



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DE UN PROCESO DE
TRATAMIENTO DE $120 m^3/día$ DE AGUAS
RESIDUALES DE LA INDUSTRIA
PETROQUÍMICA DE PRODUCCIÓN DE
METANOL MEDIANTE TECNOLOGÍA DE
MEMBRANAS.**

AUTOR: FRANCISCO JAVIER GARCÍA GÁMEZ

TUTORAS: MARIA CINTA VINCENT VELA
BEATRIZ ELENA CUARTAS URIBE

Curso Académico: 2020-21

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar la gracias a mis tutoras Maria Cinta Vincent Vela y Beatriz Elena Cuartas Uribe por su apoyo, esfuerzo y dedicación hacia este trabajo de fin de grado.

También me gustaría agradecer a mis padres y mis amigos por todo su apoyo desde siempre.

RESUMEN

El metanol es un producto químico sumamente versátil que se utiliza como intermediario en la producción de una gran cantidad de artículos como fibras, plásticos, pinturas, revestimientos, combustibles o aditivos.

La demanda de metanol es de aproximadamente 80 millones de toneladas al año, por lo que en su proceso de fabricación se utiliza una gran cantidad de agua y como consecuencia el agua residual generada acaba contaminada.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se realiza el diseño de un tratamiento de las aguas residuales provenientes de una planta de producción de metanol para su reutilización. Se han analizado diferentes alternativas para diseñar la instalación con el fin de seleccionar la más adecuada enfocando el tratamiento mediante tecnología de membranas.

Teniendo en cuenta los parámetros físico-químicos del agua residual y los parámetros de calidad requeridos del agua depurada para su reutilización, se ha procedido a seleccionar el tratamiento más efectivo. A continuación, se ha diseñado la planta de tratamiento de agua residual para tratar un caudal de $120 \text{ m}^3/\text{d}$.

Palabras clave: metanol; aguas residuales; membranas; reutilización

ABSTRACT

Methanol is a highly versatile chemical that is used as an intermediate in the production of a large number of items such as fibers, plastics, paints, coatings, fuels, or additives.

The demand for methanol is approximately 80 million tons per year, therefore a large amount of water is used in its manufacturing process and as a consequence the wastewater generated ends up being contaminated.

In this Final Degree Project, the design of a treatment for wastewater from a methanol production plant for its reuse is carried out. Different alternatives have been analyzed to design the installation in order to select the most suitable one focusing the treatment on using membrane technology.

Taking into account the physical-chemistry parameters of the wastewater and the required quality parameters of the treated water for its reuse, the most effective treatment has been selected. Next, the wastewater treatment plant has been designed to treat a 120m³/d.

KEY WORDS: methanol; wastewater; membranes; reuse

RESUM

El metanol és un producte químic summent versàtil que s'utilitza com a intermediari en la producció d'una gran quantitat d'articles com a fibres, plàstics, pintures, revestiments, combustibles o additius.

La demanda de metanol és d'aproximadament 80 milions de tones a l'any, per la qual cosa en el seu procés de fabricació s'utilitza una gran quantitat d'aigua i com a conseqüència l'aigua residual generada acaba contaminada.

En el present Treball de Fi de Grau es realitza el disseny d'un tractament de les aigües residuals provinents d'una planta de producció de metanol per a la seua reutilització. S'han analitzat diferents alternatives per a dissenyar la instal·lació amb la finalitat de seleccionar la més adequada enfocant el tractament mitjançant tecnologia de membranes.

Tenint en compte els paràmetres físico-químics de l'aigua residual i els paràmetres de qualitat requerits de l'aigua depurada per a la seua reutilització, s'ha procedit a seleccionar el tractament més efectiu. A continuació, s'ha dissenyat la planta de tractament d'aigua residual per a tractar un cabal de 120 m³/d.

PARAULES CLAU: metanol; aigües residuals; membranes; reutilització

DOCUMENTO 1:

MEMORIA

Contenido

1. OBJETIVO	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
.....	2
2.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA.....	2
2.2 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA.....	3
3. INTRODUCCION	4
3.1 Antecedentes	4
3.2 El agua como recurso natural.....	4
3.3 Características de las aguas residuales	5
3.4 La reutilización del agua residual en España.....	7
3.4.1. Legislación actual nacional.....	8
3.4.2 Legislación actual de la Comunidad Valenciana.....	9
3.5 El Metanol	10
3.5.1. Proceso para la producción de metanol	11
3.5.2 Producción y usos del metanol	13
3.6 Tratamientos de las aguas residuales	13
4. CARACTERISTICAS DEL AGUA RESIDUAL	15
5. METODOS CONVENCIONALES.....	16
5.1 Adsorción.....	16
5.2 Reactor anaerobio de flujo ascendente (Tratamiento biológico).....	19
5.3 Reactores biológicos de membrana (MBR).....	22
6. TECNOLOGIA DE MEMBRANAS	25
6.1 Clasificación de las membranas	26
6.2 Tipologías de operación	27
6.3 Configuraciones de las membranas	28
6.4 Método de limpieza de membranas	28
6.3 Factores que reducen las prestaciones de las membranas	30
6.4 Electrodialisis.....	31
6.5 Microfiltración.....	33
6.6 Ultrafiltración	33
6.7 Nanofiltración.....	34
6.8 Osmosis inversa.....	34
7. DESCRIPCION DEL TRATAMIENTO ELEGIDO.....	37

