cámara se mantiene suficientemente alta, o se usa aire, para evitar

el asentamiento de la mayoría de los sólidos orgánicos. La remoción de grano no se incluye como una etapa de pretratamiento en la mayoría de las plantas pequeñas de tratamiento de aguas residuales. Los conminadores se adoptan a veces para complementar el cribado grueso y sirven para reducir el tamaño de partículas grandes de modo que se eliminarán en forma de lodo en los procesos de tratamiento subsiguientes. Los dispositivos de medición de caudal, a menudo los canales de ondas estacionarias se incluyen siempre en la etapa de pretratamiento. [6]

Las aguas residuales depuradas no se contemplan como fuente directa para producir agua potable; pero sí pueden ser regeneradas para otros usos. Sin embargo, la elevada salinidad que en ocasiones presentan, las hace inadecuadas para su reutilización como aguas de riego o para recarga de acuíferos. En estas circunstancias, la aplicación de la desalación constituye un posible tratamiento terciario que facilita su regeneración y su reutilización. La fase de pretratamiento deberá estar adaptada a las características particulares de este tipo de aguas. [13]

4.3 FILTRACIÓN

La filtración convencional utiliza como medio filtrante un medio poroso formado por material granular (grava, arena, antracita, etc.). El líquido para filtrar se hace pasar a través del lecho poroso, por gravedad o mediante presión, quedando los sólidos atrapados en los espacios intersticiales que quedan entre las partículas que conforman el lecho filtrante.

En este tipo de filtros, el agua fluye a través de un lecho de grava y arena. Las propiedades del medio causan que el agua tome caminos erráticos y largos trayectos, lo cual incrementa la probabilidad de que el sólido tenga contacto con otras partículas suspendidas, y con el medio formado en la superficie del gránulo de grava o arena, siendo de esta manera retenido entre el material filtrante. Para una filtración o separación de sólidos más eficiente, también es conveniente darle un tratamiento previo al agua a tratar, agregándole sustancias químicas que causen la coagulación y

floculación de las partículas, ya que es más probable que el coágulo o flóculo sea retenido en el lecho del filtro que una sola partícula en estado coloidal.

La alternativa a la filtración mediante lechos porosos es la utilización de filtros formados por aglomerados de fibras sintéticas de policarbonato o de celulosa. En función del material utilizado y su disposición, el diámetro medio del poro del filtro varía, siendo éste el parámetro que determina el tamaño mínimo de las partículas que quedarán retenidas (*cut off* o valor de corte del filtro). Estos filtros se repliegan en el interior de un cartucho y son capaces de retener partículas con un tamaño superior a 10 μm (partículas de arena, de polvo fino, etc.). Permiten trabajar a unas densidades de flujo de 4 a 8 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ que, aunque las densidades de flujo de los filtros granulares sean similares, éstos últimos requieren mucho más espacio físico para ofrecer la misma superficie de filtración. No obstante, los filtros granulares pueden ser sometidos a lavados a contracorriente, los cuales son muy efectivos. Así, para filtrar un efluente con un alto contenido de sólidos, la opción más conveniente son los filtros granulares. Y cuando el contenido en sólidos es bajo o moderado, los cartuchos de filtración son más competitivos y requieren menos espacio. [5]

La etapa de filtración es obligatoria en el pretratamiento del agua bruta, salvo en casos muy especiales cuando el agua captada tiene un SDI_{15} inferior a 3, y se mantiene constante a lo largo del año y durante la vida de la planta.

Cuando se trate de un agua floculada pero no decantada se deberá mantener una velocidad de filtración de 5-10 $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ y será preferible usar filtros de lechos o capas múltiples, con el fin de evitar la sobrecarga y rápida saturación de los filtros y mejorar su rendimiento. En cualquier caso, y en lo que a velocidad de filtración respecta, siempre se deberán seguir las instrucciones del fabricante. [13]

Los filtros deberán estar dotados de un sistema de reparto de flujo que garantice un régimen de circulación lo más laminar posible, así como con un sistema de aire a baja presión a contracorriente que facilite el lavado del material filtrante. En ocasiones, se

emplea el agua de rechazo de osmosis para hacer retrolavados con el fin de ahorrar agua en este servicio.

En general, para conocer las necesidades y composición del pretratamiento es aconsejable conocer cuál es el recuento de partículas y su distribución porcentual.

4.3.1 FILTROS DE ARENA

Los filtros de arena se utilizan como un paso en el proceso de tratamiento de agua de la purificación del agua .

Hay tres tipos principales; Filtros de arena rápidos (gravedad) , filtros de arena de flujo ascendente y filtros de arena lentos . Los tres métodos se utilizan ampliamente en la industria del agua en todo el mundo. Los dos primeros requieren el uso de productos químicos floculantes para trabajar eficazmente, mientras que los filtros de arena lenta pueden producir agua de muy alta calidad libre de patógenos , sabor y olor sin la necesidad de ayudas químicas. Los filtros de arena, además de ser utilizados en plantas de tratamiento de agua, se pueden utilizar para la purificación de agua en hogares particulares, ya que utilizan materiales que están disponibles para la mayoría de las personas. [16]

4.3.1.1 Tipos de filtros de arena

En general, hay varias categorías de filtro de arena:

1. filtros de arena rápidos (gravedad)
2. filtros de arena rápida (presión)
3. filtros de arena de flujo ascendente
4. filtros de arena lentos.

Dos procesos que influyen en la funcionalidad de un filtro son la maduración y la regeneración.

Al comienzo de una nueva operación de filtro, la eficiencia del filtro aumenta simultáneamente con el número de partículas capturadas en el medio. Este proceso se llama maduración del filtro. Durante la maduración del filtro, el efluente puede no cumplir con los criterios de calidad y debe reinyectarse en los pasos previos de la planta. Los métodos de regeneración permiten la reutilización del medio filtrante. Se eliminan los sólidos acumulados del lecho filtrante. Durante el retrolavado, el agua (y el aire) se bombea hacia atrás a través del sistema de filtro. El agua de lavado a contracorriente puede ser parcialmente reinyectada frente al proceso de filtración y las aguas residuales generadas deben ser desechadas. El tiempo de retrolavado está determinado por el valor de turbidez detrás del filtro, que no debe exceder un umbral establecido, o por la pérdida de carga a través del medio filtrante, que no debe exceder un cierto valor. [15]

4.3.1.2 *Filtros de cama de arena*

Un filtro de lecho de arena es un tipo de filtro de profundidad . En términos generales, existen dos tipos de filtros para separar los sólidos en partículas de los fluidos:

- Filtros de superficie, donde las partículas son capturadas sobre una superficie permeable
- Filtros de profundidad, donde las partículas se capturan dentro de un cuerpo poroso de material.

Además, existen dispositivos pasivos y activos para la separación sólido-líquido tales como tanques de sedimentación, filtros de pantalla, autolimpiables, hidrociclones y centrifugadoras.

Hay varios tipos de filtro de profundidad, algunos emplean material fibroso y otros emplean materiales granulares . Los filtros de lecho de arena son un ejemplo de un filtro granular de profundidad de material suelto. Normalmente se utilizan para separar pequeñas cantidades (<10 partes por millón o <10 g por metro cúbico) de sólidos finos (<100 micrómetros) de soluciones acuosas. Además, usualmente se usan para purificar el líquido en lugar de capturar los sólidos como un material valioso. Por lo tanto, encuentran la mayor parte de sus usos en el tratamiento de efluentes líquidos (aguas residuales).

4.3.1.3 Condiciones de operación de los filtros de arena

En algunas aplicaciones es necesario pretratar el efluente que fluye en un lecho de arena para asegurar que los sólidos en partículas pueden ser capturados. Esto se puede conseguir por uno de varios métodos: [15]

- Ajuste de la carga superficial sobre las partículas y la arena cambiando el pH
- Coagulación : se añaden pequeños cationes altamente cargados (aluminio 3+ o calcio 2+)
- Floculación - adición de pequeñas cantidades de cadenas de polímero de carga que forman un puente entre los sólidos en partículas (haciéndolos más grandes) o entre los sólidos en partículas y la arena.

4.3.1.4 Características de filtros de arena rápido y lento.

A continuación, las características de los tipos de filtros según el tipo de presión que se le aplique:

Tabla 1: Características de los filtros según presión de trabajo.

| Características | Filtro de arena rápida | Filtro de arena lento |
|----------------------------------|--|-----------------------|
| Tasa de filtración [m / h] | 5 - 15 | 0,08 - 0,25 |
| Tamaño eficaz de los medios [mm] | 0,5 - 1,2 | 0,15 - 0,30 |
| Profundidad de la cama [m] | 0,6 - 1,8 | 0,9 - 1,5 |
| Largo del corrido | 14 días | 1 - 6 meses |
| Período de maduración | 15 min - 2 h | Varios días |
| Método de regeneración | Lavado a contracorriente | Raspado |
| Máxima turbidez de agua cruda | Ilimitado con un pretratamiento adecuado | 10 NTU |

Los filtros de la cama de arena trabajan proporcionando los sólidos en partículas con muchas oportunidades de ser capturados en la superficie de un grano de la arena. A medida que el fluido fluye a través de la arena porosa a lo largo de una ruta tortuosa,

las partículas se acercan a granos de arena. Pueden ser capturados por uno de varios mecanismos:

- Colisión directa
- Van der Waals o atracción de la fuerza de Londres
- Atracción de carga superficial
- Difusión.

Además, se puede impedir que los sólidos en partículas se capturen por repulsión de carga superficial si la carga superficial de la arena es del mismo signo (positivo o negativo) que el del sólido en partículas. Es posible desalojar las partículas capturadas, aunque pueden volver a capturarse a mayor profundidad dentro del lecho. Finalmente, un grano de arena que ya está contaminado con sólidos en partículas puede ser más atractivo o repeler los sólidos en partículas de adición. Esto puede ocurrir si al adherirse al grano de arena la partícula pierde la carga superficial y se vuelve atractiva para partículas adicionales o la carga opuesta y superficial se retiene repeliendo partículas adicionales del grano de arena.

4.3.2 Filtración por cartucho (filtración de seguridad)

La filtración por cartucho es el mínimo pretratamiento necesario para una planta de membranas. El poro nominal de los cartuchos habitualmente está comprendido entre 1 y 5 μm nominales (equivalente a unos 20 μm absolutos) para asegurar la protección de las membranas ante la posibilidad de que el agua arrastre macropartículas en suspensión.

Los filtros de cartucho son elementos de seguridad inmediatamente anteriores a las membranas y no deben utilizarse para una eliminación sistemática de partículas en suspensión. Por tanto, a la salida de procesos físico-químicos previos a la filtración por cartuchos, las aguas deben presentar una turbidez inferior a 1 UNF; y los valores de SDI_{15} obtenidos deben ser adecuados para las membranas usadas en desalación. [13]

4.3.3 Floculación - Coagulación

La coagulación-floculación es un proceso que tiene su puesta en ejecución en conjunto con la decantación y previo a la filtración, para la eliminación de las sustancias coloidales de origen tanto orgánico como inorgánico y que, debido a su tamaño, pueden llegar a obstruir las membranas. La finalidad de esta es la neutralización de la carga de las partículas coloidales mediante la adición de sales coagulantes, de las que más comúnmente son utilizadas las de aluminio y las de hierro.

La Coagulación-floculación es un procedimiento físico y químico por el cual las partículas que son demasiado pequeñas para separarse por sedimentación simple se desestabilizan y se aglomeran para acelerar su asentamiento. Un porcentaje significativo de partículas en suspensión en el agua es tan pequeño que su sedimentación hasta el fondo del tanque tomaría días o semanas. Estas partículas coloidales nunca se asentarían por sedimentación simple. [12]

El concepto general consiste en agregar un producto químico que aporta iones con carga positiva al agua que contiene coloides con carga negativa. Se requiere que un mezclado rápido de alrededor de 30 segundos para dispersar al coagulante. En seguida se lleva a cabo un mezclado suave de la suspensión, llamado floculación, a fin de favorecer el contacto entre partículas. Esto se consigue por mezclado mecánico. Por medio del proceso químico y físico combinado de coagulación/floculación, las partículas coloidales que no se asienten por sedimentación simple se aglomeran para formar sólidos más grandes llamados flóculos. [12]

Es la desestabilización y coalescencia inicial de las partículas coloidales (cargadas negativamente) presentes en el agua. La floculación es la formación de partículas más grandes (flóculos) a partir de partículas más pequeñas. La coagulación-floculación mejora las instalaciones de tratamiento de agua mediante la adición de productos químicos tales como cloruro de hierro $FeCl_3$. Estos coagulantes reducen la fuerza eléctrica repulsiva entre las partículas y crean una fuerza de atracción neta. Esto significa que la fuerza atractiva de Van der Waals se hace más alta que la fuerza repulsiva eléctrica. [7]

4.4 ULTRAFILTRACIÓN (UF)

El principio de la ultrafiltración es la separación física. Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Las sustancias de mayor tamaño que los poros de la membrana son retenidas totalmente. Las sustancias que son más pequeñas que los poros de la membrana son retenidas parcialmente, dependiendo de la construcción de una capa de rechazo en la membrana. Así pues, la depuración mediante ultrafiltración es un proceso en el cual el agua no se depura por un proceso químico ni biológico, sino por filtración a través de membranas, obteniendo aguas libres de microorganismos. [11]

El objetivo de la ultrafiltración es impedir el paso de los componentes que se desean eliminar, a esta característica se le conoce como «selectividad», mientras que el resto de componentes de del alimento deben atravesar la membrana con un flujo de permeado adecuado. Este debe ser el «rendimiento» que se espera debe cumplir el sistema.

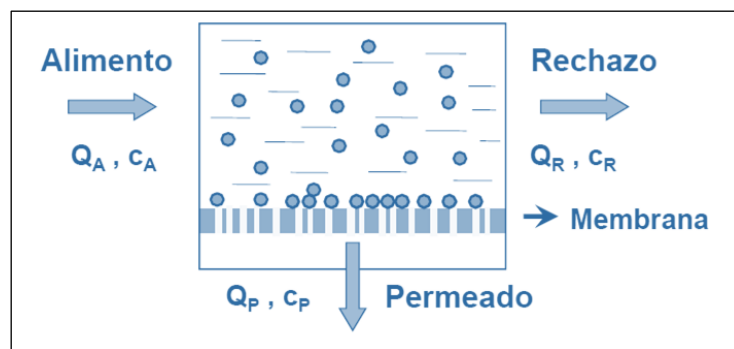


Figura 4-2 Proceso de Ultrafiltración.

