



**industriales**  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## **Eliminación de sólidos en suspensión en corrientes de aguas residuales industriales**

**TRABAJO FIN DE MASTER**

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y PROCESOS  
SOSTENIBLES

**Autor: Carmen De Santiago Pérez**

**Director: José Manuel Moreno Angosto**



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Cartagena, 23 de junio de 2020



# Resumen

Las aguas residuales pueden contener tanto partículas en suspensión como compuestos solubilizados. Garantizar una determinada presencia de sólidos en las aguas residuales industriales supone un reto tanto como límite de vertido – ya sea a cauce público, alcantarillado o al mar – como para la reutilización del agua. Por este motivo, los procesos de retención de sólidos son una operación clave en materia de sostenibilidad y medio ambiente. El trabajo pretende abordar el estudio de los problemas que presentan los sólidos en suspensión en corrientes de aguas residuales industriales y las soluciones presentes en la actualidad con las mejores técnicas disponibles hasta el momento. En este trabajo se evalúan diferentes alternativas y se proponen soluciones viables para la industria.



# Abstract

Wastewater can contain both suspended solids and solubilized compounds. Ensuring a certain presence of solids in industrial wastewater is a challenge both as a discharge limit - whether into a public channel, sewerage or the sea - and for the reuse of water. For this reason, solids retention processes are a key operation in terms of sustainability and environment. The project aims to approach the study of the problems that suspended solids present in industrial wastewater streams and study different possibilities with the best techniques available so far. In this project, different alternatives are evaluated and feasible solutions for the industry are proposed.



# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>11</b>
1.1	Reutilización del agua.....	11
1.1.1	Efectos del calentamiento global sobre el ciclo del agua .....	13
1.1.2	Objetivos de la reutilización del agua .....	14
1.2	Legislación sobre reutilización de agua.....	15
1.3	Reutilización de agua en entornos industriales .....	15
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
2.1	Motivación.....	19
<b>3</b>	<b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>21</b>
3.1	Propiedades del agua en la industria .....	21
3.2	Métodos para eliminar contaminantes del agua .....	21
3.3	Tipos de sólidos .....	23
3.4	Impacto de los sólidos en el medio hídrico .....	25
<b>4</b>	<b>TÉCNICAS PARA LA ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS</b> .....	<b>27</b>
4.1	Decantación .....	27
4.1.1	Tipos de sedimentación .....	28
4.2	Coagulación-Floculación.....	29
4.3	Precipitación.....	30
4.4	Flotación .....	31
4.5	Filtración y separación por membranas.....	32
4.5.1	Configuración de las membranas.....	34
4.5.2	Limpieza de membranas .....	38
4.5.3	Microfiltración y ultrafiltración .....	39
4.5.4	Ósmosis inversa y nanofiltración .....	41
4.5.5	Comparación de los procesos de membranas .....	41
4.5.6	Parámetros de proceso en los sistemas de filtración por membranas .....	43

4.5.7	Problemas de las membranas .....	46
4.5.8	Tipos de ensuciamiento de membranas .....	47
4.6	Adsorción .....	47
4.7	Combinación de técnicas para la eliminación de sólidos .....	48
<b>5</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....</b>	<b>49</b>
5.1	Condiciones de proceso.....	49
5.2	Configuración de la planta de reutilización .....	52
5.3	Diseño del tanque de coagulación .....	54
5.4	Diseño del tanque de floculación .....	55
5.5	Diseño del tanque de sedimentación .....	56
5.6	Diseño de la sección de filtración y purificación .....	58
5.6.1	Características de los módulos de microfiltración .....	60
5.7	Diseño de la sección de tratamiento de fangos .....	61
5.7.1	Espesador de fangos .....	62
5.7.2	Estabilización del fango .....	64
5.7.3	Deshidratación de fangos.....	64
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>



## Índice de figuras

Figura 1. Calidad requerida de las aguas reutilizadas según sus usos .....	12
Figura 2. El ciclo del agua .....	14
Figura 3. Balance de agua inicial .....	16
Figura 4. Balance de agua con una planta de reutilización.....	17
Figura 5. Región de distintas técnicas para el tratamiento del agua residual .....	23
Figura 6. Esquema de los tipos de sólidos en el agua .....	24
Figura 7. Tipos de sedimentación en el agua residual .....	28
Figura 8. Filtración convencional y filtración por membranas.....	32
Figura 9. Modo de filtración tangencial .....	33
Figura 10. Procesos de filtración y sus aplicaciones .....	33
Figura 11. Esquema de membrana de placas y marcos .....	35
Figura 12. Módulo de membrana en espiral.....	35
Figura 13. Módulo tubular .....	36
Figura 14. Esquema de uno de los tubos .....	36
Figura 15. Membrana de fibra hueca.....	37
Figura 16. Flujo a través de una membrana de microfiltración.....	40
Figura 17. Bastidores para membranas de microfiltración.....	41
Figura 18. Descripción del proceso .....	42
Figura 19. Tipos de ensuciamiento de membranas .....	47
Figura 20. Configuración de la planta de reutilización de agua.....	53
Figura 21. Potencia necesaria para la agitación en tanques.....	55
Figura 22. Representación de la distribución de tamaños de partícula .....	59



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El agua dulce es uno de los recursos más importantes y preocupantes para el ser humano. El agua, como recurso necesario para la vida, necesita un tratamiento adecuado a lo largo de todo su ciclo si queremos evitar romper la armonía entre los ecosistemas naturales y la vida. En consecuencia, es imprescindible luchar por devolverle al agua el equilibrio necesario para tratar de acercarla a su ciclo natural después de haber sido manipulada.

## 1.1 Reutilización del agua

La reutilización de aguas residuales urbanas ha ido aumentando de manera notable en los últimos años. A día de hoy, el agua reutilizada es considerada un recurso hídrico alternativo al agua dulce de primer uso. El agua reutilizada se suele emplear en aplicaciones cuya calidad del agua es más permisiva y, de ese modo, libera el consumo de agua de primer uso para aplicaciones prioritarias. La aplicación prioritaria con mayor consumo es el suministro de agua potable y requiere una calidad más elevada.

La reutilización del agua consiste en adecuar las características de un agua residual para que pueda ser de nuevo empleada, con la misma o distinta función, con el objetivo de reducir el consumo de agua dulce. Los procesos elegidos para devolver a un agua residual las características necesarias para poder ser de nuevo funcional, dependerán de la correspondiente autorización de vertido y de la calidad del agua requerida en función de los usos a que se va a destinar.<sup>1</sup>

A continuación, se describen algunos destinos de las aguas reutilizadas:

- Regadío: cultivos, parques, jardines.
- Reutilización industrial: refrigeración, agua de planta, agua de limpieza, generación de vapor.
- Usos urbanos no necesariamente potables: parques, sistemas contra incendios, refrigeración, riego de zonas urbanas, etc.

Se conoce como sistema de reutilización de agua a aquel conjunto de instalaciones que incluye una estación para regenerar el agua y la infraestructura necesaria para almacenar y distribuir

---

<sup>1</sup> Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Ministerio de la Presidencia «BOE» núm. 294, de 8 de diciembre de 2007 Referencia: BOE-A-2007-21092.

el agua regenerada hasta los consumidores, con la calidad requerida según los usos a los que se destine.

En función del destino del agua reutilizada y del tipo de tratamiento final al que se haya sometido, se podrán utilizar sistemas adicionales o complementarios de depuración y/o desinfección, si es necesario. En la mayor parte de los casos se utilizan tratamientos terciarios de afino.

La reutilización del agua está prohibida para determinados usos, tales como: el consumo humano – salvo situaciones de catástrofe en las que se autorice su uso -, para usos de la industria alimentaria, para uso en hospitales o centros médicos, para cultivo de moluscos en acuicultura, para el uso recreativo como agua de baño y para cualquier otro uso que sea catalogado como perjudicial para la salud de las personas por parte de la autoridad sanitaria o ambiental competente. <sup>2</sup>

En relación a la reutilización de agua en el entorno industrial, también aplican criterios de calidad del agua en función de su uso.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
<b>3.- USOS INDUSTRIALES</b>					
CALIDAD 3.1 <sup>1</sup> a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. b) Otros usos industriales.	No se fija limite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	15 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L
c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	1 huevo/10 L	1.000 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases <sup>2</sup> con los siguientes valores: n=10 m =1.000 UFC/100 mL M=10.000 UFC/100 mL c=3	35 mg/L	No se fija limite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> :100 UFC/L Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia ( <i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000
CALIDAD 3.2 a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	1 huevo/10 L	Ausencia UFC/100 mL	5 mg/L	1 UNT	<i>Legionella spp.</i> : Ausencia UFC/L Para su autorización se requerirá: – La aprobación, por la autoridad sanitaria, del Programa específico de control de las instalaciones contemplado en el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. – Uso exclusivamente industrial y en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.

Figura 1. Calidad requerida de las aguas reutilizadas según sus usos <sup>3</sup>

<sup>2</sup> Op cit., BOE-A-2007-21092.

<sup>3</sup> Op cit., BOE-A-2007-21092.

El objetivo de los equipos de tratamiento y los procesos de depuración será reducir la carga contaminante hasta valores admisibles según el destino del agua y los procesos y equipos por los que necesite pasar.

En España existen más de 2000 EDARs. El 27% de ellas cuentan con tratamientos terciarios que permiten la reutilización del agua en aplicaciones muy numerosas. Actualmente, las cifras muestran que se reutilizan más de 400 hectómetros cúbicos al año, entre el 7 y el 13% del agua residual tratada.

El nivel de reutilización de agua varía a lo largo de la geografía española. La carencia de recursos hídricos en zonas como la Comunidad Valenciana y Murcia hace que la reutilización sea mayor en estas regiones. El 90% del total de agua reutilizada en España se concentra en las áreas más áridas - Murcia, la Comunidad Valenciana, Andalucía, Islas Canarias, Islas Baleares - y grandes ciudades como Madrid o Barcelona.

Valencia es la comunidad que registra las cifras de reutilización de agua más elevadas (158 hm<sup>3</sup> en 2015) y Murcia es la que lo hace en un mayor porcentaje. La suma del agua reutilizada en Valencia y en Murcia supone más de la mitad del agua procedente de un proceso de regeneración que se usa para riego en toda España, que la principal aplicación del agua regenerada.<sup>4</sup>

### **1.1.1 Efectos del calentamiento global sobre el ciclo del agua**

El aumento de la temperatura media en el planeta también afecta al comportamiento del agua en su ciclo natural. A continuación se describen algunos de los escenarios que se manifiestan derivados de este aumento de temperatura:

- Aumento de la evaporación debido a la mayor temperatura en la superficie terrestre.
- Desequilibra el régimen de precipitaciones.
- Tormentas/lluvias torrenciales más intensas y frecuentes. El aumento de la intensidad de estos fenómenos se debe a la mayor energía que tienen las masas de aire caliente.
- Reduce los hielos perennes o nieve periódica.
- Intrusismo del agua de mar en acuíferos (aumento nivel del mar).

---

<sup>4</sup> AEDyR, ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE DESALACIÓN Y REUTILIZACIÓN. Cifras de reutilización de agua en España, Mayo 2019. Disponible en: <<https://www.aedyr.com/es/blog/cifras-reutilizacion-agua-espana>>



Figura 2. El ciclo del agua <sup>5</sup>

### 1.1.2 Objetivos de la reutilización del agua

- Balancear la oferta y la demanda del agua tanto a tiempo presente como a futuro a través de un aprovechamiento equilibrado, equitativo y sostenible para todas las partes.
- Optimizar los recursos hídricos y su gestión, ayudando a aquellas áreas más áridas en las que el agua es escasa, asegurando la calidad del agua para las aplicaciones prioritarias y economizando sus usos. <sup>6</sup>
- Reducir la huella hídrica y equilibrar un consumo en armonía con el medio ambiente y el resto de recursos naturales.

<sup>5</sup> U.S. Geological Survey, The Water Cycle. Disponible en: < [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects) >

<sup>6</sup> Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. Jefatura del Estado «BOE» núm. 161, de 6 de julio de 2001 Referencia: BOE-A-2001-13042.

## **1.2 Legislación sobre reutilización de agua**

Las Administraciones Públicas estatal, autonómica o local, dentro de sus respectivas competencias, podrán llevar a cabo planes y programas de reutilización de aguas. En estos documentos se recogerán y se describirán las infraestructuras y medios requeridos para reutilizar los recursos hídricos. También se especificarán el análisis económico-financiero realizado y el sistema de tarifas que corresponda aplicar en cada situación.<sup>7</sup>

La reutilización de las aguas procedentes de un aprovechamiento requerirá concesión administrativa tal como establecen los artículos 59.1 y 109 del texto refundido Ley de Aguas.

El Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, es el que establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En este Real Decreto se pronuncia imprescindible la reutilización del agua.

La autorización para reutilizar aguas residuales requiere ser otorgada por el organismo correspondiente (la Consejería de Medio Ambiente y la Confederación Hidrográfica) y atenerse a lo establecido en el Decreto 1620/2007 sobre régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas.

## **1.3 Reutilización de agua en entornos industriales**

En la industria se generan grandes cantidades de aguas residuales de composición muy variada.

En las industrias químicas, el intercambio de calor es imprescindible para garantizar los procesos de transformación química. Las propiedades del agua hacen que su empleo sea fundamental en los procesos de intercambio de calor, tanto para calentar como para refrigerar. Por este motivo, la industria química consume cantidades de agua cada día.

En una planta química, el agua se emplea principalmente para los siguientes usos:

- Agua de refrigeración (gran parte del agua consumida se evapora en las torres de refrigeración y no se reutiliza).
- Agua a calderas para la producción de vapor y/o electricidad (cogeneración).
- Agua contraincendios.
- Agua de planta.
- Agua de proceso.
- Agua potable/sanitaria.

---

<sup>7</sup> *Op cit.*, BOE-A-2007-21092.

- Agua desmineralizada.

La temperatura de las aguas residuales dependerá del tipo de procesos empleados (balance entre purgas frías y calientes), así como de la cantidad de agua tratada en las torres de refrigeración, ya que gran parte del aporte de agua se evapora.

Asimismo, la reutilización de las aguas residuales en una industria química tiene dos objetivos principales:

- Minimizar el caudal de vertido y la carga contaminante para reducir el impacto sobre el medio ambiente y la huella hídrica.
- Reducir el consumo neto agua al poder reutilizar parte del agua consumida, ahorrando costes del consumo de agua del complejo industrial.