8 DISEÑO DE LA INSTALACION DE UF.....	41
8.1 Cálculo del número de módulos necesarios y rendimiento.....	45
8.2 Tanque de almacenamiento de la corriente de entrada.	48
8.3 Tanque de almacenamiento del agua de permeado para el proceso de limpieza.	48
8.4 Tanque de almacenamiento de mezcla	49
8.5 Tanque de ácido y base.....	49
9 DISEÑO DE LA INSTALACION DE OI	50
9.1 Diseño del primer paso de membrana.....	50
9.1.1 Caudales del primer paso de OI	51
9.1.2 Cálculo del número de módulos necesario	52
9.2 Diseño de la instalación de OI (Segundo paso de membrana)	53
9.2.1 Caudales del primer paso de OI	54
9.2.2 Cálculo del número de módulos necesario	55
9.3 Limpieza de las membranas de OI	56
10. ELEMENTOS SECUNDARIOS DE LA PLANTA.....	57
10.1 Bombas.....	57
10.2 Válvulas	58
10.3 Agitador de mezcla.....	59
10.4 Caudalímetros	59
10.5 Manómetros.....	60
10.6 Controlador PID.....	60
10.7 Sensor de temperatura.	61
10.8 Sensor de nivel	61
10.9 Medidor de pH	62
10.10 Compresor.....	62
10.11 Tuberías.....	63
11. DESCRIPCION DE LOS PROCESOS QUE TIENEN LUGAR EN LA PLANTA	64
11.1 UF en modo operación.....	64
11.2 Limpieza a contralavado de UF	65
11.3 Limpieza CEB Y CIP	67
11.4 Sistema de OI	69
12. CONCLUSIONES	70
Bibliografía	71

Diseño de un proceso de tratamiento de 120 m³/día de aguas residuales de la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas.

1. PRESUPUESTO	87
1.1 Bombas.....	87
1.2 Válvulas	88
1.3 Tuberías.....	89
1.4 Elementos principales	90
1.5 Elementos secundarios	91
2. PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCION DEL MATERIAL.....	92
3. PRESUPUESTO DE EJECUCION POR CONTRATA	92
4. PRESUPUESTO DE INVERSION	92

1. OBJETIVO

Este trabajo final de grado tiene como objeto diseñar un proceso para el tratamiento de los efluentes líquidos procedentes de una planta petroquímica de producción de metanol para su posterior reutilización, disminuyendo su impacto medioambiental.

Para lograr el objetivo establecido será necesario desarrollar otros más específicos como pueden ser:

- Estudiar las características físico-químicas de los efluentes de este tipo de instalaciones.
- Realizar una exhaustiva búsqueda bibliográfica para los diferentes métodos de tratamiento existentes para este tipo de aguas residuales y evaluar sus ventajas e inconvenientes.
- Evaluar los diferentes métodos que existen para el tratamiento de los efluentes líquidos procedentes de una planta petroquímica de producción de metanol. Este estudio, permitirá justificar y seleccionar la mejor alternativa de tratamiento para la planta.
- Elegir el tratamiento más adecuado con su correspondiente justificación, acompañado de un estudio más detallado.
- Diseñar la instalación de tratamiento que permita reutilizar este tipo de aguas, junto con la elaboración de planos y presupuesto.

2. JUSTIFICACIÓN

2.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

El proceso de industrialización ha marcado la segunda mitad del siglo XX de tal forma que durante este período se iniciaron muchas de las actividades industriales las cuales se han acelerado desde el final de siglo.

Esta transformación ha traído consigo multitud de ventajas tanto a nivel socioeconómico como en la calidad de vida de las personas, pero también ha supuesto un crecimiento desmesurado de la interacción humana con el medioambiente de formas negativa. Esta aceleración de la industrialización global está afectando en gran medida a los ecosistemas, acelerando la contaminación ambiental, la deforestación, el cambio climático o la escasez de agua entre otras dificultades.

Uno de los problemas más importantes y que más problemas trae es la escasez de agua pues el agua es un elemento de la naturaleza fundamental para el mantenimiento de la vida en todo el planeta, es reguladora de los ecosistemas terrestres, manteniendo un equilibrio necesario para la subsistencia animal y vegetal.

Según la Organización Mundial de la Salud, 50 litros de gasto de agua por habitante y día es la cantidad adecuada de consumo. A esa cantidad hay que añadirle la que se necesita para la agricultura y la industria. De los aproximadamente 4000 km³ de agua dulce para consumo humano que se extraen en el mundo, el 65% se destina a la agricultura, el 25% a la industria y el 10% al consumo doméstico.

Como se ha comentado, la creciente industrialización acentúa el consumo de agua mundial y con ello la escasez de esta. El agua es utilizada en la industria para una gran variedad de aplicaciones como generación de vapor, lavado, enfriamiento de equipos de fabricación. También usada como refrigeración en plantas de energía nuclear y combustibles fósiles.

El agua que se utiliza en las industrias no es la que representa el mayor porcentaje del consumo total de agua, pero sí es la más contaminante, es por ello por lo que la mayor parte acaba convertida en aguas residuales cuyas derivaciones sobre el medio ambiente son muy perniciosas. En España, tan solo un 10.74% del agua residual fue reutilizada en 2019. Es por ello, que se debe profundizar en el tratamiento de aguas residuales, pues un mayor porcentaje de reutilización provocaría una gran disminución en los efectos perjudiciales que supone verter estas aguas.

Uno de los problemas para el desarrollo en este ámbito es que hay multitud de industrias diferentes que contaminan el agua con diferentes compuestos, por lo que desarrollar un sistema de tratamiento para muchas industrias es complicado.

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica sistemática centrada en el estudio de las diferentes técnicas de tratamiento de agua existentes en la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas con el que poder tratar gran parte de las aguas residuales de este sector y que puedan ser reutilizadas.

Un buen sistema de recuperación de aguas es vital en este sector ya que puede aportar las siguientes ventajas:

- Da como resultado aguas más limpias y menores costos operativos.
- Elimina o reduce la necesidad de supervisión/asistencia y mantenimiento.
- Mejora el proceso a fin de cumplir con las disposiciones ambientales locales, estatales y federales.

2.2 JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

Respecto al marco académico, el objetivo de este trabajo es demostrar y consolidar todos los conocimientos adquiridos en el Grado en Ingeniería Química.