La separación por membrana, unida a la adsorción por carbono activado, ha demostrado ser una tecnología capaz de lograr bajos niveles de COT y de reducir los valores de partículas submicrónicas a los niveles requeridos para el agua potable municipal e incluso para el agua ultrapura que se utiliza en la industria electrónica (Adham et al., 1983; Anselme et al., 1995). El proceso de UF como parte del tren de procesos tiene, por otra parte, muchas ventajas sobre las operaciones de clarificación y filtración

convencional; así, puede abrirse una nueva parcela en el cambio de la purificación del agua, dominada hasta ahora por las técnicas de coagulación y filtración. [8]

Las principales ventajas de los procesos de UF por membranas a baja presión cuando en comparación con los procesos de clarificación y filtración convencional (filtración directa, asentamiento/filtrado rápido en arena o coagulación/sedimentación/filtración) y de desinfección (poscloración), son:

- Ninguna necesidad de productos químicos (coagulantes, floculantes, desinfectantes, ajustes de pH).
- Filtración por exclusión de tamaño en oposición a filtración por media de profundidad.
- Adecuada y constante calidad del agua tratada en cuanto a eliminación de partículas y microorganismos, independientemente de la calidad inicial del agua.
- Compacidad del proceso y de la planta de tratamiento.
- Automatización sencilla.

La UF es un proceso conducido por presión, por el cual los coloides, las partículas y las especies solubles de elevada masa molecular son retenidas por un mecanismo de exclusión por tamaño, y como tal, suministra medios para concentrar, fraccionar o filtrar especies disueltas o en suspensión (Amy et al., 1987). La UF generalmente permite pasar a la mayoría de especies iónicas inorgánicas y retiene partículas discretas de materia y especies orgánicas iónicas y no iónicas, dependiendo del peso molecular de corte (PMC) de la membrana. [8]

4.4.1 Eliminación de materia particulada mediante UF

Entre las características y ventajas que posee la Ultrafiltración cabe destacar, que es un sistema reductor de los niveles de concentración de colorantes de elevado peso molecular, el COT y la turbidez de las aguas de alimentación. Es un proceso ideal para la eliminación de pequeñas partículas contenidas en el agua potable.

Estudios demuestran que, según el tamaño de poro y dimensiones de microorganismos, el uso de membranas de UF garantizan un producto final desinfectado. Mediante ensayos se ha demostrado que estas membranas son capaces de reducir las concentraciones virales y bacterianas en el permeado a niveles muy bajos como lo indique la turbidez.

La configuración de fibra hueca ha demostrado (Mandra et al., 1994) una elevada eficiencia y fiabilidad en la desinfección de agua potable, en comparación con otras configuraciones, como la enrollada en espiral, placas y armaduras y tubulares. Esto se debe a la construcción estanca epoxi de los módulos de fibra hueca, que excluye cualquier fuga potencial desde el sellado, como de los que son utilizados por otras construcciones modulares. [8]

4.4.2 Aplicaciones industriales de UF

A continuación, diversos sectores que emplean la tecnología de ultrafiltración para el tratamiento de sus efluentes:

- Tratamiento de residuos de fluidos de corte acuoso
- Aplicación en la industria láctea
- Aplicación en la industria textil
- Aplicación en la industrial de la pulpa y el papel
- Industria farmacéutica
- Industria electrónica
- Industria electroquímica
- Deshidratación de alimentos mediante la UF
- Recuperación de pinturas electroforéticas (sector automóviles y electrodomésticos)

4.5 OSMOSIS INVERSA (OI)

La ósmosis inversa es una tecnología de membrana ampliamente aplicada en la desalinización del agua, la producción de agua potable y más recientemente, el cual será

nuestro campo de aplicación, en el tratamiento de aguas residuales terciarias. Esta tecnología tiene las ventajas de los procesos de membrana como la construcción modular y la huella pequeña, que permiten la combinación con otros procesos de tratamiento (Chelme-Ayala et al., 2009).

La ósmosis inversa es un fenómeno basado en el equilibrio que se establece a ambos lados de una membrana semipermeable que separa dos volúmenes de líquido con diferente concentración salina. El solvente difunde a través de la membrana y la atraviesa, mientras que los iones disueltos no pueden hacerlo. De forma natural, el solvente pasaría de la solución más diluida en sales a la más concentrada, para igualar la presión osmótica (ósmosis). No obstante, si se aplica presión en el lado de la solución más concentrada, el flujo a través de la membrana se invierte y se produce un flujo neto de solvente que atraviesa la membrana desde la solución más concentrada a la menos concentrada. La presión que se debe aplicar depende de la concentración de sales en la solución concentrada.

En la microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración todo el fluido pasa la membrana mientras que los sólidos quedan retenidos en la superficie de la membrana. En el caso de ósmosis inversa, como a medida que la solución va incrementando su concentración en sales, la presión aplicada también debe ser mayor, el flujo es tangencial con relación a la membrana. De esta manera, parte del solvente atraviesa la membrana y la otra parte arrastra hacia el exterior todas las sales. Así, existe un caudal de alimentación y dos efluentes, el de permeado y el de rechazo, donde se concentran todas las sales disueltas, moléculas y partículas que contenía el alimento. En función del tipo de membrana utilizado, la presión de operación y las características del efluente a tratar, varía la proporción entre el caudal de permeado y el caudal de alimentación, variando entre un 50 y un 75%.

Para alargar la vida de las membranas de ósmosis inversa y de nanofiltración es conveniente pretratar el efluente, normalmente mediante una ultrafiltración.

4.5.1 Aplicaciones industriales de OI

La ósmosis inversa es especialmente adecuada para procesos señalados a continuación:

- Deshidratación
- Concentración/separación de sustancias
- Tratamiento de residuos líquidos.
- Concentrar sólidos disueltos o en suspensión
- Obtención de rechazo líquido que contiene una muy baja concentración de sólidos disueltos por otra.

A nivel industrial:

- Producción de agua de elevada pureza para usos:
 - Industria farmacéutica
 - Industria alimentaria
 - Centrales nucleares
 - Industria electrónica
 - Industria biotecnológica
- Industria productora de agua para consumo humano
- Desalinización de aguas salobres
- Desalinización de agua de mar
- Reutilización de aguas residuales

En aplicaciones ambientales:

- Tratamiento de aguas residuales
- Reducir y/o concentrar al máximo efluentes residuales
- Afinar el agua condensada en procesos de evaporación en los que se concentran residuos.

4.5.2 Concentrados de OI de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En los últimos años se ha aplicado también la ósmosis inversa para tratar adicionalmente los efluentes secundarios de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estos concentrados de OI presentan menos salinidad que los concentrados de OI de las plantas de desalinización, aunque se contienen mayores cantidades de materia orgánica, incluyendo micropoluturantes persistentes. Solley et al. (2010) informaron que los

contaminantes en estos arroyos podrían ser 6e7 veces más concentrados que en el agua de alimentación. Por lo tanto, se han investigado tratamientos específicos, como los procesos de oxidación avanzada (AOP), para reducir la carga contaminante.

La mayoría de los estudios reportados se centran en la reducción de un parámetro global que se asemeja a la contaminación orgánica, como la demanda química de oxígeno (COD) y el carbono orgánico total (TOC), aunque también se ha estudiado la eliminación de otros contaminantes. Por ejemplo, Ersever et al. (2007a, b) estudió la eliminación de compuestos nitrogenados de salmueras de OI a través de la nitrificación biológica, la nitrificación y la reducción de sulfato mediante un proceso de reactor de absorción bioactivo fluidizado (FBAR) y el uso de carbón activado granular (GAC). Los experimentos se realizaron a diferentes tiempos de retención hidráulica y concentraciones de nitratos, mostrando que el proceso FBAR podría ser una tecnología eficiente para la eliminación de nitrógeno de los concentrados de OI, aunque el nitrógeno se consideró un contaminante menor, la caracterización reciente de los concentrados de OI de EDAR muestra concentraciones de amoníaco hasta 120 mg / L, volviendo el interés a las tecnologías referidas. [7]

4.6 ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS

El ensuciamiento o fouling es el principal inconveniente de los procesos de membrana. Consiste en la deposición sobre o dentro de la membrana de diferentes elementos presentes en el agua. Pese a que el mecanismo de este proceso todavía no está del todo claro se apunta a que es consecuencia de la interacción fisicoquímica de estos elementos con la membrana. En el caso de la depuración biológica, los elementos que suelen producir el fouling son proteínas, materias coloidales o las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que son metabolitos excretados por la biomasa depuradora. Existen dos tipos diferenciados de fouling:

- **Fouling externo o reversible.** Las sustancias se depositan sobre la membrana.

- **Fouling interno o irreversible.** Las sustancias taponan los poros del interior de la membrana.

El fouling interno es sin duda un mayor problema que el externo ya que su eliminación es mucho más complicada y a menudo se ha de sustituir la membrana o realizar agresivos lavados químicos. Las consecuencias del fouling son realmente graves. La consecuencia más fácilmente observable es una reducción en el caudal de permeado debido a la obstrucción de los poros, ya sea en el exterior como en su interior. [9]

4.6.1 Tipos comunes de ensuciamiento

Los tipos de ensuciamientos más comunes de las membranas usadas en el tratamiento de agua son:

- Depósitos e incrustaciones inorgánicas.
- Ensuciamiento coloidal.
- Materia orgánica, colonizaciones microbiológicas y formación de biopelículas.

4.6.2 Limpieza de las membranas

Cuando el agua que llega a las membranas contiene sustancias tales como óxidos metálicos, silicatos de aluminio, materia orgánica, partículas coloidales, microorganismos y otros contaminantes menos frecuentes se producen ensuciamientos que afectan a los elementos que componen dichas membranas.

Además, el efecto de la concentración de iones disueltos a lo largo del sistema genera también riesgo de incrustación de sales.

Un mal o insuficiente funcionamiento del pretratamiento, una mala regulación de la conversión de la planta, inadecuada dosificación de reactivos o cambios no detectados en la calidad del agua de alimentación, aceleran los procesos de ensuciamiento en la membrana, y pueden incidir negativamente en su rendimiento.

Los síntomas de un ensuciamiento, no siempre detectables inmediatamente, se manifiestan habitualmente como pérdidas de la calidad del agua producto, disminución de la producción o aumento de las presiones de trabajo. Cuando se producen cambios

en los parámetros normalizados de funcionamiento en cualquier punto del bastidor, presión diferencial, caudal de permeado y paso de sales; debe programarse cuanto antes una limpieza con el fin de recuperar la situación original. [13]

Normalmente, se admite que debe realizarse una limpieza cuando se producen variaciones en torno al 10-15 % del valor de estos parámetros de funcionamiento. Si no se procede de forma inmediata a la limpieza una vez se detectan estos síntomas, pueden alcanzarse grados irreversibles de ensuciamiento o daños en la estructura de la membrana. En todo caso, siempre deberán seguirse las especificaciones del fabricante.

También es habitual, aunque no se haya producido ningún ensuciamiento, realizar una limpieza preventiva de la instalación al menos una vez al año.

Hoy en día se dispone de técnicas de limpieza muy efectivas que deben aplicarse diligentemente cuando se presentan problemas de precipitaciones y/o ensuciamientos para reestablecer las condiciones de flujo normales.

Las técnicas analíticas disponibles permiten determinar la causa de los posibles problemas. Las autopsias de membrana deben hacerse para prevenir la repetición de cualquier contingencia que produzca un daño irreversible en un plazo más corto de uso que el habitual.

4.6.3 Antiincrustantes

En las membranas de los equipos de ósmosis inversa, debido al aumento de la concentración de sales que en ellas se produce, suelen precipitar depósitos de sales de baja solubilidad principalmente carbonato cálcico, hidróxido de magnesio, fluoruro cálcico y otras sales generalmente de elementos alcalino-térreos.

Para evitar estos precipitados y la consiguiente disminución en el rendimiento de las membranas, diversas entidades han colaborado en la fabricación de productos anti-

incrustantes que impiden su formación y garantizan el correcto funcionamiento de los equipos.

Algunos de estos productos cumplen con la Normativa UNE-EN (aspectos normalizados con relación a los límites de sustancias tóxicas, consideraciones sobre la pureza, máxima dosificación, que deben respetarse por el fabricante y el gestor) existente y son adecuados para la producción de agua destinada a consumo humano. [14]

Las dosis varían en función de las características del agua a tratar y del diseño y de la conversión del equipo de ósmosis inversa.

Las membranas deben limpiarse de forma periódica (limpieza habitual de las instalaciones al menos una vez al año), o como se ha indicado, cuando la presión diferencial (ΔP), el caudal de permeado o el paso de sales (conductividad del permeado) varíen en un 10-15% respecto a los valores de diseño. Siempre deben respetarse las condiciones establecidas por el fabricante para no deteriorar o acortar la vida útil de las membranas. La operación de limpieza se realiza siempre con la planta fuera de producción. [13]

La elección de los productos y procedimiento de limpieza más adecuados vendrá determinada por el tipo de ensuciamiento presente. Consecuentemente, es recomendable llevar a cabo ensayos piloto encaminados a investigar tanto el tipo de ensuciamiento existente como la eficacia del método de limpieza que debe emplearse. Con frecuencia es recomendable utilizar una combinación de varios productos en una o más etapas de limpieza.

5 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE UNA PTAR DE UNA PLANTA DE CONCRETOS.

***Nota importante:** Dado que la información obtenida para la realización de este trabajo es de origen real y para proteger la información de la empresa, los datos serán utilizados bajo anonimato.

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La planta se dedica a la producción y comercialización de concreto para la construcción. Está ubicada en la provincia de Santo Domingo, República Dominicana. Posee una superficie total de 15,601.10 m² (110.38m x 141.34m).



Figura 5-1. Localización geográfica de la planta. **Fuente:** Google Maps.



Figura 5-2 Plano general de la planta **Fuente:** Google Maps.

5.2 CARACTERÍSTICAS ACTUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

La raíz de este estudio se basa en la necesidad de tratamiento de las aguas residuales resultantes en el proceso de fabricación, lavado de equipos y demás operaciones en una planta de producción de concreto para la construcción, para acondicionar estas aguas y reutilizarlas en el proceso productivo mediante una serie de tratamientos empleando las técnicas de pretratamiento por Ultrafiltración (UF) y luego aplicación de Osmosis Inversa (OI) con tecnología de punta para obtención de un agua de calidad.

En la actualidad, se hace uso de estas aguas con una sola vía de tratamiento por una PTAR configurada como se muestra a continuación, una descripción del proceso:

- **Sedimentador primario:** desde aquí se realiza la captura inicial de las aguas residuales procedentes de las operaciones para la realización del tratamiento inicial correspondiente.
- **Campana de reciclaje:** en esta se vierten los restos de material que retornan a la planta con los camiones mezcladores, para separar los agregados, tanto fino como grueso (grava y arena), y enviar estas aguas al sedimentador.
- **Taque de agitación:** el agua hace paso del sedimentador al tanque de agitación, donde se tiene instalado un sistema de bombeo para hacer paso del agua al decantador. Aquí ocurre el proceso de flotación, técnica empleada para la eliminación de determinados sólidos presentes en el agua. Este es el proceso previo a la filtración por cartuchos que se empleará para tratamientos posteriores.
- **Estación de bombeo:** Esta bomba sumergible es utilizada para transportar el agua desde el tanque de agitación hasta el decantador secundario.
- **Sedimentador secundario o decantador:** una vez el agua sale del tanque de agitación, pasa a una sedimentación secundaria o decantación, donde el agua tratada va al tanque de almacenamiento y los lodos van al lecho de secado de lodos. El decantador se encarga de eliminar la materia en suspensión y la materia floculada por sedimentación gravitatoria.