Considerando que la evaporación en las torres de refrigeración es del 50% del consumo neto de agua del complejo industrial, una aproximación al balance general sería:

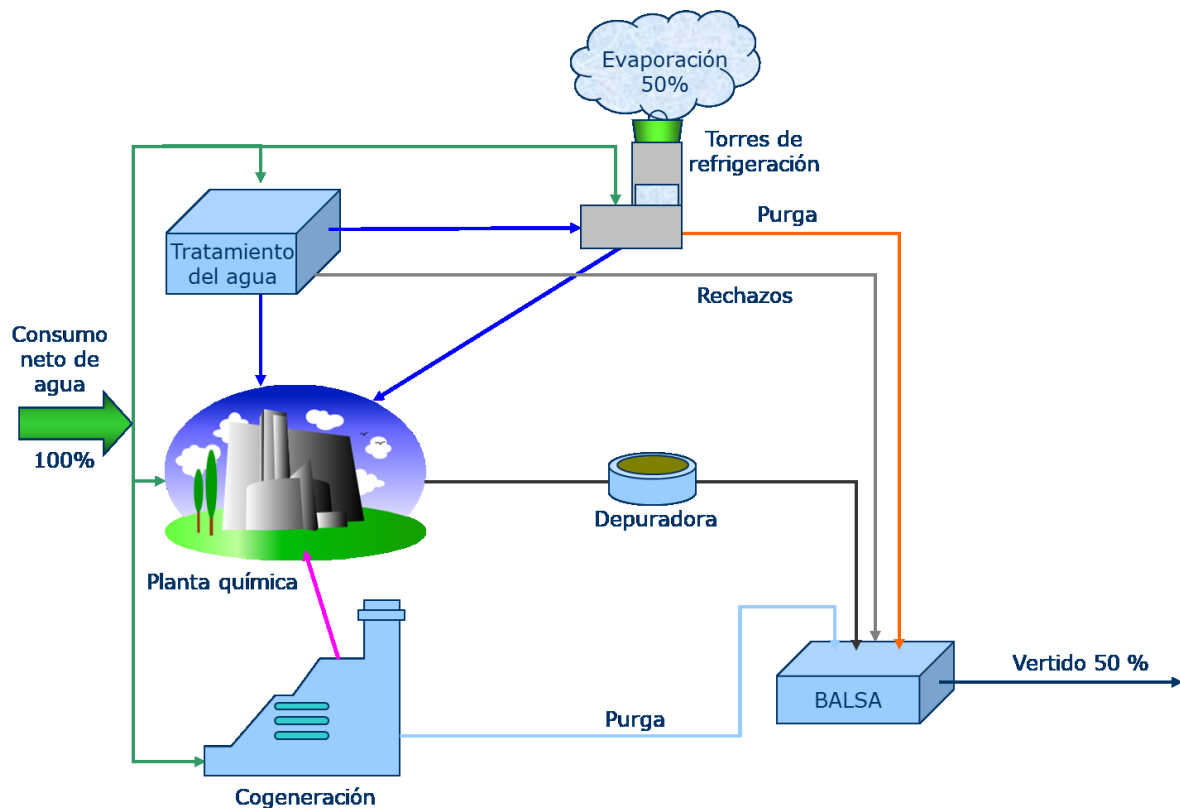


Figura 3. Balance de agua inicial

Si se dispone de una planta de reutilización de agua que sea capaz de tratar ese 50% que se vierte, la recuperación de agua se puede elevar aproximadamente hasta un 40% del consumo neto de agua en el complejo electricidad (considerando una recuperación del 80% del volumen del agua reutilizable, es decir, un rechazo del 20% del agua enviada a la planta de reutilización). Finalmente, el vertido final puede quedar reducido de un 50% a un 10% del



caudal total demandado por el complejo industrial. Y, en consecuencia, el consumo neto de agua en el complejo también se verá reducido, reduciendo también los costes relativos al consumo de agua bruta.

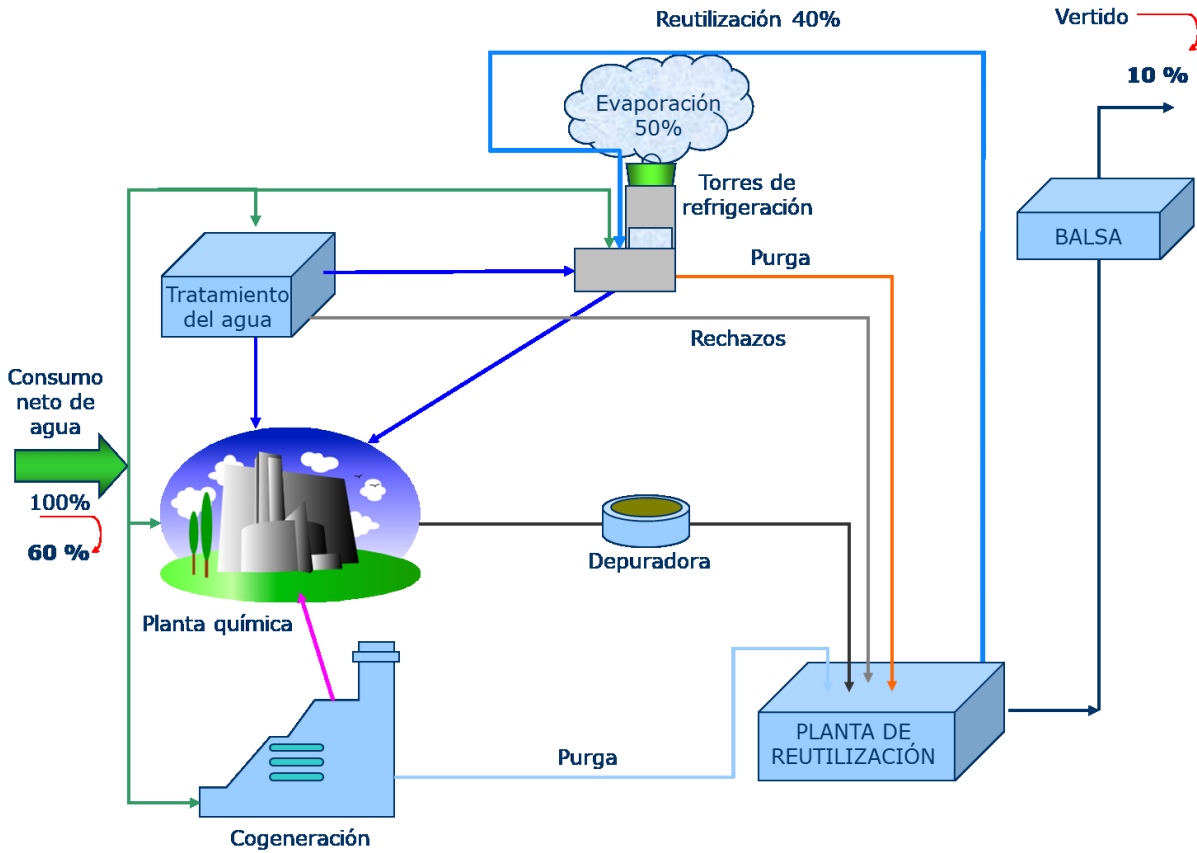


Figura 4. Balance de agua con una planta de reutilización



## 2 OBJETIVOS

---

Uno de los retos actuales a los que se enfrentan los ingenieros químicos es el de poner en práctica la reutilización de los recursos que ofrece el planeta. Por lo tanto, es necesario aumentar nuestros conocimientos para poder proporcionar a la sociedad nuevos productos que, sin perjudicar nuestra calidad de vida, consigan reducir el impacto que tienen sobre el medioambiente.

El objetivo principal de este trabajo es conocer el fundamento y las técnicas de reutilización del agua dulce en el entorno industrial, mediante un modo de aprendizaje autónomo que permita poner en práctica la capacidad de describir, explicar y analizar los conceptos y modelos que incluyen las tecnologías avanzadas de depuración y regeneración del agua.

En cuanto a objetivos específicos de este trabajo, destacan:

- Revisar el estado del arte en lo referente a los procesos de separación de contaminantes sólidos del agua residual.
- Estudiar las diferentes operaciones para eliminar sólidos suspendidos.
- Diseñar una planta de reutilización de agua, con enfoque en los equipos destinados a la eliminación de sólidos en suspensión en una corriente de agua residual industrial conocida.
- Dimensionar los principales equipos del proceso.
- Aplicar criterios éticos y de sostenibilidad en la toma de decisiones.

### 2.1 Motivación

La motivación de realizar este trabajo está íntimamente ligada a la motivación por la que decidí cursar el Master en Ingeniería Ambiental y procesos sostenibles.

Contribuir al desarrollo sostenible requiere conocimiento y formación en la materia, pues de otro modo no se puede determinar que unos procesos tengan mayor o menor impacto sobre el medio – en todas sus vertientes. Por este motivo, en un futuro cercano, mi objetivo es seguir formándome en la industria química y desarrollar un pensamiento crítico que me permita, en un futuro a largo plazo, aportar soluciones que integren la ingeniería y un uso más eficiente de los recursos.

Este Trabajo de Fin de Estudios es una oportunidad para profundizar en el tratamiento de las aguas residuales y conocer las mejores alternativas para perturbar de la manera más sostenible al ciclo del agua.



## 3 ESTADO DEL ARTE

---

### 3.1 Propiedades del agua en la industria

Desde un punto de vista químico, el agua es conocida como el “disolvente universal”, ya que tiene la capacidad de disolver una gran variedad de sustancias. Al ser una molécula polar, es capaz de disolver otros compuestos polares.

Otra destacada propiedad del agua es su alto calor específico, es decir, se necesita una elevada cantidad de energía por unidad de masa – comparada con otras sustancias – para elevar un grado Celsius su temperatura. Esta característica hace que el agua sea el fluido más empleado en la industria química como medio térmico para controlar la temperatura de los procesos.

Además, la elección del agua como fluido térmico en la industria también está favorecida por su coste y su reducido impacto en el medio ambiente frente a otros químicos.

Al igual que se necesita bastante energía para elevar su temperatura, también se necesita mucha energía para hacer que el agua cambie de fase y pase al estado gaseoso. El calor latente del agua en el paso de líquido a gas, es elevado comparado con otras sustancias. De este modo, en la industria química es muy común utilizar vapor como medio térmico para la conservación del calor. Con la condensación del vapor a la presión determinada, se cede ese alto calor latente al proceso, permitiendo la conservación de altas temperaturas y evitando condensaciones de químicos sobre las tuberías.

Por otro lado, el agua no es un buen conductor de la electricidad. Una cantidad muy pequeña de sales (en ppm) aumenta significativamente la conductividad, por lo que es fácil detectar la presencia de iones si el agua da medida de conductividad.

### 3.2 Métodos para eliminar contaminantes del agua

Si el agua no se trata, en el entorno industrial se pueden producir problemas tales como:

- Pérdida de transferencia de calor
- Corrosión en los equipos
- Vida útil reducida de los equipos
- Fallos en los equipos
- Pérdidas de producción
- Aumento de los costes de mantenimiento

En la siguiente tabla se presentan los contaminantes que pueden eliminar cada una de las técnicas que se exponen a continuación:

<i>Técnica</i>	<i>Tss</i>	<i>COD TOC</i>	<i>AOX, EOX</i>	<i>N total</i>	<i>NH3</i>	<i>Fosfatos</i>	<i>Metales pesados</i>	<i>Sulfatos</i>	<i>Fenoles</i>	<i>Aceites</i>
<i>Neutralización</i>	0						0			
<i>Sedimentación</i>	0	0					0			0
<i>Coagulación/floculación</i>	0	0					0			
<i>Flotación</i>	0	0					0			0
<i>Filtración</i>	0	0					0			
<i>MF/UF</i>	0	0					0			0
<i>Separación agua-aceite</i>	0	0								0
<i>Hidrociclón</i>	0									
<i>Electrocoagulación</i>	0	0					0			
<i>Precipitación</i>			0			0	0	0		
<i>Cristalización</i>						0	0			
<i>Oxidación química</i>		0	0						0	
<i>Oxidación húmeda</i>		0	0						0	
<i>Hidrólisis</i>		0								
<i>NF/RO</i>	0	0	0	0	0	0	0		0	
<i>Electrodialísis</i>			0							
<i>Adsorción</i>		0	0	0	0		0		0	0
<i>Intercambio iónico</i>		0					0	0		
<i>Extracción</i>		0	0						0	
<i>Destilación</i>		0	0							
<i>Pervaporación</i>		0	0							

*Tabla 1. Técnicas para la eliminación de contaminantes en el agua*<sup>8</sup>

<sup>8</sup> BRINKMANN, Thomas, et al. Best available techniques (BAT) reference document for common waste water and waste gas treatment/management systems in the chemical sector. Publications Office of the European Union, 2016.

De un modo más explicativo, se pueden clasificar las distintas técnicas por bloques de contaminantes a eliminar:

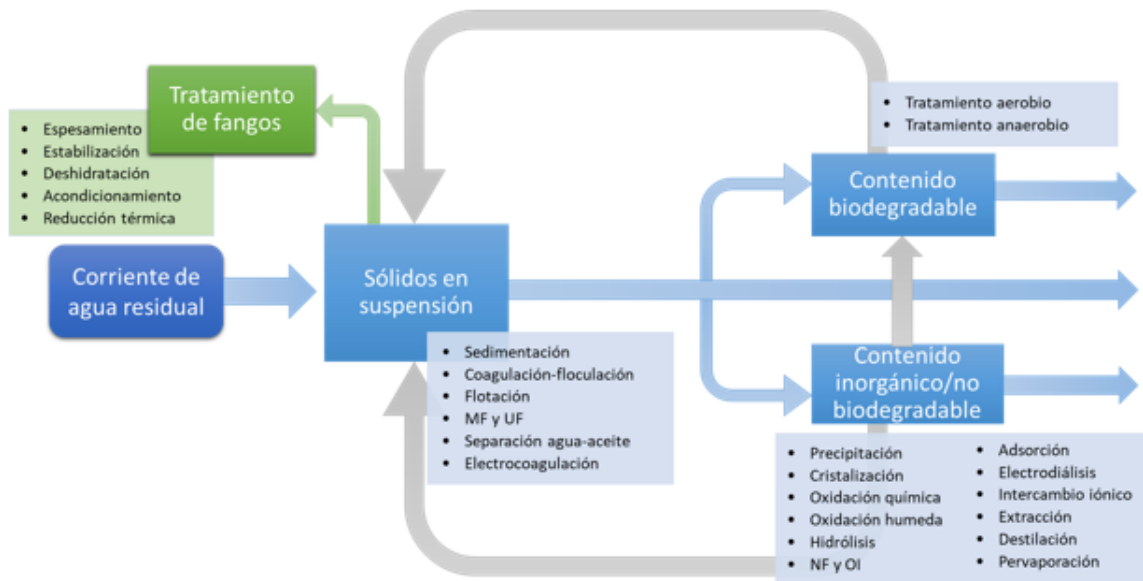


Figura 5. Región de distintas técnicas para el tratamiento del agua residual

### 3.3 Tipos de sólidos

En el agua puede transportar distintos tipos de sólidos. Estos sólidos se pueden clasificar atendiendo a distintos criterios: orgánicos o inorgánicos, en suspensión o sedimentables, volátiles o fijos, etc. Es común clasificar los sólidos en función de su comportamiento en el agua. Los sólidos totales presentes en el agua se puede determinar conforme a la norma UNE 77030:1982. Este método consiste en medir un volumen de muestra y evaporarlo en una estufa a 105 °C. Una vez evaporada el agua, se pesa el residuo, registrando el resultado en mg/l (Concentración de sustancias no volátiles).

- **Sólidos sedimentables (SS)**

Son los sólidos que se pueden decantar. El método de determinación consiste en dejar sedimentar los sólidos contenidos en un litro de muestra en un recipiente cónico (cono Imhoff). Tras una hora, el volumen sedimentado en el fondo debe calcularse, siendo este volumen una representación de los lodos que se producirán en la etapa de decantación primaria en el pretratamiento.

- **Sólidos en suspensión (TSS)**

Se determinan gravimétricamente mediante filtración, a vacío o presión, con filtros de diámetro de poro 0,45 µm. A partir de un volumen conocido de agua bruta, se determinan los

sólidos que quedan retenidos, denominándose TSS (Total Suspended Solids) al residuo seco retenido en los mismos (UNE: EN 872:1996) expresado como mg/l.

- **Sólidos disueltos (DS)**

La filtración a través del de diámetro de poro 0,45  $\mu\text{m}$  también sirve para determinar aquellos sólidos que se disuelven en el agua, pues son aquellos que pasan a través del filtro. Posteriormente, pueden determinarse al llevar el filtrado a una temperatura de 105°C y pesar los sólidos obtenidos (UNE 77031:1982).

Todos los sólidos pueden clasificarse en volátiles o fijos. Para determinar el tipo de sólidos, las muestras de agua se incineran en un horno mufla a una temperatura de 550°C hasta peso constante.

Sólidos en suspensión fijos (FSS) son la cantidad de sólidos en suspensión remanentes tras el proceso de incineración. Sólidos en suspensión volátiles (VSS) son la cantidad de sólidos en suspensión que se volatilizan tras el proceso de incineración. Ocurre del mismo modo con el resto de sólidos.