De esta forma, las bases de este trabajo son las competencias desarrolladas durante las diferentes asignaturas del curso. Cabe destacar la asignatura de Proyectos de Ingeniería Química que ha proporcionado un gran número de competencias que han sido de gran ayuda para el correcto desarrollo de la memoria y la posibilidad de realizar los planos y el presupuesto de explotación, tales como:

- i. Conocimientos para la realización de mediciones, cálculos, valoraciones, tasaciones, peritaciones, estudios, informes.
- ii. Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.
- iii. Resolver problemas con iniciativa propia y con espíritu emprendedor.
- iv. Gestionar la información procedente de diversas fuentes y, en su caso, las herramientas informáticas de búsqueda y clasificación de recursos bibliográficos o de información mono o multimedia.

Por otra parte, la asignatura de Tecnología del Medio Ambiente introdujo los conocimientos sobre tratamientos de aguas residuales y algunas competencias muy importantes como:

- i. Tomar decisiones y razonar de forma crítica.
- ii. Conocimientos básicos y aplicación de las tecnologías medioambientales y sostenibilidad.
- iii. Diseñar equipos, instalaciones y servicios en la industria química.
- iv. Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Por último, resaltar la asignatura de Procesos en Ingeniería Química que permitió el saber realizar diagramas de bloques y de flujo necesarios para este trabajo.

3. INTRODUCCION

3.1 Antecedentes

La compañía Orange County District (OCWD) publicó en 1973 el informe "Water Factory 21: waste water reclamation & sea water barrier facilities". En dicho informe se trataban los principales procesos que se utilizaban en aquellos años en cuanto a la reutilización del agua, en él también se trataban las instalaciones necesarias, las normativas de calidad del agua, los criterios de diseño y costes de explotación y mantenimiento. (Asersa, 2021)

En cuanto al uso de membranas, es en la propia OCWD donde en 1977 se realiza la primera aplicación de tecnología de membranas para la reutilización de agua residual. En concreto utilizaron membranas de ósmosis inversa junto con pretratamientos de sedimentación y filtración con el fin de proteger las membranas del ensuciamiento. Más adelante (finales del s.XX) se empezaría a utilizar procesos combinados de membrana en aplicaciones a gran escala. (OCWD, 2019)

Actualmente, el uso de la tecnología de membranas ha aumentado y evolucionado significativamente en tanto que se hoy en día se utilizan membranas de microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF), ósmosis inversa (OI) o electrodiálisis (ED).

También han aparecido una gran cantidad de procesos que utilizan esta tecnología como los reactores biológicos de membrana (MBR) el cual combina los procesos de degradación biológica y separación por membrana en uno único.

Con relación a España, la normativa del Real Decreto 1620/2007 marca las condiciones necesarias para la reutilización del agua; "El Gobierno establecerá las condiciones básicas para la reutilización de las aguas, precisando la calidad exigible a las aguas depuradas según los usos previstos. El titular de la concesión o autorización deberá sufragar los costes necesarios para adecuar la reutilización de las aguas a las exigencias de calidad vigentes en cada momento". (Boletín Oficial del Estado, 2007)

Según el destino del agua residual tratada (agrícola, vertido, urbano o reutilización en la propia industria) se admiten unas condiciones de calidad del agua específicos.

3.2 El agua como recurso natural

Sin la colaboración de la población en todo el mundo en cuanto al consumo moderado del agua no sería posible controlar la escasez del agua y es que esta, es una realidad que sufren muchos habitantes de las zonas afectadas por sequías.

El aumento de la demografía y economía en todo el mundo junto con la escasez de medidas y criterios sobre el control de los recursos naturales es lo que provoca este problema. También influye la contaminación de las aguas superficiales o de los acuíferos y a la gran variación en las precipitaciones.

El agua está siendo un factor limitativo del desarrollo de muchos países constituyendo un ambiente de escasez, sobreexplotación de esta y contaminación. Esto obliga a los gobiernos a implementar planes de restricción.

Mediante la implementación de un mayor número de desalinizadoras y depuradoras se puede aumentar la producción de agua dulce y de esta forma, mantener los recursos de agua dulce, que no son inagotables. (Jordan Hristov, 2021)

3.3 Características de las aguas residuales

En vista del crecimiento de la población mundial y al ya comentado gran crecimiento industrial, se han alcanzado unos niveles máximos en la actualidad respecto a la contaminación del medio hídrico. Sumado a la gran concentración urbana e industrial en determinadas áreas.

Para prevenir esta contaminación del medio hídrico surgen todos aquellos procesos y operaciones unitarias, enfocadas en el tratamiento y depuración de las aguas residuales, tanto urbanas, como industriales, de forma que el vertido a cauce o la propia recirculación se realiza en las mejores condiciones posibles, de forma que se eviten al máximo cualquier alteración producida por las aguas residuales.

Ya desde el punto de vista industrial, se están estudiando cada vez más, nuevas formas de reducir y tratar los efluentes que se puedan llegar a generar en sus procesos, ya que las diferentes Administraciones tanto de la Unión Europea, Estatal, Comunidades Autónomas y Ayuntamientos, están cada vez más regulando la cantidad y composición de los efluentes. Una de las formas más económicas y que menos contaminación produce es la de establecer un sistema de recirculación. (Sastre, 2005)

Las características físicas más importantes de las aguas residuales industriales son:

- **Color:** El color del agua residual de salida depende principalmente del tipo de proceso en el que se ha utilizado o de las sustancias con las que he estado en contacto. En el caso en el que el agua residual es para verter a cauce supone un gran problema ya que produce efectos estéticos perjudiciales, afecta a la visión de los peces y reduce la fotosíntesis. En este caso, como el agua se va a reutilizar, cuando se eliminan los sólidos en suspensión y grasas y aceites, el color negro característico de las aguas residuales de esta industria se volverá mucho menos intenso. (Sastre, 2005)
- **Temperatura:** Depende del uso del agua en la industria, en este caso, se suele utilizar entre otras utilidades, para refrigeración de corrientes, por lo que se considera que el rango de temperaturas en el que se encuentra está entre 20-30 °C. (Torres)
- **Olor:** Los malos olores de las aguas residuales surgen con el paso del tiempo debido al desprendimiento de gases y la descomposición anaerobia de la materia orgánica.