- **Agua tratada:** esta es el agua resultante de la decantación, se almacena en un tanque de almacenamiento, lista para su reutilización.
- **Lodos residuales:** este es el residuo de las operaciones desde la sedimentación primaria o de la sedimentación secundaria o decantación. Son depositados en un lecho de secado donde sufren una deshidratación para terminar de lixiviar el agua restante y luego destinan estos a su disposición final, fuera de la planta.

Cabe señalar que, dado la calidad de estas aguas, y lo cual es uno de los objetivos aun no alcanzado, es que se haga un uso del 100% de aguas recicladas para la producción, pese a su alto contenido de residuos, resulta perjudicial para el producto final y solo se utilizan 100 litros por metro cubico producido, cuando el objetivo de hacer uso de ellas, (aparte de minimizar el impacto ambiental) ha sido dosificar el total requerido por m³ producido.

Se muestra el diagrama de flujos del proceso actual de la decantación y tratamiento de aguas residuales que existe en la actualidad en la planta:

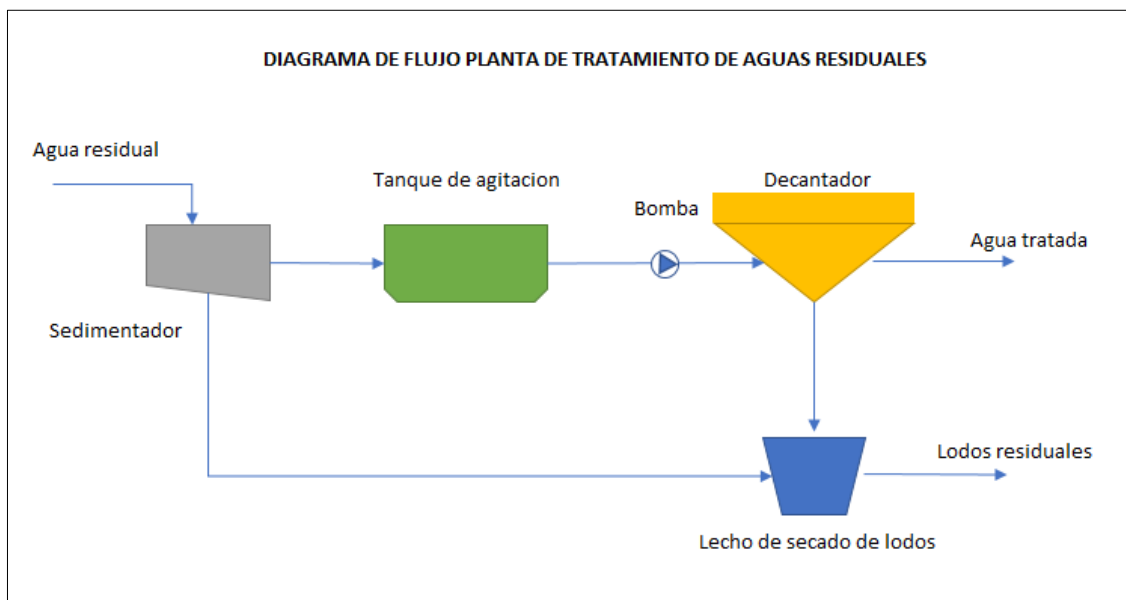


Figura 5-3 Diagrama de flujo de planta de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: Elaboración propia

5.3 ANÁLISIS QUÍMICO DEL AGUA

Se ha realizado un análisis químico de la calidad del agua del decantador de la planta mediante toma de muestra y llevada a laboratorio. Los resultados obtenidos muestran que estas aguas poseen un pH alcalino, al momento de la toma de muestra en 11.39, y los niveles recomendados para un pH básico deben oscilar entre los 6.8 a los 7.2, así como de su conductividad, que se encuentra en 992 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que supone, que para asegurar la calidad de estas aguas se procederá aplicar el tratamiento antes sugerido.

Tabla 2. Resultados análisis químico del agua residual industrial

| Tipo de muestra: Agua residual industrial | |
|---|-----------------------------|
| Temperatura de recepción | 5.5°C |
| pH | 11.39 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | 4 mg/L |
| Demanda Química de Oxígeno | 24 mg/L |
| Sólidos Suspendidos Totales | 13 mg/Lo |
| Conductividad | 992 $\mu\text{S}/\text{cm}$ |

Pese a los resultados antes observados, el nivel de conductividad de estas aguas es demasiado elevado, lo que la clasifica como un agua de alto nivel de dureza, no apta para consumo. La principal causa del elevado nivel de dureza de estas aguas se debe posiblemente a la presencia de iones de calcio (Ca^{2+}) o magnesio (Mg^{2+}) disueltos, así como la cantidad de sólidos en suspensión presentes.

En esta tabla se presenta el nivel de referencia de dureza del agua:

Tabla 3. Dureza del agua.

Fuente: www.reitec.es

| Tabla de dureza del agua | | | |
|--------------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Ppm | $\mu\text{S/cm}$ | ºf | Dureza |
| 0-70 | 0-140 | 0-7 | Muy blanda |
| 70-150 | 140-300 | 7-15 | Blanda |
| 150-250 | 300-500 | 15-25 | Ligeramente dura |
| 250-320 | 500-640 | 25-32 | Moderadamente dura |
| 320-420 | 640-840 | 32-42 | Dura |
| Superior a 420 | Superior a 840 | Superior a 42 | Muy dura |

En estos resultados se fundamentará el nuevo diseño de la planta para el tratamiento terciario de aguas residuales producto de las operaciones. Estas aguas provienen de las operaciones de lavado de los camiones, limpieza de las áreas de trabajo, aguas de las lluvias (muy frecuentes en la zona), así como de otras actividades de la operación (humedad de los agregados, piletas de curado del laboratorio de calidad, entre otras).

5.4 NIVEL DE DEMANDA DE AGUA A PRODUCIR

5.4.1 Diseño de planta

Según el diseño de planta, se realizan los cálculos de demanda de agua para la producción, en una jornada de trabajo de 8 horas. Sin embargo, el diseño soporta jornadas de operación de hasta 16 horas al día.

Los equipos para el tratamiento terciario de las unidades de Ultrafiltración y Osmosis Inversa estarán instalados en una nave prefabricada industrial de unos 40m².

Tabla 4. Diseño de planta de producción.

| Diseño de planta de producción de concretos | | |
|---|------------|------------|
| | Volumen | Unidad |
| Jornada de trabajo | 8 | hr |
| Volumen de agua por cada m3 a producir | 0,2 | m3 |
| Tiempo de cargue | 6 | min/carga |
| Volumen de producto por carga realizada | 7 | m3 |
| Capacidad instalada de cargas por hora | 10 | carga/hora |
| Cargas al día | 80 | carga/día |
| Volumen de agua por carga | 1,4 | m3 |
| Volumen de producción del diseño | 560 | m3 |
| Volumen de agua para la producción | 112 | m3 |

Detrás del objetivo de esta planta, luego de aplicado el tratamiento antes sugerido, debe garantizar la capacidad de abastecer este nivel de demanda para los días de alta demanda de producción, para que la planta pueda producir al 100% con aguas reutilizadas.

Tabla 5. Volumen de aguas residuales producidas en planta

| Volumen y caudal de agua residual a depurar | | |
|---|---------------|---------------|
| Caudal de agua residual | 254 | lt/min |
| | 15,24 | m3/hr |
| Volumen para depurar por jornada | 121,92 | m3/día |

Estos son los niveles de producción de aguas residuales promedio por día; estos volúmenes pueden variar debido a diversos factores, entre ellos, el volumen de producción del día, pues dependiendo de las ventas y el tamaño de los proyectos, pueden aumentar o disminuir proporcionalmente, por día.

La calidad del agua solicitada para las operaciones debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Nivel de pH inferior a 11 (actual).
- Garantizar un flujo máximo requerido para la producción en horas pico de 14 m³/hr.
- Menor concentración de sólidos en suspensión.
- Reducción del nivel de dureza y conductividad del agua
- Adición de sales iónicas con elevada carga para favorecer la coagulación-floculación previo al proceso de filtración.

*Estos valores pueden variar en función del volumen de producción por día

5.4.2 Diagrama de flujo del diseño de planta propuesto

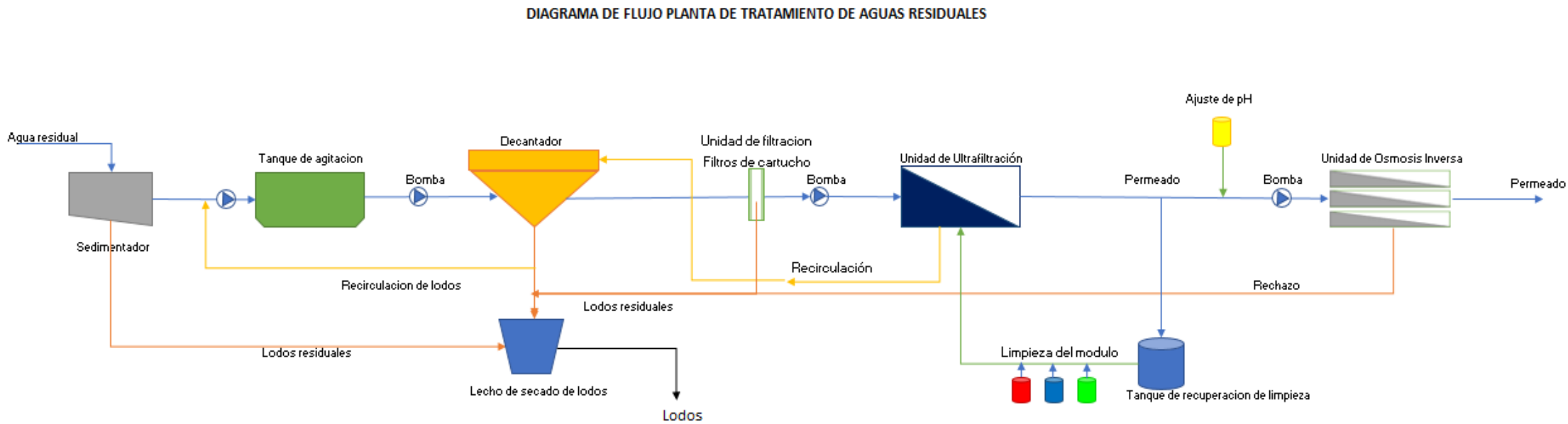


Figura 5-4. Diagrama de flujo diseño de planta propuesto.

5.5 UNIDAD DE FILTRACIÓN PARA EL PRETRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

En esta etapa del proceso, se realiza la primera separación de sólidos luego de la decantación, empleando una unidad de filtros de cartuchos con un tamaño de poro nominal comprendido entre 1 y 5 μm para asegurar la protección de las membranas, con la capacidad de separar la mayor cantidad de sólidos antes de pasar a la unidad de ultrafiltración.

Los filtros de cartucho son elementos que se aplican para el tratamiento previo a la implementación de cualquier sistema de membranas como método de seguridad, y se recomienda que estas aguas presenten una turbidez no superior a 5 NTU (Unidades Nefelométricas de turbidez) para garantizar su funcionamiento.

El ensuciamiento de los cartuchos se controla mediante un medidor de presión diferencial que origina la alarma correspondiente. Además, cada filtro incorpora un medidor de caudal local, tipo rotámetro, que proporciona el grado de ensuciamiento relativo de cada filtro.



Figura 5-5. Filtros de cartucho para pretratamiento

5.6 HERRAMIENTA EMPLEADA PARA LA SIMULACIÓN DE LA UNIDAD DE UF Y OI

Para llevar a cabo de modo que podamos obtener los resultados esperados de esta propuesta de tratamiento de aguas residuales, todo el sistema se ha modelado

mediante softwares que nos presentan de la manera lo más real y esperada posible el comportamiento del sistema una vez puesto en marcha. Para ellos, se ha modelado la unidad de Ultrafiltración mediante el Software de Hydranautics projections, el modelo HYDRAcap MAX web Simulator, y para la unidad de Osmosis Inversa, se ha utilizado el software IMSDesign, de Hydranautics, respectivamente.

5.6.1 Hydranautics Projections Software. HYDRAcap MAX web simulator

El simulador de membrana de ultrafiltración HYDRAcap MAX es el primer programa basado en la web de Hydranautics que está siendo utilizado por expertos en el desarrollo de sistemas de tratamiento de aguas. Es extremadamente fácil de usar. Introduciendo sólo unas pocas entradas, el simulador calcula todos los parámetros del sistema HYDRAcap MAX. También permite al usuario modificar fácilmente los diseños para satisfacer los requisitos. Produce una descripción compacta del proceso gráfico. También se puede obtener un diseño más detallado. La mejor característica es que el simulador trabaja el diagrama de secuencia del proceso para el diseño que ahorra muchas horas del trabajo de un ingeniero de proceso. [10]

5.6.2 IMSDesign

IMSDesign (Integrated Membrane Solutions Design) es la última versión del software de proyección de membrana Hydranautics. Es una herramienta de dimensionamiento avanzada que satisface las necesidades más exigentes de los profesionales de la membrana. En el último software de IMSDesign, la sofisticación satisface a Simplicidad. Este programa es una herramienta avanzada y potente desarrollada utilizando la tecnología .NET de Microsoft. Ofrece funciones mejoradas del programa, gráficos mejorados e incluye nuevas características, que mejoran la capacidad del usuario para diseñar y analizar con rapidez y precisión los sistemas basados en membranas. IMSDesign ofrece a los usuarios un control completo sobre la información utilizada en el proceso de selección de membranas. Este control garantiza al usuario plena confianza en el rendimiento proyectado de cualquier membrana de Hydranautics. [10]

5.7 UNIDAD DE UF PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Posterior a la filtración se realiza la primera utilizando tecnología de separación por membranas para el tratamiento de las aguas residuales. Partiendo de las características antes conocidas, se procede a simular el comportamiento del sistema con el uso del software Hydranautics Project.

Para el diseño básico de esta unidad de Ultrafiltración se tomó como parámetro de diseño la calidad del agua depurada por la unidad de tratamiento inicial, procedente de la salida del decantador secundario.

Tabla 6. Condiciones del agua de entrada a la unidad de UF.