Los sólidos fijos o no volátiles están formados por la mayoría de los compuestos de origen inorgánico presentes en la corriente de agua residual. Los volátiles se obtienen por diferencia de masa entre la muestra sólida inicial y el peso de no volátiles. Los compuestos volátiles son una referencia para conocer la cantidad de materia orgánica que contiene la muestra.

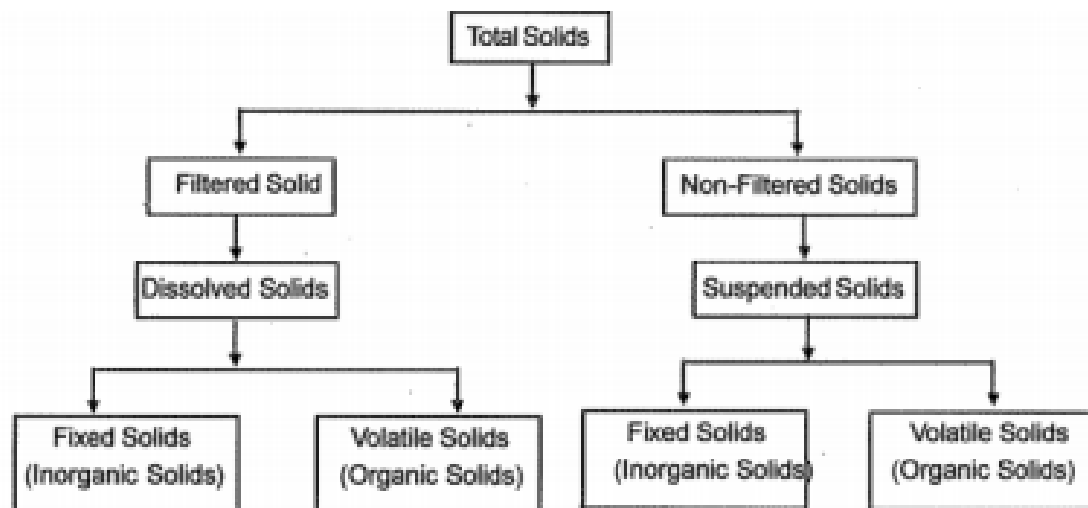


Figura 6. Esquema de los tipos de sólidos en el agua



### 3.4 Impacto de los sólidos en el medio hídrico

Los sólidos que arrastran las aguas residuales también tienen impacto sobre el medio ambiente.

- Sólidos en suspensión:
  - Incrementan la turbidez y el color del agua. La correlación entre sólidos en suspensión y turbidez vendrá determinada por el tamaño, forma y naturaleza de los sólidos. De este modo, no existe una conversión única entre medidas de turbidez y cantidad de sólidos en suspensión.
  - Disminuyen el paso de la luz solar, provocando mayor dificultad para que distintos organismos puedan realizar la fotosíntesis y se produzca una deficiencia de oxígeno en el agua. Este hecho puede desencadenar en una mayor mortalidad de organismos acuáticos.
  - Los sólidos pueden depositarse sobre las plantas, disminuyendo su actividad clorofílica y provocando efectos similares a los mencionados en el apartado anterior. Los sólidos también pueden incrustarse en las branquias de los peces, impidiendo que puedan respirar.
  - La formación de depósitos por sedimentación en ríos o balsas, favorece la aparición de condiciones anaerobias y deficiencia de oxígeno. Estas condiciones pueden dificultar la alimentación de determinadas especies.
- Sólidos disueltos:
  - La presencia de iones disueltos aumenta la salinidad del agua y, de este modo, la conductividad.
  - Un incremento de la salinidad también provoca un aumento en la presión osmótica.
  - Aunque los sólidos en sí mismos no son tóxicos, la presencia de iones disueltos puede facilitar la toxicidad de determinados compuestos.



## 4 TÉCNICAS PARA LA ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS

---

Las partículas sólidas pueden tener propiedades y comportamientos muy variados cuando se encuentra en corrientes de agua. La distribución puede ir desde partículas con mayor densidad que el agua que podrán decantar (usualmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales con gran estabilidad que será difícil sedimentar (generalmente orgánicas). La concentración de los sólidos y la forma en la que se agrupan es información importante a la hora de elegir los tratamientos requeridos para eliminar esos sólidos.

Las técnicas más comunes para la eliminación de sólidos en suspensión son las mecánicas.

A través de técnicas mecánicas, con frecuencia se eliminan los sólidos en suspensión. No obstante, para favorecer la separación entre los sólidos y el fluido, se emplean también sustancias químicas, siendo en este caso un tratamiento químico-físico el aplicado.

Por otro lado, el comportamiento de la materia disuelta y los tratamientos a aplicar también son muy variados. En ocasiones, para eliminar de una manera efectiva la materia disuelta, hay que convertirla en materia en suspensión. Por este motivo, a continuación se describen distintas técnicas para eliminar principalmente sólidos en suspensión, así como técnicas para facilitar la suspensión de aquellos sólidos que se encuentran disueltos en el agua.

### 4.1 Decantación

Existe una particular dificultad para retener gran parte de las sustancias en suspensión y disolución en las aguas residuales. Ya sea por su tamaño o densidad, las técnicas disponibles no siempre son suficientes. Métodos como las rejillas, desarenadores y cámaras de grasa encuentran la limitación en la finura del sólido, mientras que técnicas como la flotación se ven comprometidas cuando las partículas son más densas que el agua. La sedimentación consiste en separar, por acción de la gravedad, las partículas cuya densidad es mayor que la del agua y caen hacia el fondo del depósito.

El secreto de una decantación efectiva reside en conseguir una adecuada disminución de la velocidad de corriente por debajo de un determinado valor. Así es como se elimina entre el 50-60 % de la materia en suspensión en el agua residual.

Al llegar a una deposición de las partículas y el fango, se consigue también una reducción de la DBO y una depuración biológica liderada por los microorganismos presentes en el agua.

Por lo tanto, el fundamento de un proceso de decantación es el de dar tiempo de residencia, para que el agua atraviese el depósito con una velocidad suficientemente lenta para permitir la deposición de las partículas.

En algunas ocasiones se emplean también coagulantes y coadyuvantes para facilitar la separación de las partículas que forman coloides y otras partículas en suspensión.

Para dimensionar un proceso de decantación, el objetivo debe ponerse en asegurar la obtención de un efluente clarificado. No obstante, no debe olvidarse que también es necesario producir un fango con una concentración de sólidos adecuada para poder tratarlo posteriormente.

#### 4.1.1 Tipos de sedimentación

En función de la concentración de sólidos en el agua y de la interacción entre las partículas, se suele distinguir cuatro tipos de sedimentación. Estos tipos de sedimentación, se describen brevemente en la siguiente tabla.

Es usual que se manifiesten mecanismos diferentes en cada fase de la sedimentación. Por otro lado, también es posible que más de un mecanismo de sedimentación tenga lugar de manera simultánea.

Tipo de fenómeno de sedimentación	Descripción	Aplicación/Situaciones en que se presenta
De partículas discretas (Tipo I)	Se refiere a la sedimentación de partículas en una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales y no existe interacción sustancial con las partículas vecinas.	Eliminación de las arenas del agua residual.
Floculenta (Tipo II)	Se refiere a una suspensión bastante diluida de partículas que se agregan, o floculan, durante el proceso de sedimentación. Al unirse las partículas aumentan de masa y sedimentan a mayor velocidad.	Eliminación de una fracción de sólidos en suspensión del agua residual bruta en los tanques de sedimentación primaria, y en la zona superior de los decantadores secundarios. También elimina los flóculos químicos de los tanques de sedimentación primaria.
Retardada, también llamada zonal (Tipo III)	Se refiere a suspensiones de concentración intermedia, en las que las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como una unidad. Se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.	Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria empleados en las instalaciones de tratamiento biológico.
Compresión (Tipo IV)	Se refiere a la sedimentación en las partículas que están concentradas de tal manera que se forma una estructura, y la sedimentación sólo puede tener lugar como consecuencia de la compresión de esta estructura. La compresión se produce por el peso de las partículas, que se van añadiendo constantemente a la estructura por sedimentación desde el líquido sobrenadante.	Generalmente, se produce en las capas inferiores de una masa de fango de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los decantadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamiento de fangos.

Figura 7. Tipos de sedimentación en el agua residual

Concepto	Limitaciones
Tamaño de partícula	Las partículas deben ser lo suficientemente grandes para asentarse. Si no lo son, será necesario un tratamiento que facilite la sedimentación. Por ejemplo: añadiendo coagulantes y/o floculantes.
Sustancias volátiles	Las partículas volátiles deben evitarse en la medida de lo posible debido al elevado tiempo que permanecen en el tanque. También deben minimizarse para evitar escenarios de emisión de compuestos orgánicos volátiles.
Concentración de sólidos	No hay limitaciones más allá de los tiempos de residencia y de asegurar que la fase acuosa es separable.
pH	Controlar el pH es esencial en la operación para controlar el rendimiento de la clarificación.
Emulsiones	Las emulsiones que son muy estables son muy difíciles de separar. Es necesario romper la emulsión antes del proceso de sedimentación.

*Tabla 2. Limitaciones de la decantación de sólidos*

A modo de resumen, las ventajas de la sedimentación de sólidos son principalmente que se trata de una operación sencilla, con una instalación simple y de fácil mantenimiento. Además, el aumento de la eficiencia de separación es fácilmente mejorable si se añaden coagulantes o floculantes, sin necesidad de modificar demasiado la instalación. Por el contrario, algunas de sus desventajas son la dificultad para eliminar materia muy fina y emulsiones.

## **4.2 Coagulación-Floculación**

La coagulación y la floculación son técnicas complementarias a la decantación. Estas técnicas se emplean cuando la corriente de agua residual tiene coloides o emulsiones que, al estar cargadas eléctricamente, no es posible separar por decantación simple ya que la formación de lodo estará impedida por las fuerzas de repulsión entre partículas. De este modo, la coagulación y la floculación se diseñaron para facilitar una decantación más eficaz. Ambos procesos tienen lugar en varios pasos con la intención de superar las fuerzas que estabilizan las partículas suspendidas, facilitando la interacción física entre de partículas y el crecimiento del flóculo.

La coagulación es el primer paso. Su objetivo es desestabilizar la carga de las partículas neutralizando su carga superficial eléctrica. Esto se lleva a cabo agregando coagulantes con cargas contrarias a las de tienen los sólidos en suspensión de las aguas residuales.

Los químicos que, con más frecuencia, se emplean como coagulantes son el sulfato férrico, cloruro férrico, sulfato ferroso, cloruro de aluminio, cloruro de polialuminio y aluminato de sodio. Los primeros cuatro reducirán la alcalinidad y el pH de la solución, mientras que el aluminato de sodio agregará alcalinidad y elevará el pH. Los polímeros (aniónicos o catiónicos) se utilizan cada vez más, junto con los coagulantes inorgánicos convencionales.

En la coagulación, se necesita una buena agitación para garantizar la mezcla total del coagulante con las partículas. El tiempo de contacto adecuado en la cámara de mezcla rápida suele ser de uno a tres minutos.

La floculación es una etapa de mezcla suave que tiene como objetivo aumentar el tamaño de partícula. Las colisiones entre partículas hacen que se unan para producir flóculos más grandes. Esto ocurre en presencia de polímeros orgánicos inorgánicos (formados por el coagulante) o agregados. El tiempo de residencia recomendado para una coagulación suele ser de 15 o 20 minutos.

Cuando el flóculo ha alcanzado el tamaño y la resistencia óptima, el proceso de sedimentación se puede realizar con mayor facilidad y, por tanto, menores tiempos de residencia o menor volumen requerido.

La velocidad de mezcla es importante en el proceso de floculación, ya que una agitación demasiado elevada podría producir el efecto contrario y romper las partículas disminuyendo su tamaño.<sup>9</sup>

El coste de operación de los procesos de coagulación y floculación se deben principalmente al empleo de los distintos coagulantes. La elección de los productos químicos y la dosis requerida se suele determinar experimentalmente para cada tipo de corriente residual.

### **4.3 Precipitación**

Otra de las técnicas complementarias a la decantación es la precipitación. La precipitación hace posible la eliminación de sólidos disueltos en el agua transformándolos a sólidos en suspensión. El fundamento de la precipitación se basa en la formación de un compuesto insoluble en el agua que pueda caer al fondo del depósito. Para conseguirlo, se dosifica un químico que consiga reaccionar con los iones presentes y formar un nuevo compuesto insoluble. De este modo, aquellos iones que antes no se separaban por decantación ahora

---

<sup>9</sup> BRINKMANN, Thomas, et al. Best available techniques (BAT) reference document for common wastewater and waste gas treatment/management systems in the chemical sector. Publications Office of the European Union, 2016.

estarán formando un precipitado fácilmente decantable o un sólido en suspensión que pueda eliminarse también por decantación.

#### **4.4 Flotación**

La separación de sólidos por flotación consiste en introducir burbujas de algún gas que consiga adherir las partículas y hacerlas ascender hasta la superficie. Con diferencia a otros procesos, es posible favorecer el ascenso a la superficie de partículas cuya densidad es mayor a la del agua, si se consigue la suficiente fuerza ascensional a través del gas que se haga burbujear.

La flotación se suele emplear para eliminar sólidos en suspensión y para la concentración de los lodos (espesadores por flotación).

Los fangos obtenidos de un proceso de flotación son los fangos que ascienden a la superficie como espumas. También pueden encontrarse grasas y restos de los coagulantes o reactivos empleados en las etapas anteriores.

La ventaja de la flotación frente a otros procesos como la decantación consiste en que la flotación favorece la separación de partículas ligeras o pequeñas cuya deposición es difícil y lenta. De este modo, una vez que se consigue llevar las partículas a la superficie, pueden separarse del líquido.

Además, la flotación no solo ofrece ventajas para separar partículas ligeras, sino que también ofrece ventajas en los procesos de separación y espesamiento de los lodos.

Por otro lado, debido a las mayores cargas hidráulicas y, en consecuencia, menores tiempos de residencia, se puede realizar el proceso en equipos de menor volumen, disminuyendo así los costes de inversión. Sin embargo, los costes de operación son mayores debido a la energía necesaria para mover el aire de flotación.

El control de la operación y la adaptación a distintas condiciones operativas en función de los influentes es mejor con procesos como la flotación. No obstante, esto también es a costa de la disponibilidad de personal altamente capacitado y un aumento de la energía consumida en el proceso.

Se distinguen principalmente tres formas de introducir el gas (generalmente aire) en los equipos de flotación:

- Flotación por vacío, donde el gas se disuelve a presión atmosférica. Existe también una gota a presión para comenzar la formación de burbujas distribuidas por el equipo.
- Flotación de gas inducida (IGF) / flotación de aire inducida (IAF), donde se introducen burbujas finas en las aguas residuales mediante dispositivos de inducción como pueden ser un Venturi o una placa de orificio.

- Flotación de gas disuelto (DGF) / flotación de aire disuelto (DAF), donde el gas presurizado se disuelve en las aguas residuales y después se libera para formar burbujas.

#### 4.5 Filtración y separación por membranas

La filtración consiste en la separación de los sólidos contenidos o transportados por corrientes fluidas que pasan a través de un medio poroso. Esta técnica rara vez se usa como un tratamiento independiente y generalmente se combina con la sedimentación de sólidos o la flotación.