Las propiedades químicas y físicas del agua residual son dadas por sus componentes orgánicos e inorgánicos. Los primeros pueden ser de origen animal, vegetal o sintético, son biodegradables y fácilmente eliminables por oxidación. Los compuestos inorgánicos son todos aquellos de origen mineral como arenas, gravas, lodos, sulfatos, etc.

En cuanto a los contaminantes principales de las aguas residuales, se encuentran:

- **Sólidos en suspensión:** Están referidos al material que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua residual. Son aquellos que se quedan retenidos en un filtro de fibra de vidrio con un tamaño de poro de 0.45 micras.

A raíz de la existencia de estos sólidos en suspensión (SS) provoca un aumento de la turbidez que dependerá de la cantidad y tamaño de los SS que existan en el agua. Asimismo, afectan negativamente al color del agua resultando en un agua con aspecto residual. Los SS aparecen en las aguas residuales de este tipo de industrias de las siguientes fuentes: unidades de destilación, agua de lastre, craqueo catalítico o hidrotreatmento. (GEDAR, 2018)

- **Demanda biológica de oxígeno (DBO₅) y Demanda química de oxígeno (DQO):** Son dos parámetros que miden la cantidad de materia orgánica que está presente en el agua. La DBO_5 es la cantidad de oxígeno necesaria para los microorganismos para eliminar la materia orgánica biodegradable del agua residual, en unas condiciones de 20°C y en 5 días. En un agua residual de una planta petroquímica podemos encontrar DBO_5 en una concentración de 150-250 mg/L. La DQO es la cantidad de oxígeno requerido para para la oxidación de la materia orgánica y algún compuesto inorgánico, por medio de reactivos químicos.

En un agua residual de una planta de producción de metanol podemos encontrar DQO en una concentración de 300mg/L. La relación DBO_5 / DQO indica cómo de biodegradable es un agua residual, valores inferiores a 0,2 se considera que no es suficientemente biodegradable como para utilizar tratamientos biológicos en el agua residual.

- **Grasas y aceites:** Estos componentes vienen principalmente de unidades de destilación, hidrotreatmento, craqueo catalítico o cáustico gastado. Tienen una concentración media de 600 mg/L en este tipo de plantas.

En este grupo se incluyen los que no sean solubles en el agua y tengan menor densidad que ésta. Estos compuestos presentan una gran problemática y es que debido a la gran tensión superficial que tienen hacen que ocupen grandes superficies, aunque su composición sea reducida. Además, debido a que en este tipo de plantas en las que el agua puede presentar derivados del petróleo, pueden surgir atmósferas explosivas o tóxicas.

Tanto si el agua se va a verter a cauce como si se va a reutilizar, es muy importante la eliminación casi total de este tipo de contaminantes. (Jafarinejad, 2017)

- **Metales pesados:** Los metales pesados (níquel, mercurio, cromo, cinc, etc.) ejercen un efecto perjudicial sobre los procesos biológicos, ya que actúan sobre las enzimas catalizadoras de la síntesis de proteínas responsables del metabolismo, de tal forma que los microorganismos tan solo pueden tolerar concentraciones de estos compuestos del orden de algunos miligramos por litro. En el caso del agua residual que se produce en una planta de producción de metanol únicamente se encuentra el Cobre (aproximadamente 0.25 ppm).

3.4 La reutilización del agua residual en España

En el siglo XX la Administración Hidráulica hizo sus primeras aproximaciones al problema de control de la contaminación, los vertidos debían ser controlados en función de la tipología del cauce al que vertían. En la década de los 70 el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX preparó unas Recomendaciones (1974) para el Diseño de Instalaciones de Depuración. Por lo que las instalaciones que se construyeron en España en esta década debían permitir un efluente con las características de la Tabla 1:

Tabla 1. Características del agua residual que debían cumplir las instalaciones en España a partir de 1974.

Contaminantes	Valor máximo
Sólidos en suspensión	≤ 35 ppm
DBO5	≤ 35 ppm
Contaminación bacteriológica expresada en Escherichia coli nmp	≤ 1000/100 mL

Con la aprobación de la Ley de Aguas en 1985 se instauraron las bases del tratamiento de aguas residuales en España y eso ha permitido que desde ese tiempo hasta el Real Decreto 1620/2007 los tratamientos de regeneración han permitido obtener un agua de gran calidad.

3.4.1. Legislación actual nacional

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental.
- Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Tabla 2. Criterios de calidad para la reutilización de las aguas según usos. (Boletín Oficial del Estado, 2007)

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	Nematodos Intestinales	<i>Escherichia Coli</i>	Sólidos en Suspensión	Turbidez	Otros Criterios
1.-Usos Urbanos					
Calidad 1.1 Residencial	1 huevo/10 l	0 UFC ¹ /100 ml	10 mg/l	2 UNT ²	<i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/l
Calidad 1.2 Servicios	1 huevo/10 l	200 UFC/100 ml	20 mg/l	10 UNT	
2.-Usos Agrícolas					
Calidad 2.1 Riego en contacto	1 huevo/10 l	100 UFC/100 ml	20 mg/l	10 UNT	<i>Legionella spp.</i> : 1.000 UFC/l
Calidad 2.2 Riego pastos	1 huevo/10 l	1.000 UFC/100 ml	35 mg/l	No se fija	<i>Taenia Saginata</i> y <i>Taenia Solium</i> : 1 huevo/l
Calidad 2.3 Riego flores	1 huevo/10 l	10.000 UFC/100 ml	35 mg/l	No se fija	<i>Legionella spp.</i> : 1.000 UFC/l
3.-Usos Industriales					
Calidad 3.1 Agua de proceso	No se fija	10.000 UFC/100 ml	35 mg/l	15 UNT	<i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/l
Industria alimentaria	1 huevo/10 l	1.000 UFC/100 ml	35 mg/l	No se fija	<i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/l
Calidad 3.2 Torres refrigeración	1 huevo/10 l	Ausencia UFC/100 ml	5 mg/l	1 UNT	<i>Legionella spp.</i> : Ausencia UFC/l
4.-Usos Recreativos					
Calidad 4.1 Golf	1 huevo/10 l	200 UFC/100 ml	20 mg/l	10 UNT	<i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/l
Calidad 4.2 Estanques	No se fija	10.000 UFC/100 ml	35 mg/l	No se fija	PT: 2 mg P/l en agua estancada
5.-Usos Ambientales					
Calidad 5.1 Acuíferos percolación	No se fija	1.000 UFC/100 ml	35 mg/l	No se fija	NT: 10 mg N/l
Calidad 5.2 Acuíferos inyección	1 huevo/10 l	0 UFC/100 ml	10 mg/l	2 UNT	NO ₃ : 25 mg NO ₃ /l
Calidad 5.3 Silvicultura	No se fija	No se fija	35 mg/l	No se fija	
Calidad 5.4 Otros usos	La cantidad mínima se estudiará caso por caso				

- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Diseño de un proceso de tratamiento de 120 m³/día de aguas residuales de la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas.

- Resolución de 25 de mayo de 1998, de la Secretaría de Estado de Aguas y Costas, por la que se declaran las «zonas sensibles» en las cuencas hidrográficas intercomunitarias.
- Prevención y el Control Integrados de la Contaminación, IPPC
- Orden AAA/2056/2014, de 27 de octubre, por la que se aprueban los modelos oficiales de solicitud de autorización y de declaración de vertido.
- Resolución de 10 de julio de 2006, de la Secretaría General para el Territorio y la Biodiversidad, por la que se declaran las Zonas Sensibles en las Cuencas Hidrográficas Intercomunitarias.
- Resolución de 30 de junio de 2011, de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias.
- Orden ARM/1312/2009, de 20 de mayo de 2009, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo.

3.4.2 Legislación actual de la Comunidad Valenciana.

- Ley 2/1992 del Gobierno Valenciano firmada en marzo de 1992, sobre el saneamiento de aguas residuales de la Comunidad Valenciana.
- Decreto 266/1994 del Gobierno Valenciano firmado en diciembre de 1994, por lo que se aprueba el Reglamento sobre el Régimen Económico-Financiero y Tributario del Canon de Saneamiento.
- Decreto 193/2001 del Gobierno Valenciano firmado en diciembre de 2001, por lo que se modifica el Reglamento sobre el Régimen Económico-Financiero y Tributario del Canon de Saneamiento aprobado mediante Decreto 266/1994 del Gobierno Valenciano.

3.5 El Metanol

El metanol es un líquido incoloro a temperatura ambiente con un suave olor característico de los alcoholes. Es el alcohol más simple usado tradicionalmente como disolvente y como materia prima para productos químicos orgánicos como el formaldehído, con un suave crecimiento potencial. Originalmente se le conocía como alcohol de madera pues se producía por destilación destructiva de astillas de madera.

El metanol producido mundialmente se genera mediante monóxido de carbono e hidrógeno en un proceso catalítico:



La reacción se produce a una temperatura de 300-400 °C y a una presión de 200-300 atm. Los catalizadores usados son ZnO o Cr₂O₃

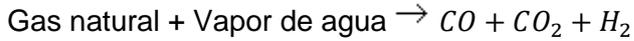
Tabla 3. Propiedades físicas y termodinámicas del metanol

METANOL	
Estado de agregación	Líquido
Apariencia	Incoloro
Densidad	0,7915 g/ml
Masa molar	32,04 g/mol
Punto de fusión	-98°C
Punto de ebullición	65°C
Temperatura de ignición	470°C
Temperatura crítica	240°C
Volumen crítico	120 ml/mol
Calor de formación a 25°C (líquido)	-239 kJ/mol
Energía libre de formación a 25°C (líquido)	-166,81 kJ/mol
Presión crítica	81 atm
Viscosidad	0,59 mPa*s a 20°C

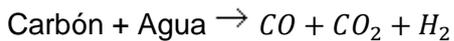
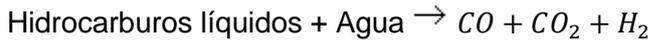
Las propiedades físicas más importantes del metanol se indican en la Tabla 1. En cuanto a las propiedades químicas, el metanol es soluble en agua y en otros alcoholes como ésteres, cetonas y éteres. El metanol reacciona violentamente con el bromo, hipoclorito de sodio, disoluciones de compuestos de alquil-aluminio, trióxido de fósforo, cloruro cianúrico, ácido nítrico, peróxido de hidrógeno, sodio, ter-butóxido de potasio y perclorato de plomo. Y es incompatible con ácidos, cloruros de ácido, anhídridos, agentes oxidantes, agentes reductores y metales alcalinos. (Ficha de seguridad del metanol, ACIDEKA)

3.5.1. Proceso para la producción de metanol

El gas de síntesis ($CO + H_2$) se obtiene provocando la combustión parcial del gas natural junto con vapor de agua.



Aunque existen otras reacciones para obtener el gas de síntesis (a partir de mezclas de hidrocarburos líquidos o carbón, junto con agua).



(Sidharth Abrol, 2011)

Únicamente para el caso en el que se utiliza carbón, el gas de síntesis puede ser producido directamente desde bajo de la tierra al fracturar los pozos de carbón junto con agua y aire comprimido que son forzados a entrar en contacto. Este proceso se conoce como in situ. El calor producido por el carbón genera el gas de síntesis.

(Sidharth Abrol, 2011)

Los procesos de obtención de metanol más extendidos son los procesos Lurgi y ICI.