Fuente: Hydranautics projections

| Calidad del agua de alimentación | | |
|----------------------------------|-------|-----------------------------|
| Fuente: Agua residual industrial | Valor | Unidad |
| Temperatura mínima | 20 | °C |
| Turbidez | 5 | NTU |
| Solidos suspendidos totales | 13 | Ppm |
| Solidos disueltos totales | 700 | Ppm |
| DQO | 24 | Ppm |
| DBO5 | 4 | Ppm |
| TOC | 2 | Ppm |
| pH | 11.39 | |
| Fe | 0.02 | mg/L como Fe |
| Mn | 0.02 | mg/L como Mn |
| Al | 0.05 | mg/L como Al |
| Alcalinidad | 100 | mg/L como CaCO ₃ |
| Ca | 200 | mg/L como CaCO ₃ |
| Dureza total | 800 | mg/L como CaCO ₃ |
| LSI | 3.622 | |

Esta agua residual ya se encuentra previamente decantada y habiendo pasado por el filtro de cartucho, presenta un pH de 11.39, una cantidad de solidos disueltos totales de 700 ppm que se debe controlar, turbidez de 5 NTU, así como una dureza de 800 mg/L como CaCO.

5.8 DISEÑO DE LA UNIDAD DE ULTRAFILTRACIÓN UF

Los parametros de diseño de la planta se basan en un sistema de UF en condiciones sencillas de operacion y obtener las condiciones de calidad del agua esperada para pasar a la siguiente etapa.

5.8.1 Membrana HYDRAcap MAX 40 – Especificaciones.

La membrana utilizada en este proceso de ultrafiltración para el tratamiento de estas residuales es la HYDRAcap MAX 40 de la casa Hydranautics Nitto Group Company, la cual cumple con las características de operación de pretratamiento, garantizando el permeado para la calidad del agua esperada para pasar a la siguiente etapa de tratamiento, que consistirá en Osmosis Inversa.

En la ficha técnica se especifican las condiciones de presión tanto de alimentación (5 bar) como presión transmembranal (2 bar) que se puede aplicar para operar el sistema. Alcanza una capacidad de filtrado de hasta 5.5 m³/h, desempeño que cumple con la necesidad dado el caudal de alimentación que nos proporciona la planta. (Ver anexo 1).

5.8.2 Condiciones de operación de la unidad de UF

Los valores de turbidez deben oscilar entre <0.2 NTU, solidos suspendidos totales de <0.5 ppm y un pH de 11.39 que se controlará a la salida de esta etapa.

El sistema se ha diseñado con un bastidor, de 9 módulos y un factor de conversión de 94.71%. La planta tendrá un tiempo de operación de 8 horas diarias, de las cuales 5.95 serán de producción. Cada ciclo de filtrado toma un tiempo de 32 minutos, basando el diseño del sistema en un flux constante. El volumen diario de alimentación de agua que vamos a tratar en esta etapa del proceso es de 120.1 m³/d y el flujo de alimentación es de 15.01 m³/h. la temperatura actual de alimentación es de 20°C y la turbidez de 5 NTU.

5.8.2.1 Resultados del diseño

En la tabla 7 se presentan los resultados del diseño de la unidad de ultrafiltración para el tratamiento deseado.

Tabla 7. Resumen de diseño de planta de UF

| Resumen de diseño de planta de UF | | |
|---|------------------|--------|
| Elemento | Valor | Unidad |
| Número de bastidores | 1 | |
| Módulos por bastidor | 9 | |
| Número de válvulas/modulo | 8 | |
| Total de válvulas | 11 | |
| Tipo de modulo | HYDRAcap® MAX 40 | |
| Material de membrana | PVDF | |
| Área de membrana por modulo | 52 | m2 |
| Bomba de alimentación | 1 | |
| Volumen diario de alimentación | 120.1 | m3/d |
| Volumen neto de filtrado | 113.7 | m3/d |
| Volumen de rechazo diario | 6.098 | m3/d |
| Rechazo libre de carga química | 3.904 | m3/d |
| Rechazo con carga química | 2.435 | m3/d |
| Volumen de concentrado | 0 | m3/d |
| Volumen de alimentación de permeado | 15.01 | m3/h |
| Factor de conversión | 94.71 | % |
| Tiempo de operación | 8 | h/24 |
| Tiempo de filtración | 32 | min |
| Tiempo de producción del sistema con 1 bastidor en servicio | 5.95 | h |
| Flux promedio | 40.84 | LMH |
| Factor de corrección de temperatura | 1 | |

5.8.3 Elementos de bombeo y aireación del sistema de UF

Se empleará una bomba para el sistema de alimentación de la planta de un promedio de 19.17 m3/h, operando a una presión de 16.77 bar. El sistema con un ventilador que opera a 109.5 m3/h.

Tabla 8. Elementos de bombeo y aireación del sistema. **Fuente:** Hydranautics.

| Equipo | Detalle | Unidad | Valor |
|---|--|--------------------|-------|
| Bomba de alimentación | Bombas de alimentación | | 1 |
| | Flujo promedio por bomba de alimentación | m ³ /h | 5.006 |
| | Presión promedio de alimentación | Bar | 16.77 |
| | Flujo máximo de alimentación por bomba | m ³ /h | 19.17 |
| | Consumo estimado de energía total consumida por alimentación | kWh/m ³ | 0.076 |
| Purga de aire/ventilador del sistema | Cantidad de ventiladores | | 1 |
| | Rango promedio de aeración por rack/ventilador | m ³ /h | 109.5 |
| | Presión de aire promedio | kPa | 53.06 |
| | Consumo medio estimado de energía del ventilador | | |

5.8.4 Modelado del sistema de UF

Los productos HYDRAcap contienen membrana de fibra capilar hecha de un poliéter sulfona hidrófila, con un corte nominal de peso molecular de 150.000 Daltons. El agua de alimentación penetra en el centro (lumen) de las fibras y penetra a través de la membrana radialmente hacia afuera, produciendo una turbiedad del filtrado típicamente inferior a 0,07 NTU. Los módulos HYDRAcap de estos sistemas funcionan en un método de flujo direccional (punto muerto), donde toda el agua de alimentación se convierte en filtrado. Los módulos de ultrafiltración se lavan regularmente para restaurar la permeabilidad, que disminuye a medida que se acumulan sólidos en la membrana. La tolerancia del pH (1.5-13.0) de la membrana permite la adición de productos químicos para la limpieza y el retrolavado químicamente mejorado.

A continuación, una vista generalizada de la simulación del sistema de ultrafiltración usando los elementos de HYDRAcap® MAX 40.

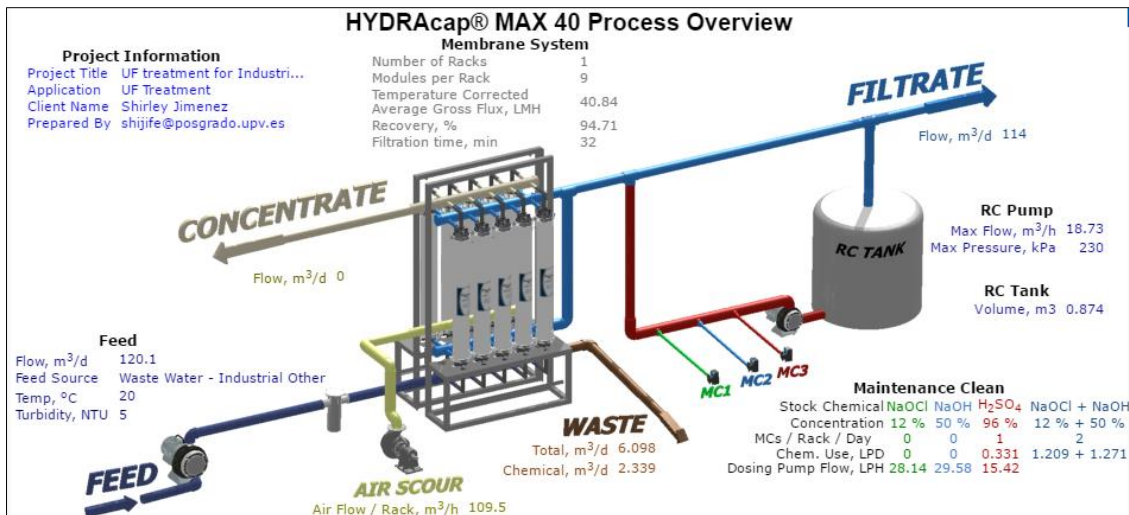


Figura 5-6. Simulación unidad de UF. Fuente: Hydranautics projections.

En esta configuración no hay salida de concentrado directo que retorne a la alimentación. El flujo de salida de permeado es de 114 m³/d.

5.9 UNIDAD DE LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS DE UF

Este sistema de membranas de la unidad de UF toma un tiempo de limpieza post operación de 20-30 minutos, y la frecuencia recomendada por el fabricante para estos lavados es de 1 a 3 veces al día.

Dado que el diseño permite una configuración de un sistema de auto limpieza usando el agua filtrada y adicionando a esta 12% NaOCl (hipoclorito sódico), 96% H₂SO₄ (ácido sulfúrico) y 50% NaOH (hidróxido de sodio), la recuperación de limpieza al sistema tendrá lugar en un tanque a la salida del filtrado, con un caudal máximo de 18.73 m³/h y una presión de salida de 2,3 bar. El caudal de rechazo obtenido tras la limpieza es de 6.098 m³/d, del que esta cantidad lleva una carga química de 2.33 m³/d. Este será reenviado al decantador secundario para decantación, separación de sólidos y recirculación del efluente.

5.9.1 Antiincrustantes

En esta unidad no es necesaria la aplicación de antiincrustantes dado que cuando el agua pasa por esta etapa la cantidad de sólidos es muy mínima. En caso preciso, se aplicaría

como solución un producto anti-incrustante que actúe sobre los procesos de cristalización e impida la formación de depósitos de sales, especialmente de calcio y magnesio, si las condiciones del agua a tratar cambiaran o se alterasen sus propiedades.

5.10 CONTROL DE PH

Una vez terminada la etapa de Ultrafiltración, el permeado pasa por un proceso de equilibrio de pH, que durante la etapa de UF entro con 11.39. Mediante la adición de CO₂ se pretende llevar este pH a un nivel menos alcalino (pH = 8) previo la etapa de Osmosis Inversa.

Para la lectura del nivel de acidez en estas aguas residuales, se recomienda la instalación de un medidor de pH en el tanque donde se realiza la primera etapa de decantación, para un control adecuado de la adición del CO₂ a la salida de la unidad de UF, y otro en el tanque de almacenamiento del agua tratada, dado que estos valores fluctúan dependiendo la concentración de residuos de estas aguas.

5.11 DISEÑO DE LA UNIDAD DE OSMOSIS INVERSA OI

Partiendo del flux de salida de la unidad de UF, se diseña la unidad de OI para llevar este filtrado agua a un nivel de calidad del agua pura. La conductividad, los cationes y aniones presentes en el filtrado de la unidad de UF fueron simulados para la unidad de OI.

Tabla 9. Datos de entrada de alimentación de la unidad de OI. Fuente: IMSDesign.

| | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|------------|----------------|-----------------|------------|---|--------------|--|
| Proyecto: | arciarrio OI para aguas residu | | Calculado por: | Shirley Jimenez | | Temperatura: | 25,0 °C | |
| pH | 8,00 | | CO3 | 0,001 mg/l | | CO2 | 0,002 mg/l | |
| | | | | | | Conductividad | 1499,0 µs/cm | |
| Cationes | | | Aniones | | | seleccione análisis | | |
| | mg/l | mg/l CaCO3 | | mg/l | mg/l CaCO3 | Paso1 | | |
| Ca | 11,00 | 27,50 | HCO3 | 0,12 | 0,10 | <input type="radio"/> Bruta | | |
| Mg | 0,00 | 0,00 | SO4 | 0,48 | 0,50 | <input checked="" type="radio"/> Alimentación | | |
| Na | 260,03 | 565,28 | Cl | 420,00 | 592,38 | <input type="radio"/> Permeado | | |
| K | 0,00 | 0,00 | F | 0,00 | 0,00 | <input type="radio"/> Rechazo 1 | | |
| NH4 | 0,00 | 0,00 | NO3 | 0,00 | 0,00 | <input type="radio"/> Rechazo 2 | | |
| Ba | 0,000 | 0,00 | PO4 | 0,00 | 0,00 | <input type="radio"/> Rechazo 3 | | |
| Sr | 0,000 | 0,00 | SiO2 | 0,00 | | | | |
| | | | B | 0,00 | | | | |
| Total, meq/l | | | Total, meq/l | | | | | |
| 11,86 | | | 11,86 | | | | | |
| Saturaciones | | | | | | | | |
| TDS Calculado | 692 mg/l | | CaSO4 | 0,0 % | | | | |
| Presión osmotica | 0,5 bar | | BaSO4 | 0,0 % | | | | |
| Ca3(PO4)2 SI | 0,00 | | SrSO4 | 0,0 % | | | | |
| CCPP | 0,00 mg/l | | CaF2 | 0,0 % | | | | |
| Langelier SI | -3,5 | | Silica | 0,0 % | | | | |

La unidad de OI está diseñada para trabajar con un caudal de permeado de 15m³/h. La unidad consta de un tren con 3 etapas. El pH de alimentación se ha equilibrado previamente con la adición de CO₂ para llevarlo a un nivel más básico (pH = 8) ante su paso por la unidad de OI. La temperatura de trabajo en el sistema es de 25°C, y se trabajará a un nivel de conversión del 90%. El caudal de alimentación es de 16.67 m³/h y el caudal de rechazo de 1.67 m³/h. El flujo promedio es de 28.7 l/mh.

Tabla 10. Trenes de alimentación.

| | | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|-------|---|-----------------|-------|--------------|---------|--|
| Proyecto: | Tratamiento terciario OI par | | Calculado por: | Shirley Jimenez | | Temperatura: | 25,0 °C | |
| Trenes | | | | | | | | |
| | | | Paso1 | | | Paso1 | | |
| pH alimentación | 8,00 | | Producto químico | NaOH | | | | |
| Conversión | % | 90,00 | Concentración de la solución,% | 20 | | | | |
| Caudal de permeado / tren, | m ³ /h | 15,00 | Tasa de dosificación de productos químico | mg/l | 0,000 | | | |
| Flujo promedio | lmh | 26,3 | Edad membrana | años | 3,0 | | | |
| Caudal de alimentación, | m ³ /h | 16,67 | Disminución Fluj por año | 5,00 | | | | |
| Caudal de rechazo | m ³ /h | 1,67 | Factor de ensuciamiento | 0,857 | | | | |
| | | | Incremento de paso de sales/año, % | 7,0 | | | | |

La configuración del sistema se conforma de 3 etapas, de 6 elementos, cada etapa con 6, 4 y 2 tubos de presión respectivamente, por elemento/etapa.