Cuando se habla de filtración, el término puede referirse a la filtración convencional, o a la filtración mediante membranas. La siguiente imagen describe la principal diferencia entre ambos tipos de filtración:

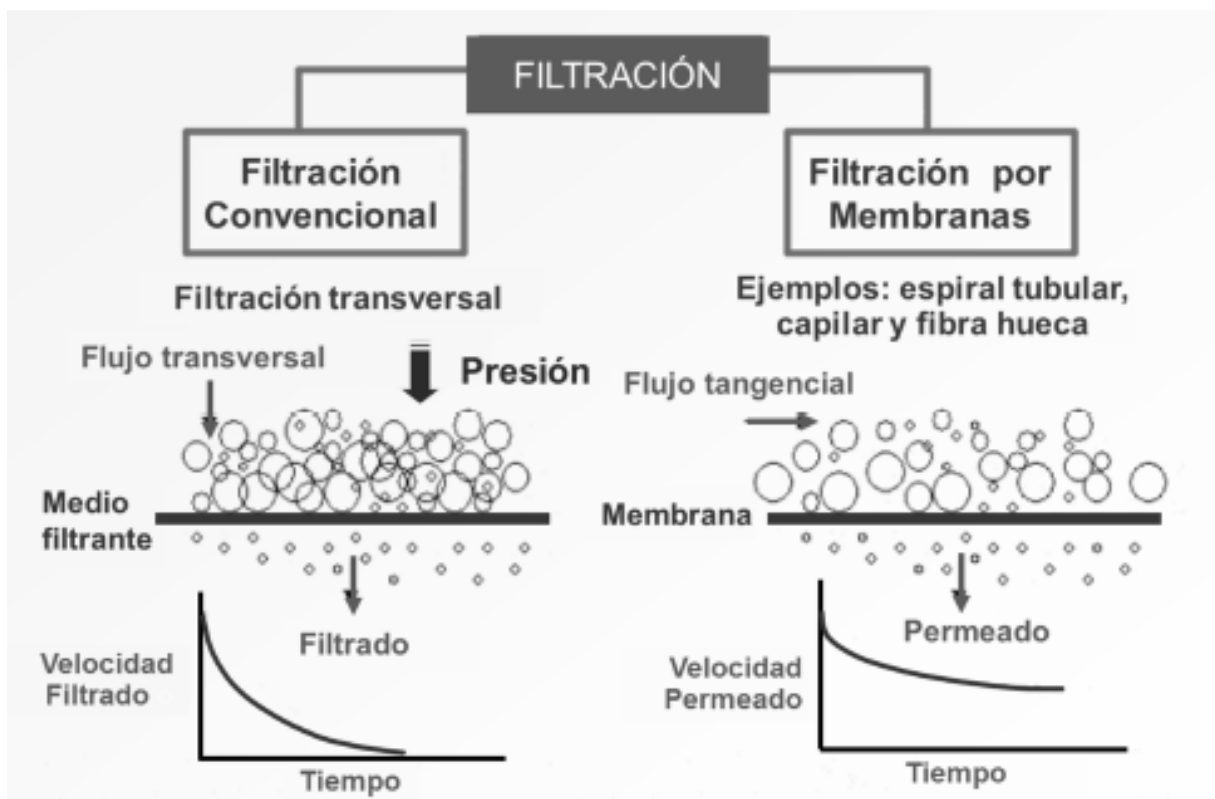


Figura 8. Filtración convencional y filtración por membranas

El empleo de la filtración por membranas es característico de aplicaciones que requieren eliminar partículas de menor tamaño y una filtración en profundidad.

En la mayor parte de los procesos industriales, las membranas operan en modo de filtración tangencial:



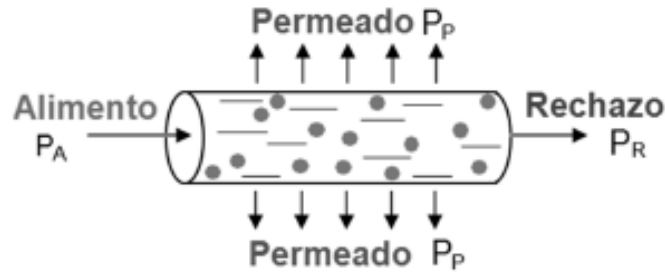


Figura 9. Modo de filtración tangencial

El alimento circula en contacto con la membrana, las partículas mayores que los poros se retienen y, solamente, el medio continuo (agua) pasa a través de la misma (permeado) mientras el alimento se concentra progresivamente.

El transporte a través de la membrana debe tener una fuerza impulsora que permita el movimiento continuo. Esta fuerza impulsora puede ser el gradiente de presiones a través de la membrana, el gradiente de concentraciones, el gradiente de potencial, etc.

El tamaño de los filtros a emplear dependerá del tipo de partículas a separar. Las partículas cuyo tamaño sea mayor que los poros de la membrana quedarán detenidas sobre la superficie de la membrana. Por el contrario, las partículas de menor tamaño, quedarán retenidas parcialmente o escaparán con la corriente fluida, dependiendo de la construcción de la membrana.

A continuación se muestra un resumen de los principales procesos de filtración y sus aplicaciones:

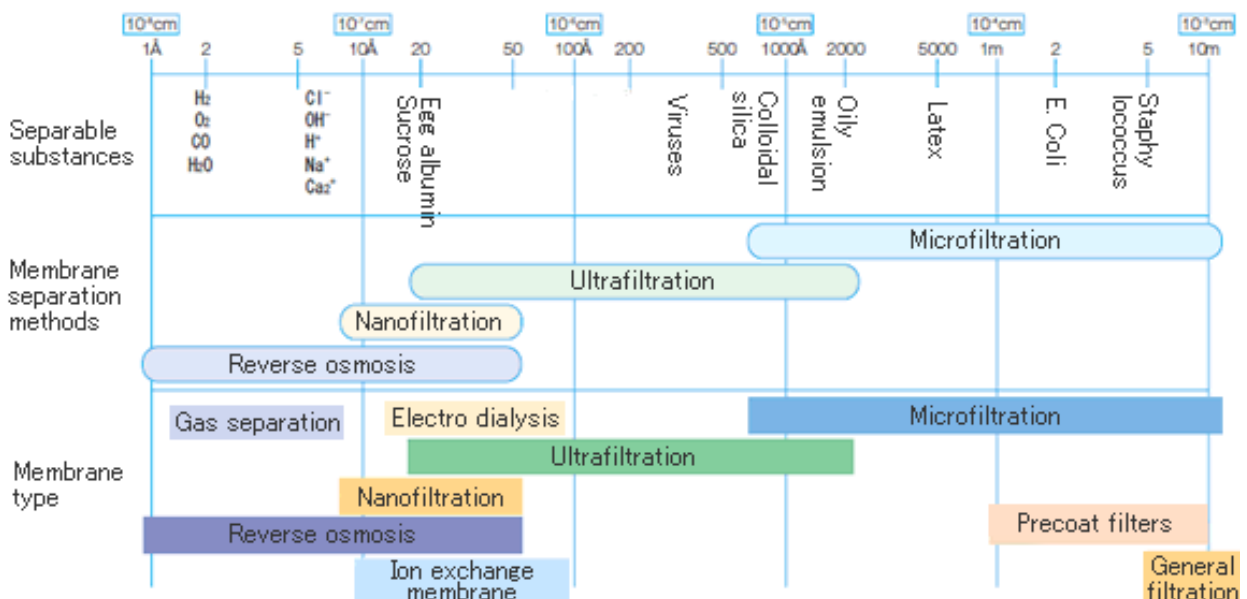


Figura 10. Procesos de filtración y sus aplicaciones

Los materiales empleados en la fabricación de las membranas pueden ser vulnerables a los ataques de algunos químicos, dependiendo de la composición del agua a tratar. Por este motivo, es importante que todas las técnicas a emplear para la reutilización de un agua estén integradas entre ellas de modo que no dañen unas a otras. Por ejemplo, es aconsejable comprobar la compatibilidad química de las membranas existentes en una instalación con el coagulante empleado en el proceso de coagulación previo, de modo que el coagulante sea compatible para las membranas y no las dañe en exceso.

#### **4.5.1 Configuración de las membranas**

Las membranas se presentan en una disposición que se conoce como módulo. Los módulos de membranas constan de las membranas, las estructuras, la entrada de la alimentación y salidas de permeado y rechazo.<sup>10</sup>

Los módulos se diseñan para conseguir los siguientes objetivos:

1. Asegurar una circulación suficiente del fluido que va a ser tratado y una limitada interacción entre las partículas sólidas para minimizar los fenómenos de polarización, deposición de partículas y concentración.
2. Producir un módulo compacto, es decir, un módulo que permita el contacto de la máxima superficie de intercambio por unidad de volumen.
3. Evitar fugas entre la alimentación y el permeado para maximizar el rendimiento de la membrana.

Los módulos que con mayor frecuencia se encuentran en el mercado se describen a continuación:

- Módulos de placa y marco

Estos módulos están formados por membranas de cara plana y placas de soporte. La alimentación circula entre las membranas de dos placas contiguas. El permeado es capaz de atravesar las membranas y caer por gravedad hasta una superficie en la que es recogido. El concentrado o rechazo circula entre las placas y se recoge en continuo para ser purgado.

---

<sup>10</sup> American Water Works Association, 1996.

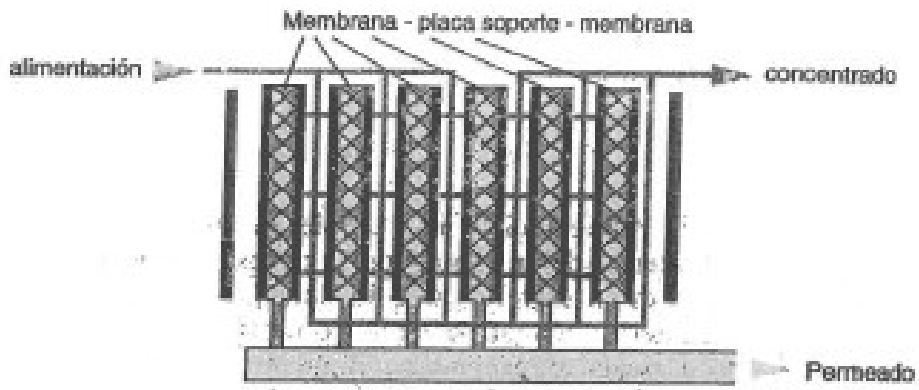


Figura 11. Esquema de membrana de placas y marcos

- Espiral

Los módulos de espiral tienen una configuración de doble membrana. Entre las dos membranas se encierra una hoja flexible porosa que recoge el permeado y lo desaloja hacia un tubo perforado que lo transporta hasta la salida del módulo. La alimentación puede pasar a través del exterior de la membrana, ya que está formada por estructuras huecas que permiten el paso. El permeado, por su parte, fluye lateralmente por las paredes de las membranas. El módulo de arrollamiento espiral es bastante sensible a la obstrucción. Por este motivo, estas membranas se utilizan después de asegurar que el agua no tiene una elevada carga de sólidos o que ha pasado por un pretratamiento efectivo.



Figura 12. Módulo de membrana en espiral

- Tubular

Los módulos tubulares están contruistos por un cilindro en el que albergan numerosos tubos de soporte poroso por los que pasa el permeado y sale de modo tangencial. El rechazo, al no ser capaz de atravesar la membrana, sale en el mismo sentido que la alimentación. En esta configuración, el flujo es tangencial a la membrana.

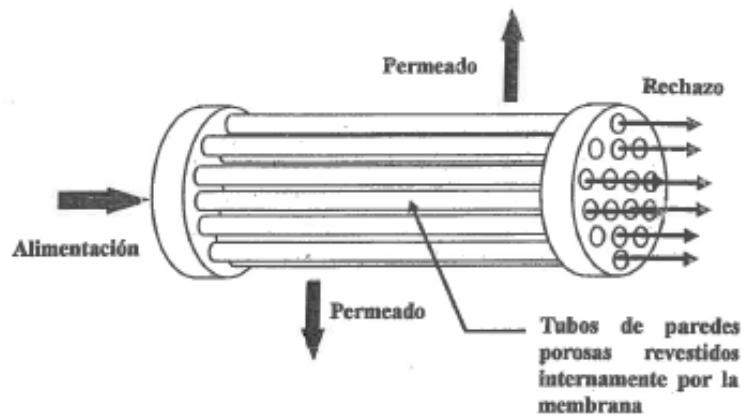


Figura 13. Módulo tubular

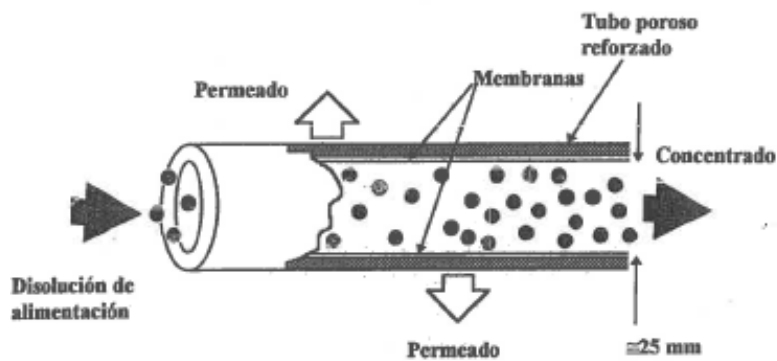


Figura 14. Esquema de uno de los tubos

- Fibra hueca

En los módulos de fibra hueca, las fibras están juntas en un haz de miles o millones de fibras. Entre las fibras puede haber espacio suficiente para el paso del flujo de alimentación o, en otra configuración, la alimentación va por fuera de las fibras.

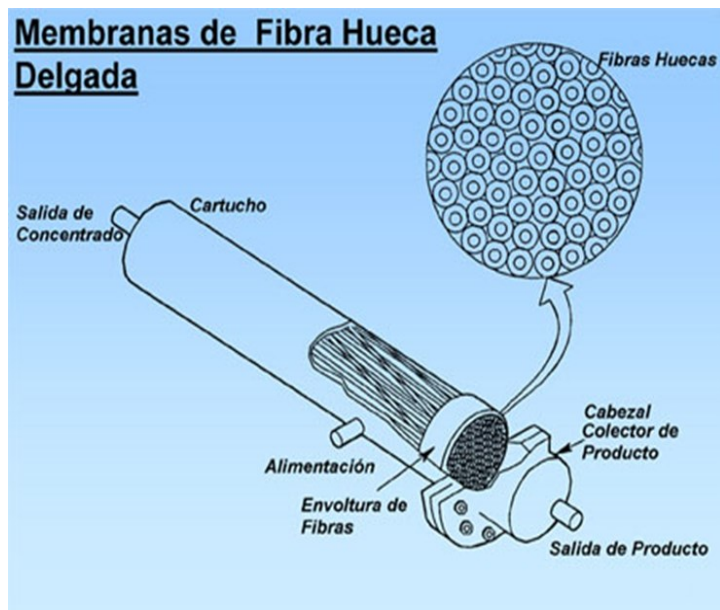


Figura 15. Membrana de fibra hueca

A continuación, se detallan algunas de las ventajas y desventajas que presentan las diferentes configuraciones de membranas:

Módulo	Ventajas	Desventajas
Placas y marcos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variedad de materiales y proveedores</li> <li>• Fácil limpieza</li> <li>• Operación simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja compacidad</li> <li>• Elevados costes capitales</li> </ul>
Espiral	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran compacidad</li> <li>• Pequeño volumen muerto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Susceptible a bloqueo por partículas</li> <li>• Difícil de limpiar</li> </ul>
Tubular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posibilidad de trabajar con altas turbulencias</li> <li>• Fácil de limpiar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja compacidad</li> <li>• Disponibilidad de material limitada</li> </ul>
Fibras huecas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran compacidad</li> <li>• Requerimiento de bajo caudal de circulación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Susceptible a bloqueo por partículas</li> <li>• Caídas de presión elevadas</li> </ul>

Tabla 3. Características de las principales configuraciones modulares

De este modo, sus principales aplicaciones son:

Módulo	S/V (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Coste	Ensuciamiento	Aplicación
Placas	25-300	Alto	Bajo	UF, Diálisis
Espiral	100-500	Alto	Bajo	UF, OI, Pervaporación
Tubular	300-1000	Medio	Medio	OI, NF, Pervaporación
Fibras huecas	Superior 3000	Bajo	Alto	UF, OI, Diálisis, Hemo-diálisis

*Tabla 4. Aplicaciones de cada módulo*

Aun cuando el agua a reutilizar tiene muy poca concentración de sólidos, es importante garantizar una buena limpieza de las membranas. Por lo tanto, los módulos y bastidores que albergan membranas deben diseñarse para que sea posible y sencillo su cambio de sentido de flujo para que los módulos puedan limpiarse tanto mecánica como químicamente.