Proceso Lurgi

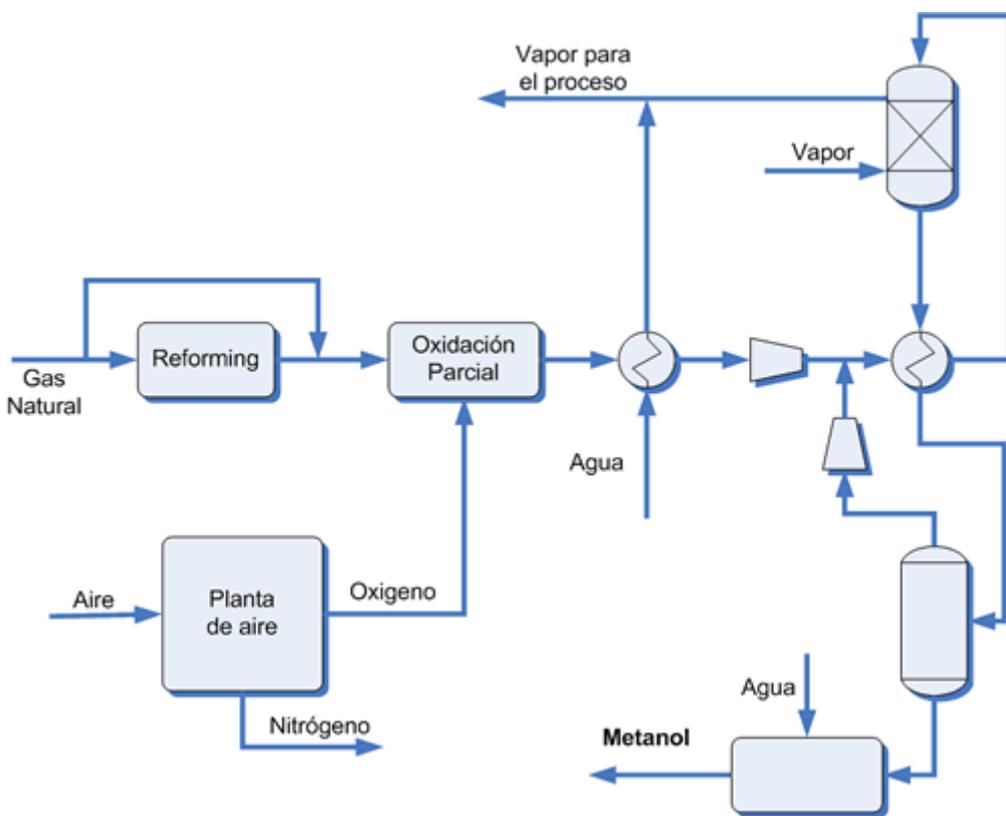
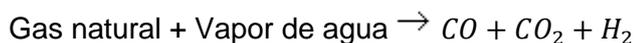


Imagen 1. Diagrama de flujo de un sistema de producción de metanol de tipo Lurgi. (Salvatierra, 2005)

Como se puede observar en la Imagen 1, el proceso Lurgi consta de 3 etapas: (Jürgen Haid, 2007)

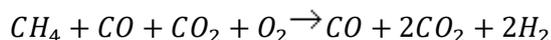
1. Reformado

En el reactor se produce la oxidación parcial del gas natural, obteniéndose H_2 , CO , CO_2 y un 20% de CH_4 residual. En el caso de que se alimente con gas natural este debe ser desulfurizado antes de entrar al reactor.



La reacción se produce a 780°C y a 40 atm.

El gas de síntesis y el metano residual que sale del primer reactor se mezclan con la otra mitad de la alimentación previamente desulfurada. Esta mezcla de gases entra en el segundo reactor, el cual está alimentado por oxígeno que proviene de una planta de obtención de oxígeno a partir de aire.

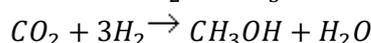
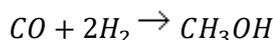


La reacción se produce a 950°C.

La mezcla es conducida a otro reactor donde se prepara el gas de síntesis eliminándose el carbón libre, el H_2S y parte del CO_2 , por lo que el gas ya está preparado para el reactor de metanol.

2. Síntesis

El gas se comprime a 100 atm y se precalienta. Este es introducido en reactor Lurgi donde se dan las siguientes reacciones:



3. Destilación

El metanol obtenido es conducido a un intercambiador de calor donde se condensa con el objetivo de purificarlo y del intercambiador pasa a un separador. Finalmente se obtiene el metanol puro a partir de una columna de destilación.

La diferencia con el proceso ICI (Imperial Chemical Industries) es que en este proceso la destilación se produce en dos etapas en lugar de en una sola. La primera es para eliminar productos ligeros como éteres, cetonas e hidrocarburos ligeros. Y en la segunda se elimina agua e hidrocarburos pesados. (Tejedor, 2012)

3.5.2 Producción y usos del metanol

El metanol está dentro de los productos químicos más fabricados con unas cantidades anuales de aproximadamente 37,5 millones de toneladas métricas al año. La industria del metanol está ampliamente desarrollada en países como Asia, América del Norte y del Sur, Europa, África y Oriente Medio. (Tejedor, 2012)

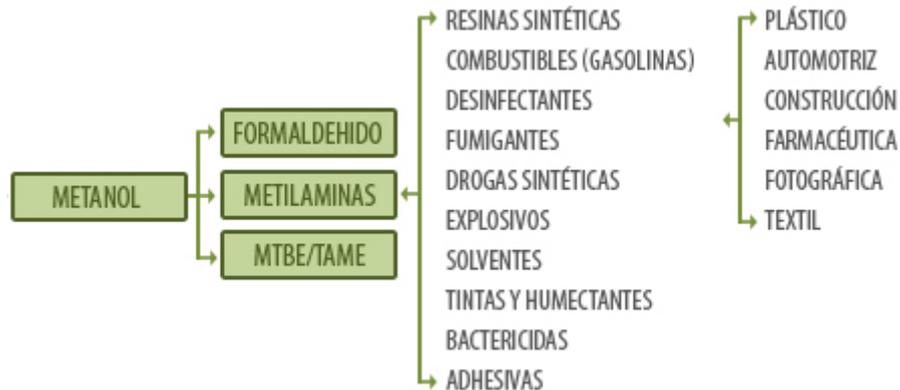


Figura 2. Principales usos del metanol (Chemical Products ZOR, s.f.)