Tabla 11. Configuración del sistema

| Especificación del Sistema | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Etapa 1 | Etapa 2 | Etapa 3 |
| Tipo de elemento | CPA2-4040 | CPA2-4040 | CPA2-4040 |
| Elementos / tubo de presión | 6 | 6 | 6 |
| Nº de tubos de presión | 6 | 4 | 2 |

Para la etapa de UF se utilizará la membrana CPA2-4040 de *Hydranautics Nitto Group Company*, dado que presenta las características que se ajustan a las operaciones de tratamiento requerido por estas aguas. (Ver anexo 2)

Al realizar la comprobación de la configuración del sistema en IMSDesign se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12. Resultados de cálculo para la unidad de OI.

| Resultados de Cálculo | | | | | | | | | (Flows are per vessel) | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|------------|---------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|------------------------|--|
| Arreglo | Tubo de presión | Alimentación (bar) | Conc (bar) | Alimentación (m3/h) | Conc (m3/h) | Flujo (lmh) | Flujo máximo (lmh) | Beta máximo | | |
| 1-1 | 6 | 13,7 | 11,6 | 2,78 | 1,26 | 32,1 | 35,5 | 1,16 | | |
| 1-2 | 4 | 11,4 | 10,2 | 1,89 | 0,76 | 23,9 | 27,2 | 1,19 | | |
| 1-3 | 2 | 10 | 9,1 | 1,51 | 0,83 | 14,4 | 18,2 | 1,10 | | |

| Concentración de permeado | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------|-----|-------|------|-------|-----|--------|------|-------|-----|------------|
| Ca | 0,102 | K | 0,000 | Sr | 0,000 | Cl | 17,703 | PO4 | 0,000 | CO2 | 0,002 |
| Mg | 0,000 | NH4 | 0,000 | HCO3 | 0,009 | NO3 | 0,000 | SiO2 | 0,000 | CO3 | 0,000 |
| Na | 11,375 | Ba | 0,000 | SO4 | 0,005 | F | 0,000 | B | 0,000 | pH | 6,9 |
| | | | | | | | | | | TDS | 29,20 mg/l |

| Saturaciones del rechazo y parámetros | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|----------|---|------------------|-----------|-----|-------------|
| CaSO4, % | 0 | SrSO4, % | 0 | Presión osmótica | 5,2 bar | pH | 8,9 |
| BaSO4, % | 0 | SiO2, % | 0 | CCPP | 0,55 mg/l | TDS | 6689,5 mg/l |
| Ca3(PO4)2 SI | 0,00 | CaF2, % | 0 | Langelier | -0,75 | | |

El pH en el permeado disminuye considerablemente a 6.9 y los niveles de concentración en el permeado de solidos disueltos totales TDS disminuye a 29.20 mg/l.

Se observa que, en los valores de saturaciones del rechazo, hay un TDS acumulado de 6689,5 mg/l, un pH con mayor al pH inicial, de 8.9 así como la presión osmótica del sistema, de 5.2 bar.

5.12 MODELADO DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

En el diagrama de flujo del proceso de OI se compara las condiciones de entrada del agua, con un caudal de alimentación de 16,7 m³/h a una presión de 7 bar, un TDS de 692 mg/l, un pH de 8 y una conductividad de 1499 μ s/cm. Al hacer paso por las diferentes etapas del permeado, en la tabla 1 compara la calidad y características de operación a la salida del flujo, donde se obtiene un caudal de permeado de 15 m³/h, TDS de 29,2 mg/l, y una conductividad de 63,3 μ s/cm, lo que cabe destacar un considerable desempeño del sistema y aprovechamiento del agua tratada.

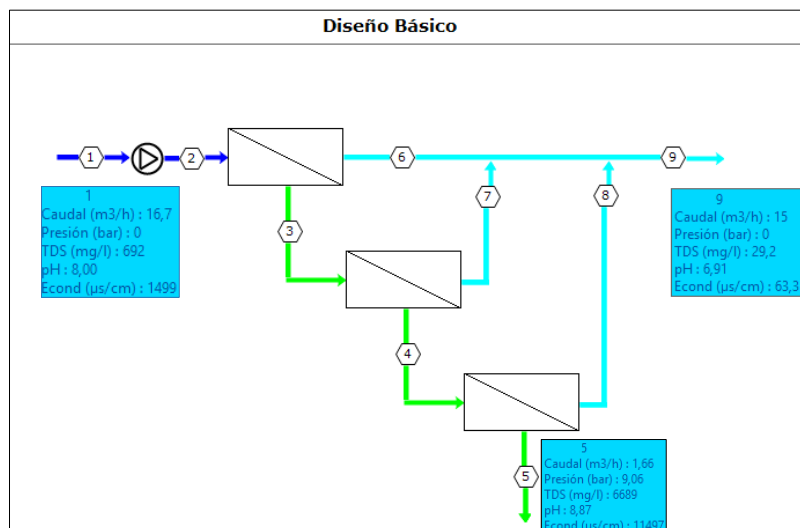


Figura 5-7. Diagrama de flujo de la unidad de Osmosis Inversa

En la tabla 12 se pueden observar los resultados de la calidad del agua de permeado de la unidad, donde a la salida nos garantiza el caudal esperado, así como un nivel de pH en condiciones de equilibrio.

Tabla 13. Comparación y evolución de las diferentes etapas del permeado en OI.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Caudal (m ³ /h) | 16,7 | 16,7 | 7,56 | 3,03 | 1,66 | 9,10 | 4,54 | 1,37 | 15,0 |
| Presión (bar) | 0 | 13,7 | 11,6 | 10,2 | 9,06 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TDS (mg/l) | 692 | 692 | 1516 | 3741 | 6689 | 7,14 | 31,1 | 169 | 29,2 |
| pH | 8,00 | 8,00 | 8,32 | 8,67 | 8,87 | 6,31 | 6,94 | 7,66 | 6,91 |
| Econd (μ s/cm) | 1499 | 1499 | 2986 | 6747 | 11497 | 15,6 | 67,4 | 367 | 63,3 |

5.13 UNIDAD DE LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS DE OI

Se recomienda una limpieza de la unidad de Ósmosis Inversa cuando muestre evidencia de ensuciamiento, antes de que llegue el momento de perderla completamente. Una señal que nos indica que ya es necesario una limpieza:

- Cuando disminuye en 10-15% en el flujo de permeado normalizado,
- Una disminución del 10-15% en la calidad del permeado normalizado,
- Un aumento del 10-15% en la caída de presión normalizada, medida entre la alimentación y concentración.

Para la limpieza de esta unidad, se propone adicionar el antiincrustante con una concentración de 40%, una dosis de 4,0 mg/l de solución. Se realiza haciendo una recirculación de la solución de limpieza por el lado de alta presión de la membrana, a baja presión. No obstante, para la frecuencia de limpieza de la unidad se debe tomar siempre en cuenta las recomendaciones del fabricante de las membranas para asegurar el correcto funcionamiento y alargar la vida de las membranas.

6 ESTUDIO ECONÓMICO

Se realizaron los cálculos de costes de inversión para ambas unidades de operación con el fin de establecer la inversión total del proyecto, su viabilidad y recuperación de la inversión en el tiempo.

6.1 COSTES DE CONSTRUCCION

Se ha realizado el cálculo estimado de la inversión de cada una de las unidades a instalar, para las instalaciones tanto de infraestructura como de equipos de las unidades de UF y OI.

6.1.1 Costes unidad de UF

Para el cálculo de la inversión de la unidad de UF, se tomó en cuenta el costo aproximado de cada componente de la unidad, así como de la infraestructura físicas donde será instalada la unidad de tratamiento y se estima que la inversión total para la unidad de UF es de 39.460,00 €.

Tabla 14. Cálculo de la inversión unidad UF

| CÁLCULO DE LA INVERSIÓN UNIDAD UF | |
|------------------------------------|--|
| REF. MODULO | HYDRAcap MAX 40 |
| Número de módulos por rack | 9,00 |
| Coste del módulo (€/módulo) | 1.800,00 € |
| Coste total TP | 16.200,00 € |
| REF. BOMBA | PENTAX CBT900 |
| Coste Bomba + Motor | 1.400 € |
| REF Compresor/Soplante | HIBON Serie S2H22 |
| Coste | 1.200,00 € |
| Coste total Bomba Compresor | 5.200,00 € |
| REF DEPOSITOS AGUA | Depósito Aéreo en PEAD Tipo Panettone 5m3 |
| Coste | 2.800,00 € |
| REF DEPOSITOS LIMPIEZA | Depósito Aéreo en PEAD Tipo Maleta 1 m3 |
| Coste | 1.260.00 € |

| | |
|--|--------------------|
| Coste depósitos | 4.060,00 € |
| Estimación coste Tuberías+ válvulas + instrumentación | 10.000,00 € |
| Estimación coste nave prefabricada 40 m2 paneles sándwich 60 mm | 4.000,00 € |
| Coste total de la unidad de UF | 39.460,00 € |

6.1.2 Cálculo de la inversión unidad de OI

Los costes para la unidad de Osmosis Inversa, Según lo estimado la inversión específica anual para los componentes de la unidad asciende a los 22.151.90 €.

Tabla 15. Cálculo de la inversión unidad OI

| CÁLCULO DE LA INVERSIÓN Y EL COSTES AGUA | | |
|---|------------------|-----------------|
| Capacidad de la planta como permeado | 15 | m3/h |
| Inversión específica | 22.151,90 | EUR/m3/h |
| Inversión | 332.278,50 | EUR |
| Vida de la planta | 15 | años |
| Vida de la membrana | 5 | años |
| Tasa de interés | 4,5 | % |
| Coste de la membrana | 500 | EUR/element |
| Facto de planta | 90 | % |
| Número de elementos | 72 | |
| Coste energético | 0,2 | EUR/kwhr |
| Coste del antiincrustante | 2,2 | EUR/kg |
| Consumo energético | 0,85 | kwhr/m3 |
| Dosificación de antiincrustante | 3 | mg/l |
| Mantenimiento (como % de inversión) | 3 | % |
| Coste de ácido | 1,5 | EUR/kg |
| Dosificación de ácido | 0 | mg/l |

6.1.3 Costes totales para equipos de unidades UF y OI

Para ambas unidades, los costos de inversión en equipamiento ascienden a una inversión de 86.860,00 €

6.2 AMORTIZACION DE LA INVERSION

La amortización de la inversión supone una inversión en el tiempo de vida del proyecto, la cual se muestra lineal por un periodo de 15 años, suponiendo una amortización anual de 9.640,48 €.

Tabla 16. Amortización de la inversión

| Amortización | |
|---|------------|
| <i>Variables Económicas de Proyecto</i> | |
| Vida del proyecto (años) | 15 |
| Tasa de interés (%) | 0,15 |
| $(1+i)^n$ | 8,13 € |
| CRF (capital recovery factor): | 5,84 € |
| Cantidad anual amortizada | 9.640,48 € |

6.3 VARIABLES ECONOMICAS

Este proyecto constara con una vida útil de 15 años, con una tasa de interés de 4.65% de la inversión, y los costes de energía, expresados en €/kWh serán analizados a partir de los resultados de consumo energético.

6.4 COSTES VARIABLES

Los costes variables de la inversión dependerán de diversos factores, ejemplo el caudal del agua a tratar, el consumo eléctrico, la adición y aumento en la demanda de productos químicos para la limpieza y el reemplazo de las membranas. Este resultado puede aumentar o disminuir considerablemente dependiendo del comportamiento de los factores antes mencionados.

Tabla 17. Componente variable del coste

| Componente variable del coste | | |
|--|-------------|--------|
| Energía | 3.195,15 € | 26% |
| Productos Químicos | 1.200,00 € | 5,70% |
| Reemplazamiento de membranas y filtros de cartucho | 1.863,00 € | 16,00% |
| Gestión de la corriente residual | 350,00 € | 1,50% |
| Subtotal componente variable del coste | 6.608,15 € | 49,00% |
| Total coste producción del agua | 29.598,62 € | 0,15 € |
| Beneficio industrial (10%) | 2.956,86 € | |
| IMPUESTOS (8%) | 2.367,89 € | |
| Total coste del agua | 34.926,40 € | 0,59 € |

6.4.1 Costes de energía

En el análisis de costes de energía anual, alcanza un total de 13.247,25 €, es comparable que la unidad de OI presenta un coste total anual de energía de 10.052,10€, lo que supone más del 75% del consumo total anual de energía por unidad. Se considera que estos costes dependerán del caudal de agua tratado, así como de otros factores como el ensuciamiento y vida de las membranas, el consumo energético de las bombas y sopladores, que son elementos determinantes en el consumo energético.

Tabla 18. Costes de Energía UF

| Costes de Energía UF | |
|--|------------|
| Consumo específico energía en UF(kWh/m ³) | 0,09 € |
| Consumo resto de planta (20% UF) | 0,02 € |
| Consumo específico total de energía en la planta (KWh/m ³) | 0,11 € |
| Volumen anual producido m ³ /año | 394.462,8 |
| Coste total anual energía | 3.195,15 € |

Tabla 19. Costes de Energía OI

| Costes de Energía OI | |
|--|-----------------------|
| Consumo específico energía en OI(kWh/m ³) | 0,85 |
| Consumo planta OI | 0,46 €/m ³ |
| Consumo específico total de energía en la planta (KWh/m ³) | 1,02 € |
| Volumen anual producido m ³ /año | 131.400 |
| Coste total anual energía | 10.052,10 € |

6.4.2 Reemplazo de membranas

Las membranas son reemplazables, pero solo cuando sea necesario. Estos reemplazos se llevarán a cabo si solo si se ha agotado la vida útil de las membranas, o resulte afectada por daños ocasionados por malas prácticas en las que sea necesario e inminente la sustitución.

Tabla 20. Reemplazo Membranas y Filtros

| Reemplazo Membranas y Filtros | |
|--|------------|
| Tasa de reemplazo (%/año) | 10,00% |
| Coste de reemplazo membranas | 1.620,00 € |
| Coste de reemplazo filtros (15%de membranas) | 243,00 € |
| Coste total anual reemplazo | 1.863,00 € |

6.4.3 Productos químicos

Los costos generados por la aplicación de productos químicos para la limpieza y mantenimiento de las membranas suponen otro gasto importante para la inversión en costes variables. A continuación, los consumos para la unidad de OI.

Tabla 21 Calculo del coste de productos químicos

| CÁLCULO DEL COSTE PRODUCTOS QUÍMICOS | Conc. solución, % | Peso específico | Coste de solución, EUR/l | Dosis, 100% base | Consumo, kg/h |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|------------------|---------------|
| SMBS | 10 | 1,1 | 0 | 0 | 0 |
| Antincrustante | 40 | 1 | 2,3 | 4 | 0,167 |
| NaOCl | 10 | 1,3 | 0 | 0 | 0 |

6.5 COSTES FIJOS

Los costes fijos de la inversión se componen por los gastos de mantenimiento, gastos de personal, amortización de la inversión, termino de potencia, entre otros. Estos serán los gastos constantes en tiempo.