#### **4.5.2 Limpieza de membranas**

Los filtros empelados para la retención de sólidos generalmente requieren una operación de limpieza, es decir, retrolavado, con el flujo inverso de agua dulce y el material acumulado devuelto al tanque de sedimentación para su posterior separación del agua. <sup>11</sup>

Para detectar el ensuciamiento de las membranas o filtros se recurre a parámetros normalizados. Estos parámetros están referidos a una temperatura estándar y a la unidad de superficie. Por ejemplo: si se mantiene el paso de sales, disminuye el paso de agua y aumenta el coeficiente de pérdida de carga, lo más probable es que se haya producido un ensuciamiento del filtro (deposición, incrustaciones, o crecimiento biológico). Por el contrario, si aumenta el paso de sales, aumenta el paso de agua y disminuye el coeficiente de pérdida de carga, este hecho podría ser el indicador de una rotura de la membrana.

Se pueden realizar principalmente dos tipos de limpiezas en las membranas:

---

<sup>11</sup> BRINKMANN, Thomas, et al. *Op cit.*

- Limpiezas físicas o mecánicas:

Las limpiezas físicas buscan eliminar los sólidos retenidos en la superficie de la membrana y retirarlos con la corriente de rechazo. Las limpiezas físicas pueden hacerse con agua o aire.

En el caso de realizarse con agua, se debe suministrar un alto caudal de agua a presión durante unos segundos. Para mejorar la reutilización del agua, se puede emplear una parte de la misma agua recién filtrada para la limpieza de la membrana. Si se realizan con aire el funcionamiento es similar, pudiéndose realizarse también a pulsos.

- Limpiezas químicas:

Las limpiezas químicas se realizan con menor frecuencia por el impacto y el coste de las mismas, aunque la eficiencia es mayor. Este tipo de limpieza se debe aplicar cuando exista una importante caída de rendimiento en el sistema.

Generalmente se dispone de un tanque en el que se prepararán las disoluciones de limpieza que se utilizarán para el lavado de membranas.

La limpieza química puede ser ácida, básica, biocida, o una combinación de éstas, en función de la resistencia química de las membranas y los contaminantes a eliminar.

#### **4.5.3 Microfiltración y ultrafiltración**

La microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) son procesos de membrana que retienen ciertas sustancias contenidas en las aguas residuales en un lado de la membrana. El líquido que penetra a través de la membrana se conoce como permeado. El líquido retenido se denomina concentrado. La diferencia de presión a través de la membrana es la fuerza impulsora del proceso.

En microfiltración y ultrafiltración se emplean membranas de tipo poro que funcionan como tamices. El solvente y las partículas cuyo tamaño es como el de una molécula media pueden pasar a través de los poros, mientras que las partículas suspendidas, partículas coloidales, bacterias, virus e incluso macromoléculas más grandes se retienen.

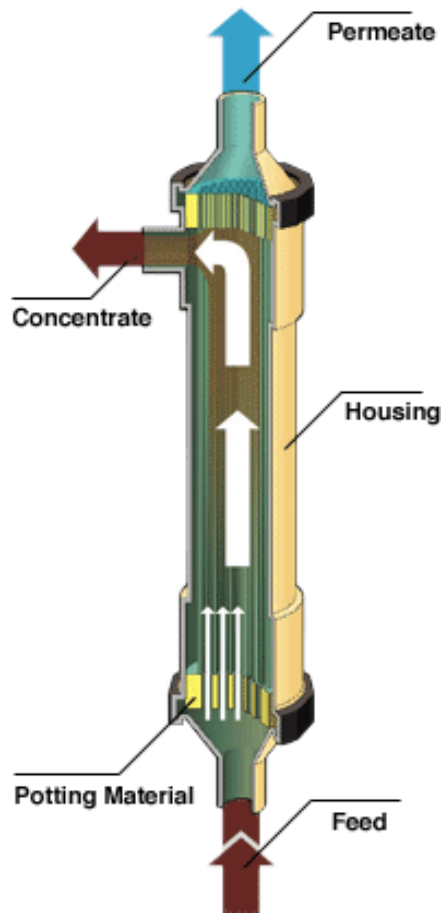


Figura 16. Flujo a través de una membrana de microfiltración

Las membranas de microfiltración y ultrafiltración se pueden construir en distintos materiales y configuraciones. En el mercado hay empresas muy especializadas en los distintos tipos de membrana que se puede suministrar en función de las características del agua y la resistencia a las sustancias que contenga.

Los materiales más empleados para la construcción de membranas de ultrafiltración son generalmente polímeros orgánicos, acetato de celulosa, poliamida, poliimida, policarbonato, cloruro de polivinilo, etc. <sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> CARRETERO DEL POZO, P. Copolímeros poliamida-g-PEG: síntesis, caracterización, y aplicación como membranas. 2012. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.





*Figura 17. Bastidores para membranas de microfiltración*

#### **4.5.4 Ósmosis inversa y nanofiltración**

Las técnicas descritas anteriormente se emplean para la retención de sólidos en suspensión. La ósmosis inversa, además, es una técnica que permite eliminar también sólidos disueltos y sales.

Los procesos de nanofiltración (NF) y de ósmosis inversa (RO) están diseñados para separar las partículas del tamaño de moléculas orgánicas e incluso iones.

Las membranas de NF permiten que pasen agua, iones de valencia únicos (por ejemplo, fluoruros, cloruro de sodio y potasio) y nitratos, mientras retienen múltiples iones de valencia (por ejemplo, sulfato y fosfatos). Las sales se concentran y se descargan como salmuera concentrada. Las membranas RO tienen el tamaño de poro más pequeño ( $<0.002 \mu\text{m}$ ) utilizado en la separación líquido / líquido. Permiten que el agua pase y retenga el soluto (por ejemplo, sales, iones metálicos y ciertos compuestos orgánicos). Las sales se concentran y se descargan como salmuera concentrada.

Los procesos nanofiltración y ósmosis inversa generalmente se operan en flujo cruzado, por lo que el permeado está orientado de manera perpendicular al flujo de alimentación.

#### **4.5.5 Comparación de los procesos de membranas**

Para entender mejor las diferencias entre los procesos de membrana y cuándo conviene aplicar cada uno de ellos, a continuación, se describe una comparación.

Se conoce como “Flux” a la velocidad media del flujo de agua a través de un lecho o membrana.

El flux de permeado en configuración tangencial se calcula como:

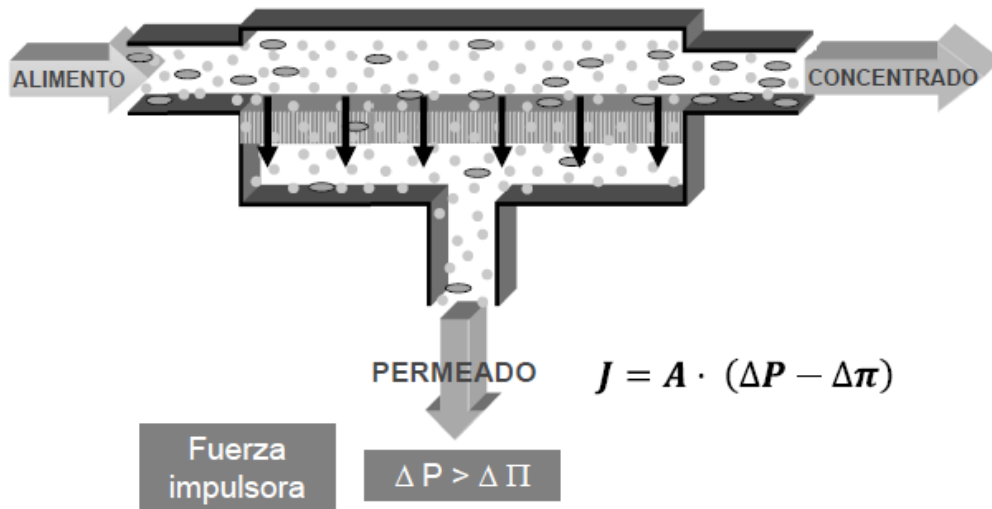


Figura 18. Descripción del proceso

Los valores habituales de presión de trabajo y flux en cada tipo de proceso se presentan en la siguiente tabla:

Proceso	MF	UF	NF	OI
Presión (bar)	0,5-2	0,5-5	5-15	5-80
Flux (L/m <sup>2</sup> h)	>200	5-200	5-80	5-40

Tabla 5. Presión de trabajo y flux a través de las membranas

La OI requiere mayor presión que la NF, por lo que se trata de una operación que requiere más consumo energético. Además, también produce menor caudal de permeado por unidad de área, ya que es capaz de separar iones y solutos de muy bajo peso molecular.

A continuación se presenta una tabla resumen de las características de cada tipo de proceso de membrana:

	<b>Microfiltración</b>	<b>Ultrafiltración</b>	<b>Nanofiltración</b>	<b>Osmosis inversa</b>
<b>Separación</b>	Partículas (bacterias, hongos)	Macromoléculas (proteínas, virus)	Iones y moléculas de peso molecular < 300~400	Iones y solutos de bajo peso molecular (sales, glucosa)
<b>Presión osmótica</b>	despreciable	despreciable	<b>moderada</b>	<b>alta</b>
<b>Presión aplicada</b>	Baja (< 2 bar)	Baja (entre 1-5 bar)	Media (entre 5-15 bar)	Alta (entre 10-70 bar)
<b>Estructura</b>	Simétrica (no siempre)	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica
<b>Espesor efectivo</b>	(0,1 - 10 μm)	(1 - 100 nm)	( 1 nm)	(< 1 nm)
<b>Fundamento</b>	tamaño de partícula.	tamaño de partícula	diferencias de solubilidad y difusividad, tamaño y carga	diferencias de solubilidad y difusividad

Tabla 6. Comparación de los procesos de membrana <sup>13</sup>

#### 4.5.6 Parámetros de proceso en los sistemas de filtración por membranas

- Densidad de flujo o flux

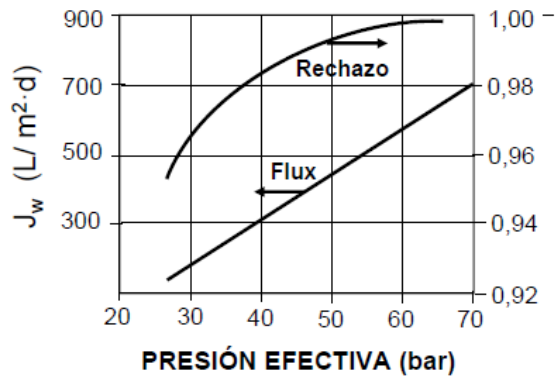
Este parámetro se ha mencionado en la sección anterior y es una representación del flujo de permeado que se obtiene por unidad de área de membrana.

$$J \left( \frac{m^3}{m^2 h} \right) = \frac{Q \left( \frac{m^3}{h} \right)}{S (m^2)}$$

Un incremento de presión de la corriente de alimentación inicialmente aumenta el flux J, pero si se supera un límite produce el fenómeno de polarización y el flux se independiza de la presión.

---

<sup>13</sup> IUPAC, Terminology for Membranes and Membrane Processes, 1996.



- Permeabilidad

Es otro parámetro que indica la capacidad permear que tiene el agua a través de la membrana en función de la presión transmembrana.

$$Perm \left( \frac{m^3}{m^2 h bar} \right) = \frac{Q \left( \frac{m^3}{h} \right)}{S (m^2) * TMP (bar)}$$

- Presión transmembrana

La presión transmembrana representa la diferencia de presión entre la entrada de la alimentación y la salida del permeado. Conforme se van reteniendo sólidos en membrana y se va colmatando, la presión transmembrana aumenta. El aumento de la presión transmembrana disminuye la permeabilidad, el flujo y el rendimiento de la filtración. Por este motivo, es habitual que las limpiezas de las membranas se realicen sistemáticamente cada vez que la presión transmembrana alcanza un determinado valor. Tras limpiar la membrana y retirar los sólidos retenidos, la presión transmembrana vuelve a disminuir. La presión transmembrana es un buen indicativo de la resistencia al paso al que está sometido el fluido en cada momento. Existen principalmente dos resistencias: la resistencia intrínseca de la membrana (depende de las características de la membrana) y la resistencia de los sólidos retenidos (varía en el tiempo y depende de cómo quedan retenidos los sólidos).

- Coeficiente de rechazo y factor de concentración

Las definiciones hacen referencia a la tendencia que tienen los solutos a acumularse en la superficie de la membrana, originando el fenómeno de polarización por concentración. Al aumentar la concentración de sólidos, el flux disminuye.

Este fenómeno es especialmente marcado en procesos de MF y UF, que separan especies de elevado peso molecular (de baja movilidad y difusividad).

$$R(\%) = 100 - \frac{C_{permeado}}{C_{alimentación}} * 100$$

$$FC (\%) = \frac{C \text{ permeado}}{C \text{ alimentación}} * 100$$

- Factor de conversión o rendimiento

Es la proporción de caudal de permeado con respecto al caudal alimentado.

$$Rto = \frac{Q \text{ permeado}}{Q \text{ alimentación}} * 100$$

- Viscosidad

El flujo es inversamente proporcional a la viscosidad. Un aumento de viscosidad del fluido descenderá el flux. La viscosidad depende a su vez de la temperatura y del factor de concentración (FC).

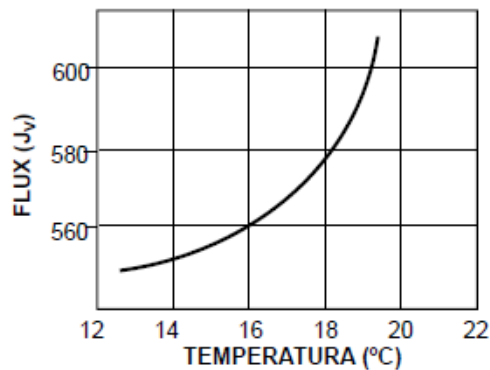
- Temperatura

Un aumento de temperatura incrementa el flux, ya que disminuye la viscosidad y aumenta el coeficiente de transferencia de masa ( $D/\delta$ ).

Se operará a la máxima temperatura que permita la alimentación y la membrana.

La permeabilidad sigue una dependencia exponencial con la temperatura (tipo Arrhenius).

$$A = A_0 \exp \frac{-E_0}{RT}$$



- pH de la disolución

El pH de la corriente de alimentación es otro factor que influye en la permeabilidad de las membranas, particularmente en presencia de polielectrolitos.

El ácido poliacrílico posee elevados rechazos mediante membranas de UF a  $pH > 5$ , pero es totalmente permeable a través de la misma membrana a  $pH < 3$ .

Este cambio en el comportamiento de rechazo con el pH se relaciona con el cambio de configuración del ácido poliacrílico.

A continuación se muestra un resumen de cómo influyen los parámetros de operación en el flujo de permeado:

<i>Parámetro</i>	<i>Influencia sobre el flujo</i>
<i>Viscosidad</i>	Negativa
<i>Concentración de sólidos</i>	Negativa
<i>Temperatura</i>	Positiva
<i>Presión</i>	Positiva

*Tabla 7. Influencia de los parámetros de operación en el flujo de permeado*

#### **4.5.7 Problemas de las membranas**

Un agua a tratar en plantas de Osmosis o Microfiltración puede originar los siguientes problemas:

- Deposición

Es la acumulación de sólidos en la superficie de la membrana. La deposición se produce cuando el agua lleva una gran cantidad de sólidos en suspensión y cuando las limpiezas mecánicas no son efectivas.