Como se puede observar en la Figura 2 el destino principal del metanol es la producción de formaldehído, metilaminas y éter metil terbutílico (MTBE).

Al final los productos químicos que se obtienen por medio del metanol resultan en productos que se utilizan en el día a día como pinturas, siliconas, fibras, adhesivos, disolventes, etc.

Actualmente también se está utilizando el metanol como medio de producción de biodiesel, para reemplazar una parte del diésel producido en una refinería.

En un principio se mezclaba con gasolina en proporciones del 5 al 15%, actualmente las mezclas para combustibles de vehículos tienen entre un 70 y un 80% de metanol. (Methanol Institute, s.f.)

3.6 Tratamientos de las aguas residuales

Los problemas comentados sobre la escasez del agua han provocado una mayor concienciación de la población frente al problema, así como la mejora y el desarrollo de los procesos de tratamiento de aguas residuales y de su reutilización. Las plantas de tratamiento de agua utilizan diferentes procesos los cuales pueden clasificarse en pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

El pretratamiento tiene como objetivo eliminar partículas u objetos que sean excesivamente grandes para ser tratados en los siguientes procesos de la planta. Principalmente consta de un desbaste con rejas y tamicos de distintos tamaños y de un

desarenador o desengrasador. Estos equipos eliminar sólidos de elevado tamaño que pueden provocar abrasiones en los siguientes equipos.

En el tratamiento primario se busca eliminar los sólidos en suspensión, grasas y aceites que hayan pasado el pretratamiento. Algunos de los procesos más utilizados en el tratamiento primario son la sedimentación, la floculación-coagulación, la flotación o la filtración. Con estos procesos se eliminan la mayor parte de los sólidos en suspensión, pero también sustancias orgánicas, aunque no sea el objetivo principal.

Para la eliminación de sustancias orgánicas se utilizan los procesos que se catalogan en el tratamiento secundario, este tipo de tratamientos busca eliminar la carga orgánica biodegradable del agua residual. En el funcionamiento de los equipos se busca proliferar el desarrollo de microorganismos que puedan alimentarse de la materia orgánica eliminándola. Algunos de los equipos más frecuentes en el tratamiento secundario son lodos activos, digestores anaerobios, filtros biológicos rotativos o las balsas de estabilización.

Por último, se sitúan los procesos englobados en el tratamiento terciario los cuales tienen como objetivo tratar aún más el agua residual de forma que consiga unos límites de contaminación requeridos en caso de que sea necesario. Con estos tratamientos se busca que el agua residual pueda ser reutilizada ya que se elimina la materia orgánica que no ha sido eliminada en el tratamiento secundario o que no es biodegradable, así como sólidos en suspensión y sales que no han sido eliminados en los tratamientos anteriores. Dentro de este grupo se encuentran procesos como adsorción, tecnología de membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis o membranas de intercambio iónico), cloración y ozonización.

4. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

En este trabajo se va a realizar el diseño de planta de tratamiento de agua residual de una planta de producción de metanol con la finalidad de tratar el agua que se genere de forma que se pueda reutilizar en la propia planta.

Los datos de partida para el dimensionamiento de la planta de este trabajo son los siguientes:

Tabla 4. Características más importantes del agua residual que se tratará en el presente trabajo. Fuente: (Mike Snodgrass, 2015).

Medida	Valor	Unidades
Caudal diario	120	m ³ /día
Temperatura	35	°C
pH	7-9	-
Sólidos en Suspensión	115	mg/L
Sólidos en disolución	2872	mg/L
DQO	300	mg/L
DBO ₅	75	mg/L
Turbidez	22	NTU
Dureza	1000	mg/L
Alcalinidad	500	mg/L
K ⁺	25	mg/L
Na ⁺	450	mg/L
Ca ²⁺	250	mg/L
Mg ²⁺	80	mg/L
Cl ⁻	620	mg/L
SO ₄ ²⁻	640	mg/L
HCO ₃ ⁻	450	mg/L
NO ₃ ⁻	300	mg/L
PO ₄ ³⁻	0,35	mg/L

5. METODOS CONVENCIONALES

A continuación, se van a exponer algunos de los tratamientos que podrían ser utilizados para tratar el agua residual caracterizada de la planta de producción de metanol. De esta forma, junto con la revisión bibliográfica del tratamiento de esta agua mediante tecnología de membranas se procederá a seleccionar el mejor método posible para tratar el agua residual.

5.1 Adsorción

La adsorción es una técnica óptima y ampliamente utilizada para el tratamiento de aguas residuales debido a que ofrece una alta eficiencia con unos bajos costes, además de que no es contaminante para el medio ambiente y su funcionamiento no es complejo. (Zhangyi Xu, 2019)

Para un correcto funcionamiento del proceso de adsorción es importante tener en cuenta los diferentes tipos de adsorbente que hay y elegir el adecuado para el tipo de agua residual. Hay muchos tipos de materiales adsorbentes que se pueden usar para eliminar contaminantes de las aguas residuales como carbón activo, óxido de grafeno, zeolitas, sílica, etc.

Dependiendo del contaminante será más efectivo un material u otro. Para el caso que se está estudiando, el agua residual contiene ciertos iones como fosfato, sulfato, calcio, sodio, potasio o hierro. Por ejemplo, para el fosfato se han estudiado adsorciones de este anión con un adsorbente de hidróxido de hierro obteniéndose adsorciones de alrededor de 120 mg/g para una concentración inicial de fosfato de 1500 mg/L (Lorena Delgadillo-Velasco, 2018). También en otro estudio se probó la sepiolita, un adsorbente de arcilla de silicato de magnesio, resultando en una adsorción de 32 mg/g para una concentración inicial de 800 mg/L. (Hongbin Yin, 2011)

El sulfato es otro de los iones presentes en el agua caracterizada. Este anión ha sido estudiado en el agua residual que se obtiene de las instalaciones de una mina de cobre. Mediante una resina de intercambio iónico se han podido obtener adsorciones de 115 mg/g. (Reza Haghsheno, 2009)