Tabla 22. Costes del agua reciclada

| Costes del agua reciclada | | |
|---|--------------------|-------------|
| | €/m ³ | % del Total |
| componente fija del coste | | |
| Amortización de la inversión | 9.640,50 € | 20% |
| Personal | 12.000,00 € | 24% |
| Mantenimiento | 1.000,00 € | 5,5% |
| Término de Potencia | 150,00 € | 0,5% |
| Costes indirectos | 200,00 € | 1% |
| Subtotal componente fija del coste | 22.990,50 € | 51% |

- **Gastos de personal:** se ha realizado una estimación para el cálculo de costes de salarios para el personal de la planta. Es de saber que no son reales y pueden variar al momento de la ejecución del proyecto.

- **Termino de potencia:** El término de potencia de facturación eléctrica se considerará como un coste fijo, debido a que no depende del régimen de la planta, sino que es un coste ya previamente contratado y demandado por cada usuario a las plantas de electricidad de la zona.
- **Mantenimiento:** este coste supone el mantenimiento tanto a nivel de infraestructura de planta como de los equipos, reposición de membranas, entre otros.

6.6 COSTES DE CAPITAL

6.6.1 Costes de capital directo

Para la realización del cálculo de los costes de capital, se tomará en cuenta los costes directos del proyecto, tales como los de obra civil, el coste de los equipos y las instalaciones. Estos gastos suponen un 89% del total de la inversión de los costes para la construcción, con un valor que asciende a los **46.297,14 €**.

Tabla 23. Costes de capital directos

| Costes de capital directos (Construcción) | | | |
|--|--------------------|-------|--------------|
| Ítem | € | % | % del Total |
| Preparación del terreno | 1.127,43 € | 2,0% | |
| Entrada agua y Pretratamiento | 1.200,00 € | 9,0% | |
| Equipos para el Sistema de UF (incluye nave prefabricada para UF y OI) | 39.460,00 € | 70,0% | |
| Gestión de residuos | 1.691,14 € | 3,0% | |
| Sistemas Eléctricos | 1.691,14 € | 3,0% | |
| Puesta en marcha y pruebas de aceptación | 1.127,43 € | 2,0% | |
| Subtotal de costes directos (construcción). % del coste total | 46.297,14 € | | 89,0% |

6.6.2 Costes de capital indirectos

Los costes de capital indirecto componen un 11% del presupuesto de los costes de capital. Nótese, el coste de ingeniería del proyecto consume el 6% de la inversión.

Tabla 24 Costes de capital indirectos

| Costes de capital indirectos (Construcción) | | |
|--|--------------------|---------------|
| Costes de Ingeniería del proyecto | 3.382,29 € | 6,0% |
| Desarrollo del Proyecto | 1.691,14 € | 3,0% |
| Costes financieros del proyecto | 1.127,43 € | 2,0% |
| Subtotal costes indirectos del capital. % del coste total | 6.200,86 € | 11,0% |
| Costes totales de capital | 56.371,43 € | 100,0% |

Los costes totales de capital suman los **56.371,43 €** de la inversión. El coste del agua a producir es de **0,59€/m3**.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar con este proyecto, se ha llegado a la conclusión de que es necesario realizar un tratamiento y manejo adecuado de las aguas residuales sin importar de que proceso sean generadas, dado que todas impactan en el medioambiente y las secuelas tienen consecuencias en ocasiones, irreversibles.

Este proyecto piloto de tratamiento terciario de aguas residuales aplicando las técnicas de Ultrafiltración y Osmosis Inversa en el sector de la construcción tiene sus beneficios a largo plazo, dado que el agua que se recupera del proceso es 100% reutilizable en el proceso de producción, aparte de que se trata de un agua obtenida de calidad ultrapura que se puede bien emplear en otras actividades comerciales y agrícolas, sin impactar al medioambiente y a la salud. Del mismo modo, ayuda a alcanzar y cumplir con los objetivos de la organización, que les hace llamarse una empresa sostenible y amigable con el medio ambiente.

En cuanto a las etapas de pretratamiento, dado que el proceso de decantación que existe en la actualidad funciona de forma adecuada, el agua de alimentación se percibe en las condiciones adecuadas para hacer paso a las etapas de filtración y separación. No obstante, hay que tener en cuenta las condiciones y factores que puedan intervenir y pueda afectar las unidades de tratamiento, como son grasas, condiciones atmosféricas, aguas de arrastre, que llevan consigo elementos que puedan perjudicar el buen funcionamiento del sistema.

Para el tratamiento y equilibrio del pH, se recomienda la instalación de un medidor que pueda monitorear el estado del agua, para de este modo solo realizar las dosificaciones bajo las condiciones que así lo requiera.

En el análisis económico se pudo observar que los costes de producir 1m³ de agua oscilan entre los 0,59€, precio que se ajusta y garantiza una recuperación de la inversión en el tiempo de vida del proyecto, que se ha programado para 15 años.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tecnologías de depuración y reutilización: nuevos enfoques - Arturo Trapote-Jaume /AGUA Y TERRITORIO, NÚM. 8, pp. 48-60, JULIO-DICIEMBRE 2016, UNIVERSIDAD DE JAÉN, JAÉN, ESPAÑA ISSN 2340-8472 ISSNe 2340-7743 DOI 10.17561/at.v0i8.3295
- [2] La reutilización de aguas depuradas regeneradas a escala mundial: análisis y prospectivas. Daniel Prats-Rico Universidad de Alicante. Alicante, España/ AGUA Y TERRITORIO, NÚM. 8, pp. 10-21, JULIO-DICIEMBRE 2016, UNIVERSIDAD DE JAÉN, JAÉN, ESPAÑA ISSN 2340-8472 ISSNe 2340-7743 DOI 10.17561/at.v0i8.3292
- [6] FAO Document Repository / Wastewater treatment and use in agricultura – produced by natural resources - management and environment department - <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e05.htm#3.2.1> preliminary treatment
- [8] TRATAMIENTO DEL AGUA POR PROCESOS DE MEMBRANA Cap. 10 ULTRAFILTRACIÓN C. Anselme CIRSEE, Lyonnaise des Eaux, Francia, E. P. Jacobs, Institute for Polymer Science, Universidad de Stellenbosch, Stellenbosch, Sudáfrica
- [3] Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future Andreas N. Angelakis 1, * and Shane A. Snyder 2 1 Institute of Iraklion, National Foundation for Agricultural Research (N.AG.RE.F.), Iraklion 71307, Greece 2 Department of Chemical & Environmental Engineering, University of Arizona, 1133 E. James E. Rogers Way, Tucson, AZ 85721-0011, USA
- [5] Filtración mediante membranas para el tratamiento de aguas residuales, Condorchem Envitech, Ingeniería medioambiental para el sector industrial <http://blog.condorchem.com/membranas-tratamiento-aguas-residuales/>
- [7] State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates, A. Pérez-González, A.M. Urriaga, R. Ibáñez, I. Ortiz* Dpto. Ingeniería Química y QI. ETSIIyT, Universidad de Cantabria, Av. de los Castros s/n, 39005 Santander, Spain
- [4] Cómo tratar aguas residuales industriales, Condorchem Envitech, Ingeniería medioambiental para el sector industrial <http://blog.condorchem.com/tag/tratamiento-de-aguas-residuales/page/2/>
- [9] Comparativa de ampliación E.D.A.R. mediante reactor biológico convencional o MBR
- [10] Hydranautics by Nitto Denko Corporation <http://membranes.com/solutions/software/>
- [11] Totagua, Tecnologías de Ultrafiltración. Cap. 5 Tecnologías de depuración. <http://www.totagua.com/pdf/equipos-depuracion/ultrafiltracion.pdf>
- [12] Glynn, H.G. & Heinke, G. W. Ingeniería Ambiental. 2da Edición. Editorial Prentice-Hall. México 1999. Pag. 395-408

[13] Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano. Informes, Estudios E Investigación, 2009. Ministerio De Sanidad Y Política Social.

[14] HV CILLIT®-3100 3200 V11. 2014. Productos anti-incrustantes para equipos de ósmosis inversa en instalaciones de agua destinada a consumo humano o para usos industriales.

[15] Borhardt, John C. Crittenden ... []; con contribuciones de James H. (2012). *Tratamiento de agua de MWH: principios y diseño* (3ª ed.). Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

[16] "Filtración de arena lenta" (PDF) . Servicio Nacional de Agua Potable.
[Http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/slow_sand_filtration_dwfsom40.pdf](http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/slow_sand_filtration_dwfsom40.pdf)

[17] Borhardt, John C. Crittenden ... []; con contribuciones de James H. (2012). *Tratamiento de agua de MWH: principios y diseño* (3ª ed.). Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons.

ANEXOS

Anexo 1. Ficha técnica membrana HYDRAcap® MAX 40, Hydranautics Nitto Group Company.



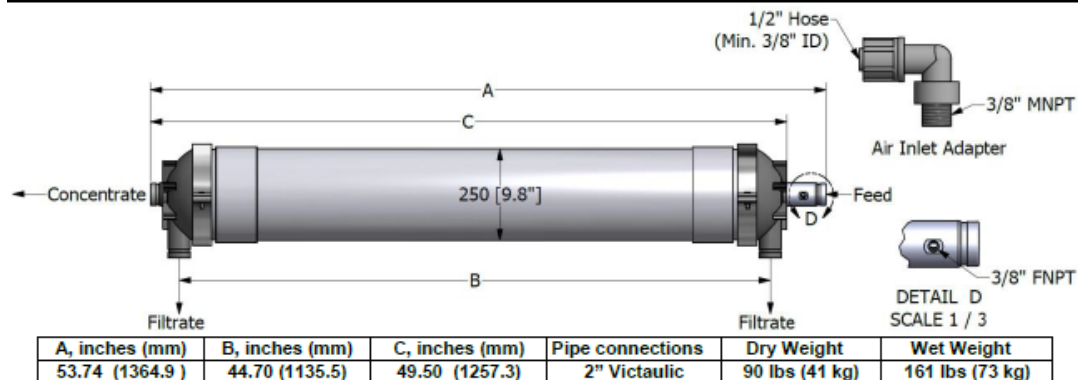
Capillary Ultrafiltration Module

HYDRAcap® MAX 40

| | | |
|-------------------------------------|---|---|
| Performance[†] | Filtrate Flow: Filtrate Turbidity: Bacteria removal: | 7.5 – 24.4 gpm (1.7 – 5.5 m ³ /h) ≤ 0.10 NTU ≥ 4 log |
| Type | Configuration: Membrane Polymer: Nominal Membrane Area: Fiber Dimensions: Pore size: | Capillary Ultrafiltration Module PVDF 560 ft ² (52 m ²) ID 0.024" (0.6 mm), OD 0.047" (1.2 mm) 0.08 micron |
| Application Data[‡] | Typical Filtrate Flux Range: Maximum Applied Feed Pressure: Maximum Transmembrane Pressure: Instantaneous Chlorine Tolerance: Maximum Chlorine Exposure: Maximum Feed Turbidity: Maximum Operating Temperature: pH Operating Range: Cleaning pH Range: Operating Mode: | 20 – 65 gfd (34 – 110 l/m ² /h) 73 psig (5.0 bar) 30 psig (2.0 bar) 5000 ppm 750,000 ppm-hrs 300 NTU 104 °F (40 °C) 4.0 – 10.0 1.0 – 13.0 Outside to Inside Filtration Dead End or Cross flow mode |

Typical Process Conditions

| | |
|------------------------------|--|
| Air Scour Rate: | 7.3 – 9.1 acfm (12.3 – 15.4 m ³ /h) |
| Air Scour Duration: | 120 – 240 seconds |
| Air Scour Frequency: | Once every 20 – 60 minutes |
| Maintenance Clean Frequency: | 1 – 3 times per day |
| Maintenance Clean Duration: | 20 – 30 minutes |
| Disinfection Chemicals: | NaOCl, ClO ₂ or NH ₂ Cl |
| Cleaning Chemicals: | NaOH, HCl, H ₂ SO ₄ or Citric Acid |



Certifications: NSF61, NSF419 (US LT2ESWTR – Public Drinking Water Compliance)

* At 68°F (20°C).

** For 60 minutes or less.

*** Higher values can be treated. Consult Hydranautics' technical staff.

[†] Typical module performance for most feedwaters.

[‡] The limitations shown here are for general use. The values may be more conservative for specific projects to ensure the best performance and longest life of the membrane.

Notice: Hydranautics also offers HYDRAcap® MAX 40-NON, which is a dummy module with no potting or fiber.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses.



4/9/15

Anexo 2. Ficha técnica de membrana CPA2-4040, Hydranautics.



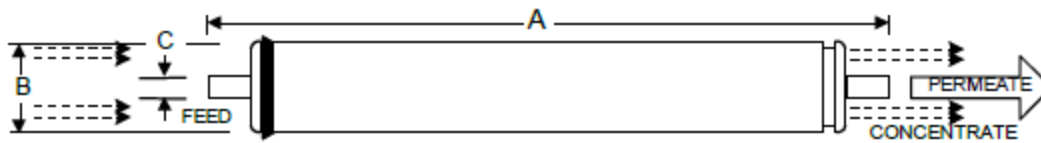
| Membrane Element | | CPA2-4040 |
|--------------------------|--|--|
| Performance: | Permeate Flow: | 2,250 gpd (8.5 m ³ /d) |
| | Salt Rejection : | 99.5% (99.2% minimum) |
| Type | Configuration: | Spiral Wound |
| | Membrane Polymer: | Composite Polyamide |
| | Membrane Active Area: | 85 ft ² (7.9 m ²) |
| Application Data* | Maximum Applied Pressure: | 600 psig (4.14 MPa) |
| | Maximum Chlorine Concentration: | < 0.1 PPM |
| | Maximum Operating Temperature: | 113 °F (45 °C) |
| | pH Range, Continuous (Cleaning): | 2-10 (1-12)* |
| | Maximum Feedwater Turbidity: | 1.0 NTU |
| | Maximum Feedwater SDI (15 mins): | 5.0 |
| | Maximum Feed Flow: | 16 GPM (3.6 m ³ /h) |
| | Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element: | 5:1 |
| | Maximum Pressure Drop for Each Element: | 15 psi |

* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

- 1500 PPM NaCl solution
- 225 psi (1.55 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 15% Permeate Recovery
- 6.5 - 7.0 pH Range



| A, inches (mm) | B, inches (mm) | C, inches (mm) | Weight, lbs. (kg) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 40.00 (1016) | 3.95 (100.3) | 0.75 (19.1) | 8 (3.6) |

Core tube extension = 1.05" (26.7 mm)

Notice: Permeate flow for individual elements may vary + 33 or - 15 percent. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution and 10% propylene glycol, and then packaged in a cardboard box.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 3/06/2015

Anexo 3: Resultados simulacion unidad de Osmosis Inversa. HYDRAcap® MAX - Software Hydranautics.