- Incrustaciones

Son depósitos sólidos fuertemente adheridos a la membrana, difíciles de eliminar por medios mecánicos. Si se trabaja a un pH alto es más fácil que ocurran este tipo de incrustaciones en las membranas. Por ejemplo: incrustaciones de hierro o aluminio, incrustaciones de carbonatos, de fosfatos, de sulfatos, etc.

- Corrosión

Es la degradación de los materiales de la instalación o de las membranas por la presencia de químicos con los que son incompatibles. Por ejemplo: daño del acero por altos cloruros, daño de las membranas de poliamida por alto cloro libre residual, daño de membranas de poliamida por químicos corrosivos como el fenol, etc. Por este motivo es importante elegir con criterio qué químicos se emplearán para las limpiezas químicas de las membranas.

- Crecimiento biológico

Consiste en la proliferación de microorganismos en las instalaciones, formándose depósitos que pueden perturbar seriamente el funcionamiento de las membranas.

#### 4.5.8 Tipos de ensuciamiento de membranas

Las partículas cuyo tamaño es similar o inferior al del poro de la membrana causan ensuciamiento interno. Este ensuciamiento es el más difícil de eliminar, pues las limpiezas mecánicas o físicas no suelen ser capaces de arrastrar estos sólidos atrapados en los poros y, tan solo las limpiezas químicas pueden disolver esos sólidos para arrastrarlos fuera de las membranas.

El ensuciamiento externo, formado por una torta superficial, es un ensuciamiento que provoca mucha diferencia de presión entre las membranas, ya que impide, en gran medida, el paso del fluido por las mismas. Sin embargo, puede eliminarse generalmente con una buena limpieza mecánica.

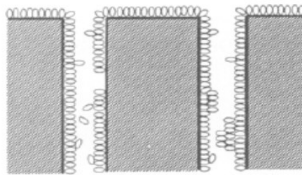
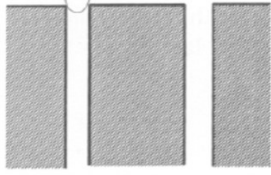
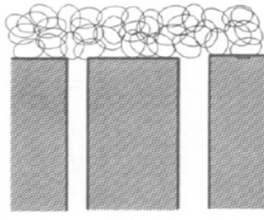
<p style="text-align: center;"><b>Internal pore closure</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Pore blocking</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Cake resistance</b></p> 
$J = \frac{J_0}{1 + J_0 K_m t} \quad (1)$	$J = J_0 \exp(-K_p t) \quad (2)$	$J^2 = \frac{J_0^2}{1 + J_0^2 K_c t} \quad (3)$
$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + K_m t \quad (1')$	$\ln J = -K_p t + \ln J_0 \quad (2')$	$\frac{1}{J^2} = \frac{1}{J_0^2} + K_c t \quad (3')$

Figura 19. Tipos de ensuciamiento de membranas<sup>14</sup>

#### 4.6 Adsorción

En la adsorción, se emplea un material sólido para eliminar distintos contaminantes presentes en fluidos. La operación de adsorción puede realizarse en continuo o por batches.

El principio de separación se basa en la transferencia selectiva de uno o más solutos de una fase fluida a una de partículas sólidas. Es un fenómeno de superficie y supone la adherencia

<sup>14</sup> Ortiz, M. et al., Modelos matemáticos de la colmatación de membranas en microfiltración tangencial. REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 28 No. 1, ABRIL DE 2008 (123-132)

de una fase fluida sobre la superficie de un sólido. Para aumentar la adherencia y efectividad se emplean sólidos con alta porosidad y elevada superficie por unidad de volumen.

Los adsorbentes más comunes son el carbón activo, los materiales poliméricos, las alúminas activadas, las sílices y las zeolitas, entre otros.

Se trata, además, de una operación muy sensible a las variaciones de pH, ya que el estado de ionización de los grupos funcionales tanto del adsorbato como del adsorbente puede traducirse en variaciones en las interacciones entre ambos.

La adsorción presenta costes de operación elevados debido al alto coste de los materiales adsorbentes y los costes de regeneración.

#### **4.7 Combinación de técnicas para la eliminación de sólidos**

Una planta de eliminación de sólidos en corrientes de agua residual, generalmente, consta de tres secciones separadas:

1. La sección de pretratamiento donde los sólidos que pueda llevar el agua son eliminados por métodos como la precipitación, coagulación / floculación o flotación y son enviados a un posterior tratamiento de sólidos o fangos.
2. La sección de filtración y posterior tratamiento con membranas. En esta sección, se hace pasar el agua residual a través de las membranas, mientras que los sólidos se eliminan con las corrientes de limpiezas mecánicas o químicas.
3. La última sección, donde el permeado se puede reutilizar, y el rechazo se recoge para recircularlo sobre el proceso y tratar de reutilizarlo lo máximo. Si no es posible seguir reutilizándolo, se adecúa para poder verterlo al mar, alcantarillado o cauce público, según aplique en la autorización de vertido de la industria correspondiente.

Adicionalmente, deberá contar con una sección de tratamiento de sólidos o fangos para adecuar los fangos generados antes de gestionarlos como un residuo.



## 5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

### 5.1 Condiciones de proceso

Se necesita diseñar una planta de reutilización de agua en un complejo industrial. A continuación se describen los datos del agua residual generada por la industria:

- Caudal medio: 100 m<sup>3</sup>/h
- Caudal punta: 120 m<sup>3</sup>/h
- Caudal mínimo: 50 m<sup>3</sup>/h
- Temperatura: 15-30 °C
- pH = 6-8.5
- Carga contaminante:

PARÁMETRO	RANGO		Unidad
	Mínimo	Máximo	
TSS	0	100	ppm
DQO	0	125	ppm
NITRATOS	0	50	ppm
OXÍGENO DISUELTO	2.7	3.3	mg/l
CONDUCTIVIDAD	2500	6500	mS/cm

*Tabla 8. Características del agua residual a tratar*

- Distribución de tamaños de las partículas sólidas:

Tamaño mín (µm)	Incremento (%)	Tamaño máx (µm)	Acumulado (%)
0.06	0.00	0.07	0.00
0.07	0.00	0.08	0.00
0.08	0.00	0.09	0.00
0.09	0.00	0.10	0.00
0.10	0.00	0.12	0.00
0.12	0.00	0.14	0.00
0.14	0.00	0.17	0.00
0.17	0.00	0.19	0.00

0.19	0.00	0.22	0.00
0.22	0.00	0.25	0.00
0.25	0.00	0.30	0.00
0.30	0.00	0.34	0.00
0.34	0.00	0.40	0.00
0.40	0.00	0.46	0.00
0.46	0.00	0.54	0.00
0.54	0.00	0.64	0.00
0.64	0.00	0.74	0.00
0.74	0.07	0.86	0.07
0.86	0.07	1.00	0.15
1.00	0.08	1.17	0.23
1.17	0.10	1.36	0.32
1.36	0.12	1.58	0.45
1.58	0.14	1.85	0.59
1.85	0.15	2.15	0.75
2.15	0.18	2.51	0.93
2.51	0.23	2.92	1.16
2.92	0.29	3.40	1.44
3.40	0.37	3.96	1.82
3.96	0.48	4.61	2.30
4.61	0.61	5.37	2.91
5.37	0.75	6.26	3.67
6.26	0.89	7.29	4.56
7.29	1.03	8.49	5.59
8.49	1.19	9.90	6.78
9.90	1.38	11.53	8.16

11.53	1.63	13.43	9.79
13.43	2.00	15.64	11.79
15.64	2.53	18.23	14.32
18.23	3.24	21.24	17.56
21.24	4.17	24.74	21.73
24.74	5.29	28.82	27.02
28.82	6.53	33.58	33.55
33.58	7.75	39.12	41.30
39.12	8.80	45.57	50.10
45.57	9.56	53.10	59.66
53.10	10.03	61.85	69.69
61.85	9.11	72.06	78.80
72.06	7.58	83.95	86.38
83.95	5.78	97.80	92.16
97.80	4.02	113.94	96.19
113.94	2.48	132.74	98.67
132.74	1.27	154.64	99.94
154.64	0.06	180.15	100.00
180.15	0.00	209.88	100.00
209.88	0.00	244.51	100.00
244.51	0.00	284.85	100.00
284.85	0.00	331.85	100.00
331.85	0.00	386.61	100.00
386.61	0.00	450.40	100.00
450.40	0.00	524.71	100.00

*Tabla 9. Datos de la distribución de tamaños de partículas sólidas*

## 5.2 Configuración de la planta de reutilización

Como se describió en el Capítulo 4, existen distintas técnicas para eliminar los sólidos que contiene un agua residual. La elección de unas técnicas u otras dependerá del destino final que se vaya a dar al agua, así como de la carga contaminante que contenga.

En la industria es importante que la calidad del agua sea la adecuada según el uso que se le vaya a dar. Por ejemplo, a las calderas de generación de vapor se suele alimentar agua desmineralizada. El agua desmineralizada es un agua muy pura con un contenido de iones mínimo. Este tipo de agua se puede producir por ósmosis inversa o por intercambio iónico con resinas catiónicas y aniónicas. La desventaja que presentan las resinas frente a la osmosis inversa es principalmente que deben ser regeneradas con una cantidad elevada de un ácido o una base. Debido a los elevados costes de operación que supone la regeneración, es habitual recurrir, en este caso, a sistemas de ósmosis inversa.

Los sólidos disueltos totales (TDS) describen la concentración de sólidos disueltos en el agua. Existe una relación directa entre la conductividad del agua y los sólidos disueltos que contiene. Cuanto mayor sea la concentración de iones y sólidos disueltos en el agua, mayor será su conductividad eléctrica.

Cuando el agua está libre de iones, presenta una conductividad muy baja. Por lo tanto, se puede detectar con facilidad la presencia de iones con un análisis de conductividad en la muestra de agua.

Los problemas que pueden surgir si el agua empleada para producir vapor no tiene la calidad adecuada pueden ser: formación de costras en los equipos y tuberías, corrosión, formación de burbujas de aire en el proceso, etc. Este tipo de eventos desembocarán en un aumento de los costes de mantenimiento o incluso en una parada de la producción si resulta dañado un equipo crítico.

Generalmente, los procesos que se aplican en primera instancia son los de coagulación, floculación y/o decantación. La eficiencia de la clarificación del agua en estos procesos determinará el nivel de sólidos en suspensión o disueltos de las aguas dirigidas a procesos más específicos y más complejos como la filtración con membranas.

Se conseguirá una adecuada clarificación si la decantación es buena. En el caso de tener una mala clarificación, se producirá un escape de sólidos hacia el rebosadero por donde el agua clarificada escapa hacia la siguiente etapa.

En este punto, es conveniente medir los sólidos antes de entrar en las operaciones de membranas, para no dañarlas o colmatarlas en exceso. Se pueden medir los sólidos empleando dos parámetros:

- TSS: Sólidos totales en suspensión (mg/l).
- Turbidez: La turbidez se define como la dificultad que encuentra la luz para transmitirse en el agua, debido a la dispersión generada por los sólidos presentes. Se mide en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez).

El pretratamiento muy importante para reducir la colmatación de las membranas de filtración posteriores y para aumentar su permeabilidad y, por tanto, su capacidad para tratar mayores volúmenes de agua. La configuración y los químicos empleados de la planta de pretratamiento deben determinarse experimentalmente cuando se conozca la composición del agua residual.

Tras el pretratamiento del agua, el proceso sigue dos rutas: el agua clarificada se envía a la sección de filtración y los sólidos decantados se envían al área de tratamiento de fangos.

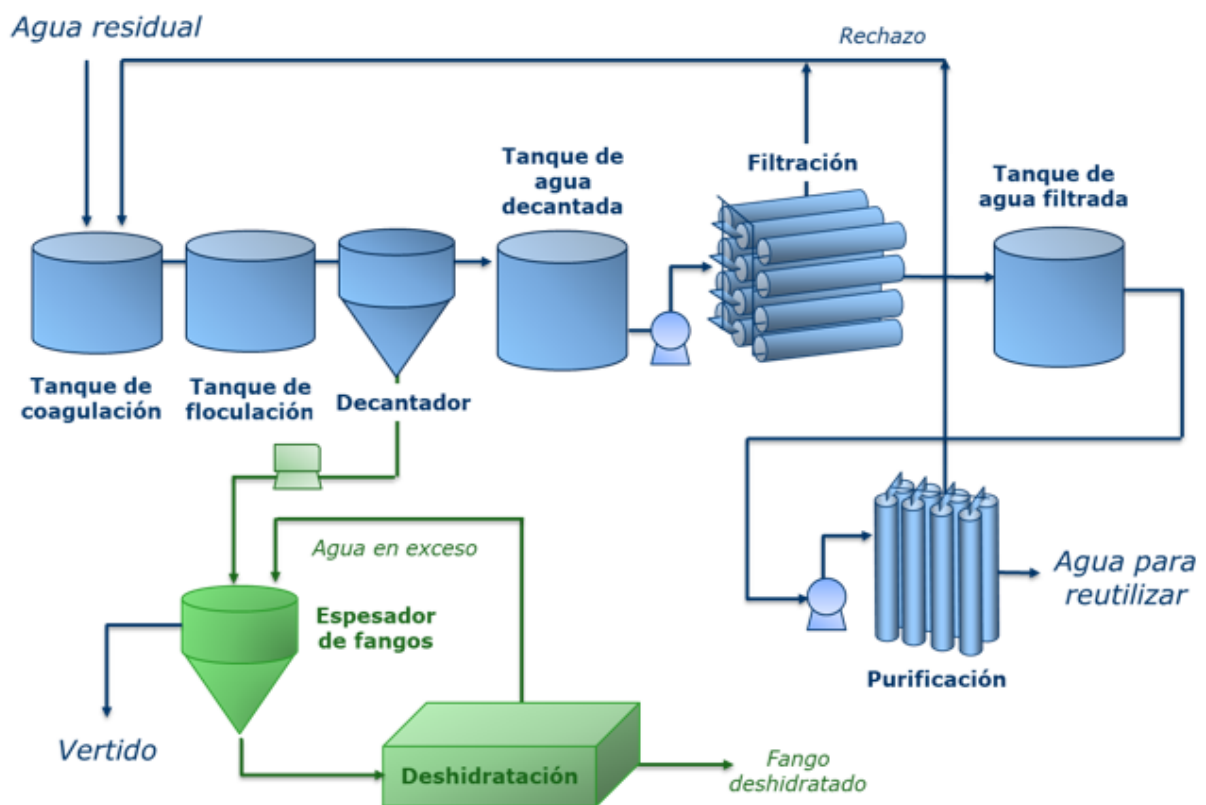


Figura 20. Configuración de la planta de reutilización de agua

Los procesos de filtración o purificación del agua dependerán de la aplicación posterior que se le vaya a dar y se definirán con más detalle en los siguientes apartados. Por otro lado, en la sección de tratamiento de fangos el objetivo es separar los sólidos del proceso en forma de fango para su tratamiento como subproducto o residuo y poder eliminar del proceso un agua que cumpla las especificaciones de vertido.

### 5.3 Diseño del tanque de coagulación

Cuando se aplican técnicas como la filtración para la retención de sólidos, el pretratamiento del agua es clave para reducir el ensuciamiento de las membranas. La carga de sólidos que llega a los módulos de filtración es determinante para garantizar una buena permeabilidad en las membranas y aumentar su vida útil.

A la planta de pretratamiento este tanque llegará:

- Corriente de agua residual reutilizable procedente de la industria ( $Q_m = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $Q_p = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ ).
- Agua con sólidos procedente de las limpiezas mecánicas de las membranas de filtración ( $Q = 60 \text{ m}^3/\text{h}$  [2 veces durante 15 minutos];  $Q_m = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

Adicionalmente, podrán desviarse directamente al área de filtración aquellas corrientes libres de sólidos para reducir el caudal de llegada al área de pretratamiento.

El diseño de los tanques de coagulación se basa en garantizar el tiempo de retención para una coagulación efectiva, que suele estar comprendido entre 2-3 minutos. Es necesario aplicar agitación para favorecer la mezcla rápida entre la corriente a tratar y el coagulante añadido y facilitar la desestabilización de las cargas eléctricas.

De este modo:

$$Vol(m^3) = \frac{Q (m^3/h) \cdot Tr(\text{min})}{60 \text{ h/min}}$$

Para  $Tr = 3 \text{ min}$  y  $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ :

$$Vol(m^3) = 7.5$$

El volumen de diseño teórico debe sobredimensionarse para evitar problemas de formación de vórtices en el líquido y para poder amortiguar las variaciones de caudal sin que suponga un problema añadido a la operación. De este modo:

$$Volumen(m^3) = 1.3 * 7.5 \approx 10$$

Los tanques pueden ser de dos tipos: de sección circular o de sección rectangular. En este caso se va a diseñar un tanque de sección circular. Generalmente, el diámetro se establece de dimensiones similares a la altura, aunque en este caso se va a aumentar la altura algo más para evitar salpicaduras debidas a la agitación, por lo que:

- Volumen:  $10 \text{ m}^3$
- Diámetro:  $2.1 \text{ m}$
- Altura:  $3 \text{ m}$

La agitación a aplicar se realizará por medios mecánicos mediante una turbina de palas inclinadas. La potencia de agitación necesaria puede estimarse con el siguiente gráfico de McCabe et al., donde se establece una correlación entre el diámetro del tanque y la potencia requerida por unidad de volumen.

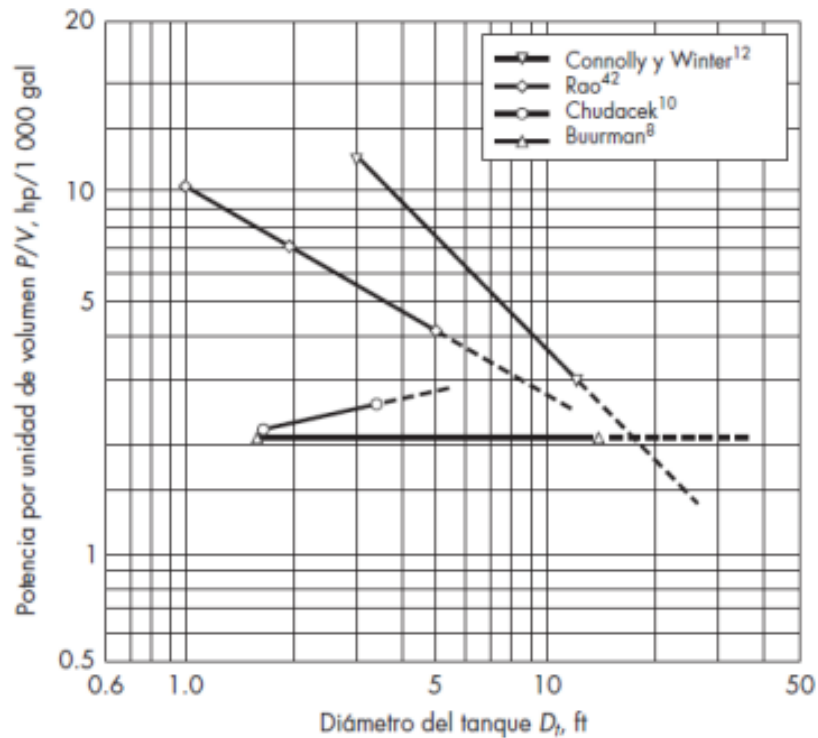


Figura 21. Potencia necesaria para la agitación en tanques<sup>15</sup>

Siendo el diámetro 2.1 m (6.9 ft), la potencia requerida por unidad de volumen siguiendo el criterio de Connolly y Winter es de 5.5 hp/1000 gal. Transformándolo al SI y teniendo en cuenta el volumen del tanque, la potencia requerida es: 10.81kW.

La dosis y la naturaleza del coagulante deberán determinarse mediante ensayos de laboratorio con análisis específicos para la corriente en cuestión.

#### 5.4 Diseño del tanque de floculación

A este tanque le llegará en continuo la corriente procedente del tanque de coagulación. El tiempo de retención requerido para una buena floculación está comprendido entre 20-30 minutos.

De este modo:

---

<sup>15</sup> McCabe, W.L., et al. Operaciones unitarias en la industria química. 2002

$$Vol(m^3) = \frac{Q (m^3/h) \cdot Tr(\min)}{60 h/\min}$$

Para  $Tr = 25 \text{ min}$  y  $Q = 150 \text{ m}^3/\text{h}$ :

$$Vol(m^3) = 62.5$$

El volumen de diseño teórico debe sobredimensionarse para evitar problemas de formación de vórtices en el líquido. En este caso, como la agitación requerida en la floculación es menor, el sobredimensionamiento también puede ser menor. De este modo:

$$Volumen(m^3) = 1.1 * 62.5 \approx 69$$

Siendo:

- Diámetro: 4 m
- Altura: 5.5 m

El cálculo de la potencia necesaria para la agitación puede estimarse del mismo modo que se estimó para el taque de coagulación. Siendo el diámetro de 4m (13.1 ft): la potencia estimada para la agitación en el tanque de floculación es de 41.6 kW.

La velocidad de agitación en un proceso de floculación debe ser baja, ya que se debe garantizar la formación de nuevos flóculos sin romper los existentes.

## 5.5 Diseño del tanque de sedimentación

La decantación se basa en la diferencia de densidad entre la partícula sólida a separar y el agua. La partícula caerá al fondo del tanque cuando la velocidad ascensional del agua sea menor que la velocidad de sedimentación de la partícula.

La velocidad de sedimentación de una partícula se puede calcular con la ley de Stokes. Sin embargo, se trata de un cálculo muy teórico difícil de adaptar a un espectro de partículas de distinta naturaleza. Por lo que, en este caso, no se va a calcular dicha velocidad.

No obstante, otro parámetro, conocido como carga hidráulica, representa la velocidad de desplazamiento del agua en el equipo, que es opuesta a la velocidad de sedimentación de las partículas. Por lo tanto, sedimentarán aquellas partículas cuya velocidad de sedimentación sea mayor a la velocidad ascensional del agua y cuenten con el tiempo de residencia suficiente para caer hasta el fondo del decantador.

En consecuencia, las dimensiones de un decantador pueden calcularse para garantizar unos mínimos de carga hidráulica y unos tiempos de residencia o retención determinados.

Los equipos de decantación más utilizados son los decantadores: rectangulares, circulares y lamelares. La elección de uno u otro depende de factores de coste, terreno disponible y



experiencia del proyectista. En este caso, se va a diseñar un decantador de tipo circular por ser el tipo más utilizado en la mayor parte de las plantas depuradoras de España.

En el dimensionado de decantadores primarios, los valores normalmente utilizados son los siguientes<sup>16</sup> :

- Tiempo de retención: 1.5-3 h
- Carga hidráulica: 1.25-2.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h
- Carga sobre vertedero: < 10 m<sup>3</sup>/mh (para evitar arrastre de lodos con el clarificado del decantador)

De este modo, en función de la carga hidráulica, la superficie será:

$$S(m^2) = \frac{Q (m^3/h)}{Carga\ hidráulica (m^3/m^2h)}$$

Para Q = 150 m<sup>3</sup>/h:

$$S (m^2) = (60 - 120)$$

En función del tiempo de residencia, el volumen será:

$$V(m^3) = Q (m^3/h) * Tr (h)$$

$$V(m^3) = (225 - 400)$$

Y, en función de la carga sobre vertedero, la longitud perimetral del tanque será:

$$Carga\ sobre\ vertedero (m^3/mh) < \frac{Q (m^3/h)}{Longitud (m)}$$

$$Longitud (m) > 15$$

Considerando los rangos de dimensionamiento, las medidas del decantador podrán ser:

- Diámetro: 12 m
- Altura: 3 m
- Superficie: 115 m<sup>2</sup>

Entre las normas generales de diseño de los decantadores circulares, se recomienda:

- Una altura útil entre 2.5 y 4 metros.
- Pendiente de la solera del fondo de 1:10 a 1:12.

---

<sup>16</sup> SAINZ, Juan. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Ed. Fundación EOI Gregorio del Amo. Madrid-España, 2005.

- El diámetro del cono central estará comprendido entre el 10 y el 15% del diámetro del diámetro exterior del decantador.

Las dimensiones finales de los equipos vendrán definidas por los fabricantes.

## **5.6 Diseño de la sección de filtración y purificación**

Parte de estos sólidos – sobre todo los de mayor tamaño – sedimentarán en la etapa de pretratamiento. Sin embargo, la eficiencia de la sedimentación no es del 100%, por lo que es necesario aplicar un proceso de filtración posterior con el que se consiga retirar todas las partículas sólidas que puedan quedar en el agua residual.

La elección del tipo de membrana dependerá tanto del uso que se vaya a dar al agua reutilizada como de las características de los sólidos a retener.

Para poder reutilizar el agua en una planta química y generar agua de proceso, la cantidad de sólidos debe ser mínima para no provocar daños abrasivos en los equipos de la instalación. Además, es posible que en algún caso también sea necesario disponer de agua desmineralizada para aquellas aplicaciones en las que se requiera una baja salinidad del agua.

De este modo, la tecnología más empleada para garantizar la calidad del agua de proceso es la ósmosis inversa. Sin embargo, siempre se recomienda aplicar una filtración previa que retire un alto porcentaje de sólidos antes de purificar el agua en la OI. De este modo, la OI no podrá trabajar menos saturada y se generará un menor rechazo y mayor permeado.

Esa filtración previa tiene la función de “proteger” las membranas de ósmosis inversa y garantizar su rendimiento.

Con los datos de la distribución de tamaños de partícula se puede generar una gráfica que permita entender mejor cómo es la distribución de los sólidos presentes en esta corriente de agua residual.

De este modo, la distribución de sólidos se representa en la siguiente gráfica:

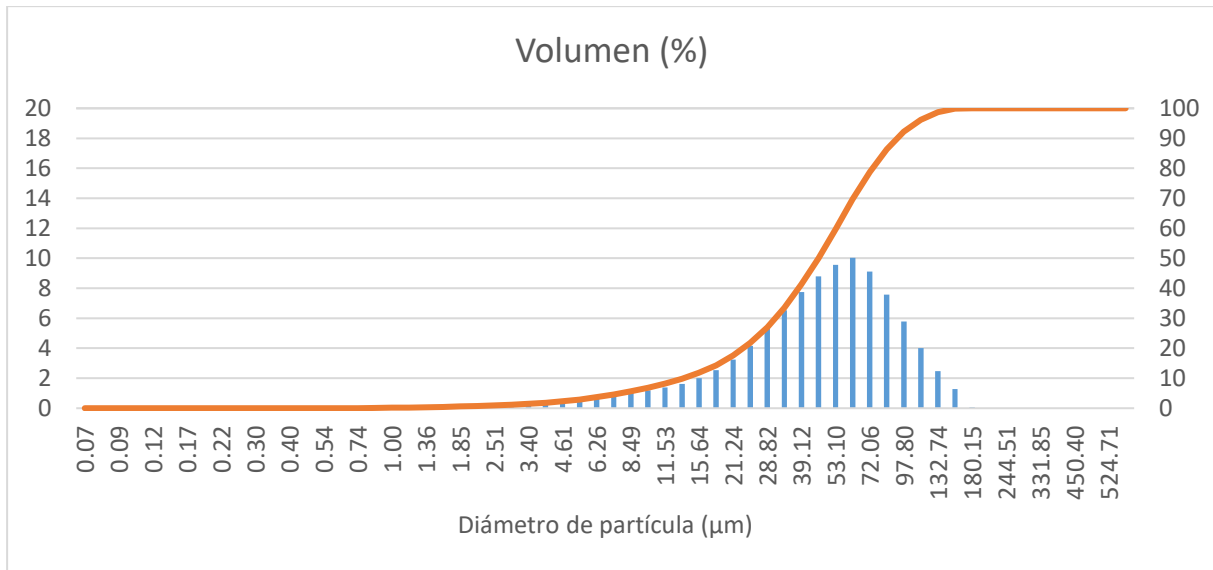


Figura 22. Representación de la distribución de tamaños de partícula

En el eje Y de la izquierda se puede ver el porcentaje de la población que representa cada barra. En el eje Y de la derecha se representan los valores de la curva de fracciones acumuladas. Por ejemplo, en la gráfica acumulada se puede ver que el 41.3% de las partículas tienen un tamaño inferior a 39.12 µm.

De los procesos de membrana anteriormente mencionados, con una tecnología de microfiltración sería suficiente para retener los sólidos descritos en la distribución de tamaños de partícula.

Las membranas usadas para la microfiltración tienen un tamaño de poro de 0.1 – 10 µm. Para el caso de esta distribución de tamaños, el 100% de las partículas tienen un tamaño superior a 0.1 µm. Por lo que las membranas de microfiltración serán capaces de retener los sólidos presentes.

Por otro lado, el resto de procesos de membrana, al tener tamaños de poro menores, también podrán retener todos los sólidos que se muestran en la distribución. Para determinar si usar microfiltración u otro proceso que retenga también partículas de menor tamaño, se debe atender a otros criterios.

Como se ha descrito en la sección 4.5.5, cada proceso de membrana suele trabajar en unos rangos de presión y flux determinados. Cuanto menor es el tamaño de poro, la presión osmótica que hay que vencer para que el agua pueda permear la membrana es mayor. En consecuencia, la presión requerida en la alimentación a los módulos de filtración también es mayor. Operar con presiones más altas requiere disponer de bombas con mayor presión diferencial y también mayor consumo de electricidad.

De este modo, la tecnología de filtración escogida para la corriente residual a tratar es la microfiltración.

Los principales aspectos a tener en cuenta en el diseño de las membranas son:

- Tamaño de poro
- Presión aplicada
- Presión transmembrana
- Incrustaciones en los poros de la membrana
- Superficie
- Número de bastidores y módulos
- Compatibilidad de materiales

### 5.6.1 Características de los módulos de microfiltración

Los módulos de microfiltración deberán tener capacidad suficiente para filtrar los 100 m<sup>3</sup>/h de agua que se pretende reutilizar. Sin embargo, la capacidad de filtración se ve determinada por el contenido de sólidos que tenga el agua, ya que, cuanto mayor sea el contenido de sólidos, las membranas tendrán mayor dificultad para dejar permear el agua debido a la presión entre las membranas. Además, cuanto mayor sea el contenido de sólidos también se incrementarán las limpiezas necesarias, perdiendo tiempo efectivo de filtrado por no poder filtrar mientras se está realizando una limpieza.

De este modo, la capacidad de los módulos de microfiltración debe sobredimensionarse teniendo en cuenta estos aspectos.

Como “regla de pulgar” pueden considerarse los siguientes valores de permeabilidad en función del tipo de agua que se vaya a filtrar:

Permeabilidad (lmh)	Tipo de agua
70-80	Aguas limpias
50-60	Aguas con contenido moderado de sólidos
30-40	Aguas sucias o residuales

Tabla 10. Rangos de permeabilidad en función del tipo de agua (Fuente: Bibliografía NALCO)

La permeabilidad de las membranas depende del tipo de agua que se filtre. Las corrientes sucias con sólidos, compuestos orgánicos y metales, hacen que el flux de la membrana sea mucho menor a la máxima capacidad estimada por diseño para agua completamente limpia y sin sólidos.