HYDRAcap MAX 40 Summary

| Project Details | |
|-----------------|---|
| Project Title | UF treatment for Industrial waste water |
| Application | UF Treatment |
| Client Name | Shirley Jimenez |
| Prepared By | shijife@posgrado.upv.es |

| 1. Feed water quality | |
|------------------------|----------------------------------|
| Source | Waste Water - Industrial (Other) |
| Minimum Temperature | 20 °C |
| Turbidity | 5 NTU |
| Total suspended solids | 13 ppm |
| Total dissolved solids | 700 ppm |
| COD | 24 ppm |
| BOD5 | 4 ppm |
| TOC | 2 ppm |
| pH | 11.39 |
| Fe | 0.02 mg/L as Fe |
| Mn | 0.02 mg/L as Mn |
| Al | 0.05 mg/L as Al |
| Alkalinity | 100 mg/L as CaCO3 |
| Ca | 200 mg/L as CaCO3 |
| Total Hardness | 800 mg/L as CaCO3 |
| LSI* | 3.622 |

* If LSI is negative, there is little to no potential for scale in the form of CaCO₃; if LSI is positive, there is potential for scale in the form of CaCO₃.

| 1 A. Expected permeate water quality | |
|--------------------------------------|-----------|
| Turbidity | < 0.2 NTU |
| TSS | < 0.5 ppm |
| SDI | 3 |

* These values are general values based on any feed water characteristics.

| 2. Main Operating Parameters | |
|--|-------------------------------------|
| Filtration time | 32 min |
| Air Scour Sequence Duration | 3.691 min |
| Design Basis | Constant Flux |
| Enhanced Solids Removal | <input type="checkbox"/> |
| Accelerated Drain | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Use of concentrate ? | <input type="checkbox"/> |
| Concentrate % | 0.00 % |
| Concentrate Bleed % | 0.00 % |
| Maintenance Clean Solution Make Up Water | Filtrate Water |
| Chemical for MC1 and RC1 | Sodium Hypochlorite |
| Chemical for MC3 and RC3 | Sulfuric Acid and Citric Acid |
| MC1 frequency | 0 #/rack/day |
| MC2 frequency | 0 #/rack/day |
| MC3 frequency | 1 #/rack/day |
| MC1 + 2 Frequency | 2 #/rack/day |
| RC1 frequency | 0.017 #/rack/day |
| RC2 frequency | 0.017 #/rack/day |
| RC3 frequency | 0.017 #/rack/day |
| MIT frequency | 0.0333 #/rack/day |

Product performance calculations are based on typical element performance when operated on a feed water of the quality shown. The results shown on the spreadsheet produced by this program are estimates of product performance. No warranty is made for product performance. Performance is also based on typical element provided in a specific membrane element. The results shown on the spreadsheet are estimates of product performance. No warranty is made for product performance. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. Or additional or extended warranties may result in different pricing than previously quoted.

| 4. Major Equipment Specification Summary | | | | |
|--|--|--------------------|-------|---------------------------------------|
| Equipment | Detail | Units | Value | Notes |
| Feed pump(s) | Number of duty pumps | | 1 | |
| | Average feed flow rate per pump | m ³ /h | 5.006 | |
| | Average feed pressure | kPa | 167.7 | |
| | Assumed average filtrate pressure | kPa | 35 | Feed pumps must be equipped with VFDs |
| | Maximum feed flow rate per pump | m ³ /h | 19.17 | |
| | Maximum feed pressure* | kPa | 293.8 | |
| | Estimated average total feed pump energy consumption | kWh/m ³ | 0.076 | |
| Air scour & Blower(s) | Number of duty blowers | | 1 | |
| | Average aeration rate per rack/blower | m ³ /h | 109.5 | |
| | Maximum aeration rate per rack/blower | m ³ /h | 136.9 | |
| | Average Air Scour Pressure | kPa | 53.06 | |
| | Maximum Air Scour Pressure | kPa | 70 | |
| | Estimated average total blower energy consumption | kWh/m ³ | 0.014 | |

*Does not include piping losses outside of rack. i.e. The piping to and from the rack. **Chemical for RCs can be poured and mixed directly into RC tank. In which case, no RC dosing pump is required.

| 5. Chemical Consumption Summary | | | |
|--|--|----------|---------------------------|
| 12% SODIUM HYPOCHLORITE | | | |
| Sodium Hypochlorite Consumption due to MC1 | | 0.000000 | L/m ³ filtrate |
| Sodium Hypochlorite Consumption due to MC1 + 2 | | 0.010637 | L/m ³ filtrate |
| Sodium Hypochlorite Consumption due to RC1 | | 0.000441 | L/m ³ filtrate |
| Total Sodium Hypochlorite Consumption | | 0.011079 | L/m ³ filtrate |
| Total Daily Sodium Hypochlorite Consumption | | 1.26 | L/day |
| Total Annual Sodium Hypochlorite Consumption | | 459.8 | L/year |
| MC1 chemical dosing pump flowrate | | 28.14 | L/h |
| 50% SODIUM HYDROXIDE | | | |
| Sodium Hydroxide Consumption due to MC2 | | 0.000000 | L/m ³ filtrate |
| Sodium Hydroxide Consumption due to MC1 + 2 | | 0.011181 | L/m ³ filtrate |
| Sodium Hydroxide Consumption due to RC2 | | 0.000271 | L/m ³ filtrate |
| Total Sodium Hydroxide Consumption | | 0.011452 | L/m ³ filtrate |
| Total Daily Sodium Hydroxide Consumption | | 1.302 | L/day |
| Total Annual Sodium Hydroxide Consumption | | 475.3 | L/year |
| MC2 chemical dosing pump flowrate | | 29.58 | L/h |
| 96% SULFURIC ACID & 50% CITRIC ACID | | | |
| Sulfuric Acid Consumption due to MC3 | | 0.002915 | L/m ³ filtrate |
| Citric Acid Consumption due to RC3 | | 0.001896 | L/m ³ filtrate |
| Total Acid Consumption | | 0.004811 | L/m ³ filtrate |
| Total Daily Acid Consumption | | 0.547 | L/day |
| Total Annual Acid Consumption | | 199.7 | L/year |
| MC3 chemical dosing pump flowrate | | 15.42 | L/h |

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of the specified quality. The results shown on the drawings produced by this program are estimates of product requirements. For accurate calculations please refer to the actual product literature. For detailed information on the actual performance of the equipment, please contact your local sales representative. The actual performance may vary in different applications. For more information, please contact your local sales representative. If a product is used in a different application, please contact your local sales representative. The actual performance may vary in different applications than previously quoted.

| 6. Auxiliary Equipment Recommendations | |
|---|-------------------------|
| RECOMMENDATION* | |
| Number of RC pumps | 1 |
| RC maximum pump flow | 18.73 m ³ /h |
| RC maximum pump pressure | 230 kPa |
| RC Tank Size | 0.874 m ³ |
| Number of Compressors/Air Receivers/Dryers | 1 |
| Compressed Air Receiver Size** | 0.032 m ³ |
| Air Volume required to do a Pressurized Drain and MIT*** | 0.15 m ³ |
| Compressor Rating**** | 1.501 m ³ /h |
| Dryer Rating***** | 10 m ³ /h |
| <p><i>*All sizes expressed in this table depend upon site requirements</i></p> <p><i>*All sizes expressed correspond to working volume capacities not including piping from tank to racks or safety factors</i></p> <p>**Assumes air in receiver is at 6 bar. Only considers volume required for air assisted chemical drain and integrity testing, which is delivered to the rack at ~1.4 bar. Does not consider requirements of any other equipment requiring compressed air for operation.</p> <p>***Assumes pressure required for the modules (no piping) and a 50% safety factor.</p> <p>****Assumes a 50% safety factor and that the air will be delivered within the first third air scour and chemical drain step.</p> <p>*****Assumes dryer is only used for pneumatic valve operations.</p> | |

| 7. Automatic Valves | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------------------|
| # Valves/ Rack | Total # of Valves | Valve Description | Pipe Velocity (m/s) | Size (mm) | Notes |
| 1 | 1 | Feed valve | ≤2.7 | 50 | Size of common filtrate pipe section |
| 1 | 1 | Filtrate valve | <2.7 | 50 | |
| 1 | 1 | Concentrate valve | ≤8.6 | 50 | |
| 0 | 0 | Concentrate return valve | | | |
| 1 | 1 | Drain valve | ≤1.2 | 50 | |
| 1 | 1 | Air scouring inlet valve | ≤0.75 kPa ΔP/30.5m of pipe | 100 | |
| 1 | 1 | Filtrate to drain valve | ≤2.7 | 50 | |
| 1 | 1 | RC feed valve | ≤2.7 | 50 | |
| 1 | 1 | Membrane integrity test valve | ≤0.7 kPa ΔP/100m of pipe | 25 | |
| 0 | 0 | Feed chlorine injection valve | | | |
| 1 | 1 | Filtrate chlorine injection valve | | | |
| 0 | 0 | Feed caustic injection valve | | | |
| 1 | 1 | Filtrate caustic injection valve | | | |
| 0 | 0 | Feed acid injection valve | | | |
| 1 | 1 | Filtrate acid injection valve | | | |
| *Top and Bottom Header size is 50 mm | | | | | |

Confidential

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. On-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted.

Confidential

Product performance calculations are based on nominal element performance when operated on a feed water of acceptable quality. The results shown on the printouts produced by this program are estimates of product performance. No guarantee of product or system performance is expressed or implied unless provided in a separate warranty statement signed by an authorized Hydranautics representative. Calculations for chemical consumption are provided for convenience and are based on various assumptions concerning water quality and composition. As the actual amount of chemical needed for pH adjustment is feedwater dependent and not membrane dependent, Hydranautics does not warrant chemical consumption. If a product or system warranty is required, please contact your Hydranautics representative. On-standard or extended warranties may result in different pricing than previously quoted.

Anexo 4: Resultados simulacion unidad de Osmosis Inversa. Software IMSDesign.

Integrated Membranes Solutions Design Software, 2017
Creado en 31/07/2017 11:19:02



Diseño Básico

Nombre del proyecto Tratamiento terciario OI para aguas residuales página : 1/5

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|------------|
| Calculado por | Shirley Jimenez | Caudal de permeado / tren | 15,00 m3/h |
| Caudal bomba alta presión | 16,67 m3/h | el flujo de agua cruda / tren | 16,67 m3/h |
| Presión de alimentación | 13,7 bar | Conversión | 90,00 % |
| Temperatura de alimentación | 25,0 °C(77,0°F) | Edad elemento | 3,0 años |
| pH agua alimentación | 8,00 | Disminución de flujo %, por año | 5,0 |
| Dosis químico,mg/l, - | None | Factor de ensuciamiento | 0,86 % |
| Energía específica | 2,30 kwh/m3 | Aumento de SP, per año | 7,0 % |
| NDP paso | 10,3 bar | Perdida de carga entre etapas | 0,2 bar |
| Flujo promedio | 26,3 l/mh | | |

| Paso - Etapa | Perm. Caudal | Tubo Alimentación | Flujo Conc | DP | Flujo | Beta | Presión por etapas | | | Perm. TDS | Elemento Tipo | Elemento Cantidad | PV# x Elem # | |
|--------------|--------------|-------------------|------------|------|-------|------|--------------------|-------|------|-----------|---------------|-------------------|--------------|--------|
| | | | | | | | Perm. | Boost | Conc | | | | | |
| 1-1 | 9,1 | 2,8 | 1,3 | 32,1 | 2,1 | 35,5 | 1,16 | 0 | 0 | 11,6 | 7,1 | CPA2-4040 | 36 | 6 x 6M |
| 1-2 | 4,5 | 1,9 | 0,8 | 23,9 | 1,2 | 27,2 | 1,19 | 0 | 0 | 10,2 | 31,1 | CPA2-4040 | 24 | 4 x 6M |
| 1-3 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 14,4 | 1 | 18,2 | 1,1 | 0 | 0 | 9,1 | 169,3 | CPA2-4040 | 12 | 2 x 6M |

| Ion (mg/l) | Agua bruta | Agua de alimentación | Permear agua | Rechazo 1 | Rechazo 2 | Rechazo 3 |
|--------------------|---------------|----------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| Dureza, como CaCO3 | 27,50 | 27,50 | 0,254 | 60,5 | 150,9 | 274,2 |
| Ca | 11,00 | 11,00 | 0,102 | 24,2 | 60,3 | 109,7 |
| Mg | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Na | 260,00 | 260,00 | 11,369 | 569,7 | 1405,4 | 2511,1 |
| K | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| NH4 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Ba | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Sr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| H | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| CO3 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| HCO3 | 0,10 | 0,10 | 0,007 | 0,2 | 0,5 | 0,9 |
| SO4 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Cl | 420,00 | 420,00 | 17,698 | 920,5 | 2271,8 | 4062,4 |
| F | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| NO3 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| PO4 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| OH | 0,00 | 0,00 | 0,001 | 0,0 | 0,1 | 0,1 |
| SiO2 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| B | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| CO2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| TDS | 691,10 | 691,10 | 29,18 | 1514,66 | 3738,21 | 6684,26 |
| pH | 8,00 | 8,00 | 6,91 | 8,32 | 8,67 | 8,87 |

| Saturaciones | Agua bruta | Agua de alimentación | Rechazo | Límites |
|----------------------------------|------------|----------------------|---------|---------|
| CaSO4 / ksp * 100, % | 0 | 0 | 0 | 400 |
| SrSO4 / ksp * 100, % | 0 | 0 | 0 | 1200 |
| BaSO4 / ksp * 100, % | 0 | 0 | 0 | 10000 |
| Saturación de SiO2, % | 0 | 0 | 0 | 140 |
| CaF2 / ksp * 100, % | 0 | 0 | 0 | 50000 |
| Índice de saturación Ca3 (PO4) 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,4 |
| CCPP, mg/l | 0,00 | 0,00 | 0,54 | |
| Índice de saturación Langelier | -3,53 | -3,53 | -0,83 | 2,5 |
| Fuerza ionica | 0,01 | 0,01 | 0,12 | |
| Presión osmotica, bar | 0,5 | 0,5 | 5,2 | |