En el caso de estudio, se trata de un agua sucia o residual, por lo que la permeabilidad esperada en las membranas será de 30-40 lmh. No obstante, para una correcta optimización de la filtración, hay que tener en cuenta que las limpiezas son críticas para recuperar el rendimiento esperado (adaptando tiempos, secuencias y productos adecuados puedes recuperar totalmente la permeabilidad, de lo contrario se generan ensuciamientos que van limitando la filtración). Adicionalmente, la vida de las membranas también afecta considerablemente a la eficiencia de las mismas, pudiendo variar su permeabilidad.

Considerando:

- Un valor de presión transmembrana (TMP) medio: 1 bar
- Caudal: 100 m<sup>3</sup>/h

$$S (m^2) = \frac{Q \left(\frac{m^3}{h}\right) * 1000 \left(\frac{l}{m^3}\right)}{Perm \left(\frac{l}{m^2 h bar}\right) * TMP(bar)}$$

$$S (m^2) = \frac{100 \left(\frac{m^3}{h}\right) * 1000 \left(\frac{l}{m^3}\right)}{40 \left(\frac{l}{m^2 h bar}\right) * 1(bar)} = 2500$$

De este modo, la mínima superficie necesaria que deberán tener los módulos de microfiltración es de 2500 m<sup>2</sup>.

Una vez retirada la mayor parte de los sólidos, ya se dispone de un agua “limpia”. No obstante, para garantizar la calidad final del agua, se suele aplicar un tratamiento de ósmosis inversa en el que el agua es purificada.

## 5.7 Diseño de la sección de tratamiento de fangos

Los procesos de separación de sólidos de corrientes de aguas residuales, generan dos corrientes: la principal, que es agua regenerada y la secundaria, que son los lodos generados como purga del proceso. Estos lodos tendrán concentraciones de sólidos muy diluidas que será necesario concentrar y tratar antes de evacuarlos como residuo ya que, cuanto menor volumen de agua contenga la concentración de fangos, será más económico y menos complejo gestionar su tratamiento como residuo.

El objetivo final de esta sección de la planta es generar un sólido que sea estable, manejable y fácilmente evacuable a través de un camión a su destino final, que será una planta de tratamiento de residuos. Para conseguir esto, se recurre a varias etapas en el proceso de tratamiento de fangos. Estas etapas suelen ser: espesado de fangos, estabilización y deshidratación.

A continuación, se especifican las características de la sección de tratamiento de fangos generados a partir de la depuración de la corriente de agua residual objeto de estudio.

### 5.7.1 Espesador de fangos

El espesador de fangos debe diseñarse en función del dato de caudal de fango a tratar. Este fango procederá del fondo del decantador primario, donde por tiempo, se irá sacando el fango con una bomba de desplazamiento positivo capaz de manejar agua con sólidos.

La concentración en sólidos del fango primario dependerá del tipo de sólidos y de la operación del decantador: velocidad de decantación, tiempo de retención, etc.

Generalmente, la concentración de fangos procedentes del fondo de un decantador primario industrial suele oscilar entre el 2 y el 5%. En la etapa de espesamiento, se logra espesar el fango hasta concentraciones del 8-10%.

El fango que llegará al espesador puede estimarse a partir de la cantidad de sólidos que será capaz de evacuar el decantador primario:

$$\text{Producción de fango} = Tss \times \text{Caudal} \times \text{Rendimiento de eliminación}$$

Para valores usuales de rendimiento de eliminación de sólidos del 60% en la etapa de pretratamiento, la producción de fango en el decantador primario será:

$$\text{Producción de fango} = 100 \frac{mg}{l} \cdot \frac{100 m^3}{h} \cdot \frac{kg}{10^6 mg} \cdot \frac{10^3 l}{m^3} \cdot 60\% = 6 kg/h$$

Al tratarse de una concentración de sólidos muy pequeña, puede considerarse que la densidad del fango será similar a la del agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ). De este modo, la cantidad de sólidos por metro cúbico será:

$$\text{Densidad de sólidos} = (2 - 5)\% \text{ de sólidos} \cdot \frac{1000 kg}{m^3} = (20 - 50) kg \text{ de sólidos}/m^3$$

Asimismo, el fango extraído del decantador ocupará un volumen de:

$$\text{Volumen de fango primario} = \frac{6 kg}{h} \cdot \frac{m^3}{20kg} = 0.3 m^3/h$$

Una vez conocido el volumen de fango a tratar en el espesador, debemos conocer que el proceso de espesamiento puede realizarse principalmente en dos modalidades distintas:

- Por gravedad: utilizado generalmente para fangos primarios
- Por flotación: empleado con mayor frecuencia para fangos biológicos.

Tanto por criterio técnico como por criterio económico, en este caso, se empleará un espesador por gravedad para los fangos a tratar.

Este proceso es similar al proceso de decantación y también tiene como fundamento la mayor densidad del fango con respecto al agua. Los equipos suelen ser cilíndricos y con terminación en forma cónica en la parte del fondo para facilitar la extracción del fango espesado.

Para dimensionar un espesador de fangos, se debe garantizar<sup>17</sup> :

- Carga hidráulica: 0.6-1 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h
- Carga de sólidos: 80-120 kg/m<sup>2</sup>d
- Tiempo de retención: 24-36h
- Concentración del fango en la salida: 5-8%

De este modo, la superficie del espesador puede calcularse para ambas condiciones:

- Carga hidráulica:

$$S (m^2) = \frac{Q(m^3/h)}{CH (m^3/m^2 h)}$$

$$S (m^2) = \frac{0.3 \left( \frac{m^3}{h} \right)}{0.6 \left( \frac{m^3}{m^2 h} \right)} = 0.5$$

- Carga de sólidos:

$$S (m^2) = \frac{Fango (kg \text{ de sólidos/h})}{CS (kg/m^2 h)}$$

$$S (m^2) = \frac{6 \left( \text{kg de } \frac{\text{sólidos}}{\text{día}} \right)}{\frac{80}{24} \left( \frac{\text{kg}}{m^2 \text{ día}} \right)} = 1.8$$

El volumen del equipo necesario se puede calcular con el criterio de garantizar el tiempo de residencia recomendado para el espesamiento:

$$Vol (m^3) = 0.3 \frac{m^3}{h} \cdot 36h = 10.8$$

El mayor valor obtenido para la superficie del equipo ha sido de 1.8 m<sup>2</sup>. Por lo tanto, la altura del equipo será:

$$H(m) = \frac{10.8 m^3}{1.8 m^2} = 6$$

Por lo tanto, las medidas del espesador podrán ser:

---

<sup>17</sup> SAINZ, Juan. *Op cit.*, p. 376

- Altura: 6 m
- Diámetro: 1.6 m
- Superficie: 2 m<sup>2</sup>

### **5.7.2 Estabilización del fango**

El objetivo de la estabilización de fangos es limitar la degradación de la materia mediante la eliminación de la materia orgánica biodegradable. La estabilización de fangos es necesaria cuando los fangos proceden de procesos biológicos o cuando los sólidos decantados son materia orgánica no estable.

En el caso de la corriente de estudio, la procedencia de los sólidos es principalmente inorgánica (partículas con mayor densidad del agua que decantan). La presencia de materia orgánica en la fracción de fondo del decantador primario es despreciable.

De este modo, en este caso no será necesario disponer de un proceso de estabilización de fangos y pueden ahorrarse los costes relativos a la instalación de estos equipos.

### **5.7.3 Deshidratación de fangos**

El fango procedente del fondo del espesador aún tiene una concentración de fango entre el 8 y el 10%, suponiendo un volumen de residuo significativo. Para reducir su volumen y concentrar el fango, se recurre a los procesos de deshidratación. Los procesos de deshidratación pueden secar el fango hasta concentraciones entre 15-40%.

Los lodos de origen industrial, pueden contener residuos peligrosos debido a los productos químicos empleados en la planta industrial. En estos casos es de gran importancia conseguir la mayor deshidratación posible para generar la menor cantidad de residuo peligroso por dos motivos: económico (coste de gestión del volumen de residuo peligroso) y medioambiental.

Se pueden emplear distintas técnicas para deshidratar el fango:

- Eras de secado

Consiste en un lecho de arena sobre el que se desemboca el fango.

Se suelen utilizar para fangos procedentes de pequeñas depuradoras urbanas.

Es una técnica que requiere mucha mano de obra para poder extraer el fango deshidratado.

- Centrifugación

La centrifugación de lodos se basa en la separación de las partículas de fango, con mayor densidad que el agua, mediante la acción de fuerzas centrífugas. Por acción de la fuerza centrífuga, las partículas se separan en función de su densidad y tamaño, siendo mucho más



eficiente la separación de las partículas de mayor tamaño. Para limitar esta diferencia en la separación, se suelen emplear polielectrolitos que facilitan la floculación de las partículas y, por tanto, un aumento de su tamaño para facilitar la separación.

- Filtración a vacío

El equipo está formado por un tambor giratorio en cuya superficie hay una tela filtrante y que se encuentra parcialmente dentro de un depósito con nivel de lodo. Por acción del vacío, desde el interior del tambor se succiona el lodo, pegándolo a la tela. Las partículas de fango quedarán adheridas a la tela formando una torta, mientras que el agua se filtrará a través del filtro hasta el interior del tambor. Mientras el tambor sigue girando, la torta de fango se separa de la tela con la ayuda de una cuchilla o rasqueta, mientras que el agua del interior del tambor se envía hacia otro depósito.

Debido al elevado coste de este equipo y de su operación, no es habitual encontrarlo en sistemas de deshidratación de fango. No obstante, los filtros de vacío tienen gran aplicación como operación de separación de corrientes de proceso sólido-líquido.

- Filtros prensa

Los filtros prensa son un conjunto de filtros colocados verticalmente y enfrentados entre sí. El fango se introduce entre los filtros y, por presión, se filtra el agua. El fango adherido al filtro se separa mediante soplado con aire. Este equipo funciona en fases, deshidratando en unos filtros y soplando en otros alternamente.

- Filtros de bandas

Estos equipos están formados por dos filtros o bandas de filtro. El fango se vierte sobre la banda superior, donde es parcialmente separado por acción de la gravedad. Las bandas van girando y el fango cae sobre la segunda banda, es decir, entre ambas bandas. En esta fase, las bandas se van desplazando con la ayuda de unos rodillos que, además, ejercen presión sobre el fango y facilitan el filtrado del agua. Al final del filtro, la separación de las bandas permite la caída del fango hacia un contenedor o depósito desde donde será transportado a su destino final.

La elección del proceso para deshidratar los fangos se determinará a partir de varios factores:

- Costes relativos al desplazamiento del fango deshidratado hasta su destino final
- Costes de instalación
- Costes de operación y mano de obra
- Destino final: vertedero, compostaje, incineración, etc.
- Limitaciones fijadas por el vertedero

Los sistemas más empleados para deshidratar fangos de plantas industriales son los filtros prensa, los filtros de bandas y las centrífugas.

## 6 CONCLUSIONES

---

En el contenido del presente trabajo se encuentra una descripción y un diseño conceptual de una planta de reutilización de agua aplicada para una corriente de agua residual industrial conocida. Adicionalmente, a partir del diseño y descripción de los principales equipos se comprende y pone en práctica una de las funciones de los ingenieros de medioambiente y sostenibilidad: el diseño de procesos que contribuyan a reducir el impacto ambiental que genera la industria.

El diseño conceptual de la planta de reutilización propuesta incluye:

- Configuración y esquema de la planta de reutilización
- Elección de las técnicas de eliminación de sólidos y tratamiento posterior
- Características y dimensiones de los equipos principales

Los equipos cuyo diseño conceptual ha sido reflejado en este documento son:

- Tanques de coagulación, floculación y sedimentación
- Módulos de microfiltración y ósmosis inversa
- Equipos para el tratamiento de los fangos primarios

No obstante, independientemente del tratamiento finalmente escogido, el modo de operación posterior de estos equipos es crucial para maximizar su eficiencia y alargar su vida útil. Para ello, se propone aplicar siempre el concepto de mejora continua. Ya que, la gestión del impacto de los procesos al medioambiente es un ejercicio continuo, no un proyecto que una vez ejecutado se acaba. Existen multitud de posibilidades válidas para tratar las aguas residuales industriales, adecuarlas al uso que se les va a dar y cumplir con la legislación.

Independientemente de las tecnologías disponibles, es necesario tener presente que una gran parte del impacto ambiental se verá afectado por la manera de operar dichos procesos y cómo se gestionen los residuos generados. De este modo, para aplicar la filosofía de mejora continua, puede emplearse el ciclo PDCA (plan-do-check-act). A través de este ciclo, se tenga o no la mejor tecnología disponible, se podrá operar y mantener la planta de la mejor manera posible para reducir costes, aumentar la fiabilidad de los equipos y reducir el impacto ambiental.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Estudios era ampliar los conocimientos del estudiante en materia de las técnicas de reutilización de agua en el entorno industrial. Este objetivo ha sido conseguido y se ha profundizado en el conocimiento de esta área mediante un estudio bibliográfico activo y autónomo.

La realización del Trabajo de Fin de Máster, ha permitido obtener como conclusiones más relevantes las siguientes:

- Existen numerosos procesos para retirar los sólidos contenidos en aguas residuales.
- Algunas técnicas requieren emplear grandes cantidades de energía, aumentando el impacto energético del proceso en propósito de reducir la huella hídrica.
- El consumo neto de agua en el complejo industrial podría reducirse hasta una huella hídrica igual a cero en un proceso totalmente integrado.

Finalmente, a pesar de que los objetivos propuestos se han cumplido, quedan campos que podrían seguir desarrollándose en el ámbito de estudio, tales como: una comparación de estas técnicas con las mejores tecnologías disponibles publicadas por la Unión Europea, el empleo de algún software para realizar los cálculos de proceso, la estimación económica preliminar de los costes de instalación y operación, etc.

## 7 REFERENCIAS

---

AEDyR, ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE DESALACIÓN Y REUTILIZACIÓN. Cifras de reutilización de agua en España, Mayo 2019. Disponible en: <<https://www.aedyr.com/es/blog/cifras-reutilizacion-agua-espana>>

BRINKMANN, Thomas, et al. Best available techniques (BAT) reference document for common wastewater and waste gas treatment/management systems in the chemical sector. Publications Office of the European Union, 2016.

CARRETERO DEL POZO, Paula. Copolímeros poliamida-g-PEG: síntesis, caracterización, y aplicación como membranas. 2012. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.

CLARA, Manfred, et al. The solids retention time—a suitable design parameter to evaluate the capacity of wastewater treatment plants to remove micropollutants. *Water research*, 2005, vol. 39, no 1, p. 97-106. A este no tengo acceso

DIRECTIVE, Council. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council. *Off. J. Eur. Union L*, 2010, vol. 334, p. 17-119.

Depuración y desinfección de aguas residuales Autor(es): HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio Edición: Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2001. ISBN: 978-84-380-0190-5

GUO, Qizhong. Correlation of total suspended solids (TSS) and suspended sediment concentration (SSC) test methods. Rutgers University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2006.

IUPAC, Terminology for Membranes and Membrane Processes, 1996.

Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. Jefatura del Estado «BOE» núm. 161, de 6 de julio de 2001 Referencia: BOE-A-2001-13042.

Plus, A., Getting started modeling processes with solids. 2000, Aspen Technology, Inc.

Plus, A., 12, 1 User Guide, Aspen Technology. 2003, Inc.

Ortiz, M. et al., Modelos matemáticos de la colmatación de membranas en microfiltración tangencial. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN* VOL. 28 No. 1, ABRIL DE 2008 (123-132).

Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Ministerio de la Presidencia «BOE» núm. 294, de 8 de diciembre de 2007 Referencia: BOE-A-2007-21092.

SAINZ, Juan. Tecnologías para la sostenibilidad: procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales. Ed. Fundación EOI Gregorio del Amo. Madrid-España, 2005.