Diseño Básico

Nombre del proyecto Tratamiento terciario OI para aguas residuales página : 1/5

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|------------|
| Calculado por | Shirley Jimenez | Caudal de permeado / tren | 15,00 m3/h |
| Caudal bomba alta presión | 16,67 m3/h | el flujo de agua cruda / tren | 16,67 m3/h |
| Presión de alimentación | 13,7 bar | Conversión | 90,00 % |
| Temperatura de alimentación | 25,0 °C(77,0°F) | Edad elemento | 3,0 años |
| pH agua alimentación | 8,00 | Disminución de flujo %, por año | 5,0 |
| Dosis químico,mg/l, - | None | Factor de ensuciamiento | 0,86 % |
| Energía específica | 2,30 kwh/m3 | Aumento de SP, per año | 7,0 % |
| NDP paso | 10,3 bar | Perdida de carga entre etapas | 0,2 bar |
| Flujo promedio | 26,3 l/mh | | |

| | | | | | | | | | | | | Tipo de alimentación | | | | Agua residual MF/UF | |
|--------|----------|---------------|---------|-------|-------|---------------|--------------------|-------|------------------------------|-------|----------|----------------------|--------------|--------|--|---------------------|--|
| Paso - | Perm. | Caudal / Tubo | Flujo | DP | Flujo | Beta | Presión por etapas | | | Perm. | Elemento | Elemento | PV# x Elem # | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Max | | | |
| Etapa | Caudal | Alimentación | Conc | | | | Perm. | Boost | Conc | TDS | Tipo | | Cantidad | | | | |
| | m3/h | m3/h | m3/h | l/mh | bar | l/mh | bar | bar | bar | mg/l | | | | | | | |
| 1-1 | 9,1 | 2,8 | 1,3 | 32,1 | 2,1 | 35,5 | 1,16 | 0 | 0 | 11,6 | 7,1 | CPA2-4040 | 36 | 6 x 6M | | | |
| 1-2 | 4,5 | 1,9 | 0,8 | 23,9 | 1,2 | 27,2 | 1,19 | 0 | 0 | 10,2 | 31,1 | CPA2-4040 | 24 | 4 x 6M | | | |
| 1-3 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 14,4 | 1 | 18,2 | 1,1 | 0 | 0 | 9,1 | 169,3 | CPA2-4040 | 12 | 2 x 6M | | | |
| Paso - | Elemento | Alimentación | Presión | Conc | NDP | Permeaar agua | Permeaar agua | Beta | Permeado (Acumulado de paso) | | | | | | | | |
| Etapa | no. | Presión | Caída | Osmo. | | Caudal | Flujo | | TDS | Ca | Mg | Na | Cl | | | | |
| | | bar | bar | bar | bar | m3/h | l/mh | | | | | | | | | | |
| 1-1 | 1 | 13,7 | 0,51 | 0,6 | 12,9 | 0,3 | 35,5 | 1,1 | 4,2 | 0,015 | 0 | 1,645 | 2,559 | | | | |
| 1-1 | 2 | 13,2 | 0,44 | 0,7 | 12,3 | 0,3 | 34 | 1,11 | 4,6 | 0,016 | 0 | 1,803 | 2,804 | | | | |
| 1-1 | 3 | 12,7 | 0,37 | 0,8 | 11,8 | 0,3 | 32,4 | 1,12 | 5,1 | 0,018 | 0 | 1,985 | 3,087 | | | | |
| 1-1 | 4 | 12,4 | 0,31 | 0,9 | 11,4 | 0,2 | 31,2 | 1,13 | 5,6 | 0,019 | 0 | 2,199 | 3,421 | | | | |
| 1-1 | 5 | 12 | 0,26 | 1 | 11 | 0,2 | 30 | 1,14 | 6,3 | 0,022 | 0 | 2,458 | 3,824 | | | | |
| 1-1 | 6 | 11,8 | 0,21 | 1,2 | 10,6 | 0,2 | 29 | 1,16 | 7,1 | 0,025 | 0 | 2,781 | 4,326 | | | | |
| 1-2 | 1 | 11,4 | 0,3 | 1,3 | 10 | 0,2 | 27,2 | 1,11 | 7,8 | 0,027 | 0 | 3,06 | 4,76 | | | | |
| 1-2 | 2 | 11,1 | 0,25 | 1,5 | 9,5 | 0,2 | 26 | 1,12 | 8,7 | 0,03 | 0 | 3,396 | 5,284 | | | | |
| 1-2 | 3 | 10,8 | 0,21 | 1,8 | 9,1 | 0,2 | 24,6 | 1,14 | 9,8 | 0,034 | 0 | 3,809 | 5,926 | | | | |
| 1-2 | 4 | 10,6 | 0,17 | 2 | 8,7 | 0,2 | 23,4 | 1,15 | 11,1 | 0,038 | 0 | 4,327 | 6,733 | | | | |
| 1-2 | 5 | 10,5 | 0,13 | 2,4 | 8,2 | 0,2 | 22,1 | 1,17 | 12,8 | 0,044 | 0 | 4,996 | 7,774 | | | | |
| 1-2 | 6 | 10,3 | 0,1 | 2,9 | 7,6 | 0,2 | 20,4 | 1,19 | 15,1 | 0,052 | 0 | 5,887 | 9,161 | | | | |
| 1-3 | 1 | 10 | 0,22 | 3,2 | 6,8 | 0,1 | 18,2 | 1,09 | 16,6 | 0,058 | 0 | 6,479 | 10,083 | | | | |
| 1-3 | 2 | 9,8 | 0,19 | 3,6 | 6,3 | 0,1 | 16,6 | 1,1 | 18,4 | 0,064 | 0 | 7,179 | 11,172 | | | | |
| 1-3 | 3 | 9,6 | 0,16 | 3,9 | 5,8 | 0,1 | 15,3 | 1,1 | 20,5 | 0,071 | 0 | 8,008 | 12,464 | | | | |
| 1-3 | 4 | 9,4 | 0,14 | 4,3 | 5,2 | 0,1 | 13,8 | 1,1 | 23,1 | 0,08 | 0 | 8,994 | 13,999 | | | | |
| 1-3 | 5 | 9,3 | 0,12 | 4,8 | 4,7 | 0,1 | 12,2 | 1,09 | 26 | 0,09 | 0 | 10,123 | 15,757 | | | | |
| 1-3 | 6 | 9,2 | 0,11 | 5,2 | 4,1 | 0,1 | 10,7 | 1,09 | 29,2 | 0,102 | 0 | 11,362 | 17,688 | | | | |

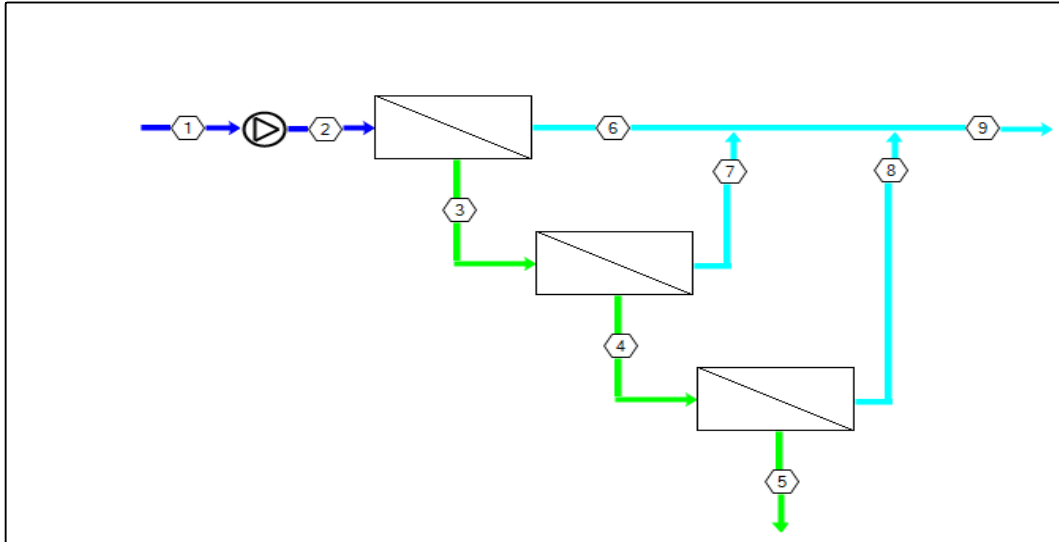
Diseño Básico

Nombre del proyecto Tratamiento terciario OI para aguas residuales

página : 1/5

Temperatura : 25,0 °C

Edad elemento, P1 : 3,0 años



| Corriente n ° | Caudal (m3/h) | Presión (bar) | TDS (mg/l) | pH | Econd (µs/cm) |
|---------------|---------------|---------------|------------|------|---------------|
| 1 | 16,7 | 0 | 691 | 8,00 | 1498 |
| 2 | 16,7 | 13,7 | 691 | 8,00 | 1498 |
| 3 | 7,56 | 11,6 | 1515 | 8,32 | 2985 |
| 4 | 3,03 | 10,2 | 3738 | 8,67 | 6743 |
| 5 | 1,66 | 9,06 | 6684 | 8,87 | 11491 |
| 6 | 9,10 | 0 | 7,13 | 6,31 | 15,6 |
| 7 | 4,54 | 0 | 31,1 | 6,94 | 67,4 |
| 8 | 1,37 | 0 | 169 | 7,66 | 367 |
| 9 | 15,0 | 0 | 29,2 | 6,91 | 63,2 |

Diseño Básico

Nombre del proyecto Tratamiento terciario OI para aguas residuales página : 1/5

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|------------|
| Calculado por | Shirley Jimenez | Caudal de permeado / tren | 15,00 m3/h |
| Caudal bomba alta presión | 16,67 m3/h | el flujo de agua cruda / tren | 16,67 m3/h |
| Presión de alimentación | 13,7 bar | Conversión | 90,00 % |
| Temperatura de alimentación | 25,0 °C(77,0°F) | Edad elemento | 3,0 años |
| pH agua alimentación | 8,00 | Disminución de flujo %, por año | 5,0 |
| Dosis químico,mg/l, - | None | Factor de ensuciamiento | 0,86 % |
| Energía específica | 0,54 kwh/m3 | Aumento de SP, per año | 7,0 % |
| NDP paso | 10,3 bar | Perdida de carga entre etapas | 0,2 bar |
| Flujo promedio | 26,3 l/mh | | |

Tipo de alimentación Agua residual MF/UF

| Paso - Etapa | Perm. Caudal | Perm. Alimentación | Tubo Conc | Flujo l/mh | DP bar | Flujo Max l/mh | Beta | Presión por etapas Perm. bar | Boost bar | Conc bar | Perm. TDS mg/l | Elemento Tipo | Elemento Cantidad | PV# x Elem # |
|--------------|--------------|--------------------|-----------|------------|--------|----------------|------|------------------------------|-----------|----------|----------------|---------------|-------------------|--------------|
| 1-1 | 9,1 | 2,8 | 1,3 | 32,1 | 2,1 | 35,5 | 1,16 | 0 | 0 | 11,6 | 7,1 | CPA2-4040 | 36 | 6 x 6M |
| 1-2 | 4,5 | 1,9 | 0,8 | 23,9 | 1,2 | 27,2 | 1,19 | 0 | 0 | 10,2 | 31,1 | CPA2-4040 | 24 | 4 x 6M |
| 1-3 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 14,4 | 1 | 18,2 | 1,1 | 0 | 0 | 9,1 | 169,3 | CPA2-4040 | 12 | 2 x 6M |

Cálculo de energía requerida

| | Paso1 | Potencia total del sistema |
|-----------------------------------|-------|----------------------------|
| Presión de la bomba / Boost, bar | 13,7 | |
| Caudal producto, m3/h | 15,0 | 15 |
| Caudal de la bomba, m3/h | 16,7 | |
| Eficiencia de la bomba, % | 90,0 | |
| Eficiencia del motor, % | 90,0 | |
| Eficiencia variador frecuencia, % | 95,0 | |
| Bombeo de energía, BHP | 10,8 | |
| Bombeo de energía, kw | 8,1 | 8,1 |
| Energía de bombeo, kwh/m3 | | 0,54 |

Anexo 5. Calculo del coste económico unidad de OI.

Integrated Membranes Solutions Design Software, 2017
Creado en 31/07/2017 11:19:02



Diseño Básico

Nombre del proyecto: Tratamiento terciario OI para aguas residuales página : 1/5

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|------------|
| Calculado por | Shirley Jimenez | Caudal de permeado / tren | 15,00 m3/h |
| Caudal bomba alta presión | 16,67 m3/h | el flujo de agua cruda / tren | 16,67 m3/h |
| Presión de alimentación | 13,7 bar | Conversión | 90,00 % |
| Temperatura de alimentación | 25,0 °C(77,0°F) | Edad elemento | 3,0 años |
| pH agua alimentación | 8,00 | Disminución de flujo %, por año | 5,0 |
| Dosis químico,mg/l, - | None | Factor de ensuciamiento | 0,86 % |
| Energía específica | 0,54 kwh/m3 | Aumento de SP, per año | 7,0 % |
| NDP paso | 10,3 bar | Perdida de carga entre etapas | 0,2 bar |
| Flujo promedio | 26,3 l/mh | | |

| | | Tipo de alimentación | | | | Agua residual MF/UF | | | | | | | | |
|--------------|--------------|----------------------|----------|------------|-----------|--------------------------|-------|------|-----------|---------------|-------------------|--------------|----|--------|
| Paso - Etapa | Perm. Caudal | Flujo Alimentación | Flujo DP | Flujo Beta | Flujo Max | Presión por etapas Perm. | Boost | Conc | Perm. TDS | Elemento Tipo | Elemento Cantidad | PV# x Elem # | | |
| | m3/h | m3/h | lmh | bar | lmh | bar | bar | bar | mg/l | | | | | |
| 1-1 | 9,1 | 2,8 | 1,3 | 32,1 | 2,1 | 35,5 | 1,16 | 0 | 0 | 11,6 | 7,1 | CPA2-4040 | 36 | 6 x 6M |
| 1-2 | 4,5 | 1,9 | 0,8 | 23,9 | 1,2 | 27,2 | 1,19 | 0 | 0 | 10,2 | 31,1 | CPA2-4040 | 24 | 4 x 6M |
| 1-3 | 1,4 | 1,5 | 0,8 | 14,4 | 1 | 18,2 | 1,1 | 0 | 0 | 9,1 | 169,3 | CPA2-4040 | 12 | 2 x 6M |

CÁLCULO DE LA INVERSIÓN Y EL COSTES AGUA

| | |
|--------------------------------------|--------------------|
| Capacidad de la planta como permeado | 15,00 m3/h |
| Inversión específica | 22.151,90 EUR/m3/h |
| Inversión | 332.278,50 EUR |
| Vida de la planta | 15,0 años |
| Vida de la membrana | 5,0 años |
| Tasa de interes | 4,5 % |
| Coste de la membrana | 500,00 EUR/element |
| Facto de planta | 90,0 % |
| Número de elementos | 72,0 |
| Coste energético | 0,200 EUR/kwhr |
| Coste del antincrustante | 2,20 EUR/kg |
| Consumo energético | 0,85 kwhr/m3 |
| Dosificación de antincrustante | 3,0 mg/l |
| Mantenimiento (como % de inversión) | 3,0 % |
| Coste de ácido | 1,50 EUR/kg |
| Dosificación de ácido | 0,0 mg/l |

Los resultados de cálculo

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Coste de capital | 0,17 EUR/m3 |
| Coste energético | 0,17 EUR/m3 |
| Coste productos químicos | 0,01 EUR/m3 |
| Costes de remplazo de membrana | 0,06 EUR/m3 |
| Mantenimiento | 0,08 EUR/m3 |
| Coste total de agua | 0,50 EUR/m3 |