Para la eliminación de cationes alcalinos como Na^+ y K^+ investigaciones han concluido que resinas de intercambio aniónico y catiónico son muy buenas opciones para su eliminación con adsorciones de 0,28 mg/g par potasio y 16 mg/g para sodio. (A.Aghakhani, 2010)

Investigadores de México estudiaron diferentes materiales adsorbentes para tratar aniones y cationes como algunos de los mencionados antes. (Acosta Herrera, 2021)

Tabla 5. Características y especificaciones de los adsorbentes utilizados en el experimento. Fuente: (Acosta Herrera, 2021)

Adsorbente	Siglas	Naturaleza	Área superficial	pH
Resina de intercambio aniónico	RA	Fuerte	-	-
Carbón activo de hulla	CHB	Mineral	1000	8
Carbón activo de hueso	B	Animal	104	8-9,5
Carbón catalítico	CATC	Carbón activo de coco	2000-2500	9,5
Resina de intercambio catiónico	RC	Fuerte	-	-
Célula de carbón activo de coco	CC	Vegetal	1050	7-8
Ferrolox	F	Hidróxido de hierro granular	270	7,71
Katalox light	KL	Clinoptilolito	-	11,13
Sílica	S	Sílica natural	-	8,69
Zeolita	ZN	Zeolita natural	25	8,91

La tabla 5 resume las características de los adsorbentes que se utilizaron en el ensayo para tratar los iones de PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , F^- y Na^+

Los resultados que obtuvieron son los siguientes:

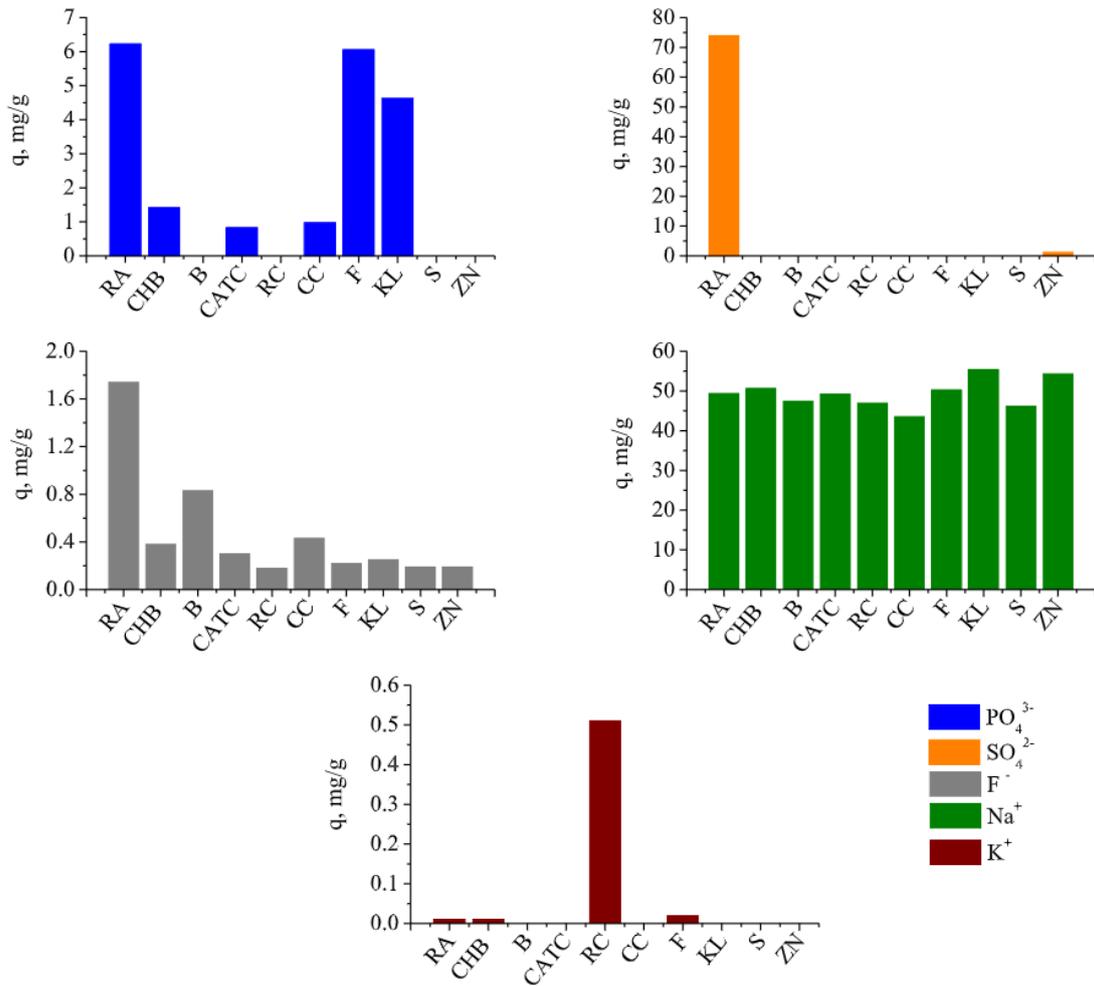


Figura 3. Resultados obtenidos para los diferentes adsorbentes con cada uno de los iones estudiados, a 30°C y pH 5.

Como se puede observar en la Figura 3, los principales iones que se encuentran en el agua residual del presente trabajo pueden ser eliminados mediante adsorción. Los mejores materiales son los que presentan bajo área superficial. En concreto, el agua residual del presente trabajo tiene mayoritariamente presencia de SO₄²⁻ y de Na⁺ por lo que el mejor material sería el de resina de intercambio aniónico pues el sulfato únicamente se adsorbe con este adsorbente.

Si se quisiese utilizar materiales adsorbentes para el caso del agua residual proveniente de una planta de producciones de metanol sería necesario previamente hacer un pretratamiento para eliminar la mayor parte de los sólidos en suspensión, ya que si no comprometería el buen funcionamiento de la adsorción.

5.2 Reactor anaerobio de flujo ascendente (Tratamiento biológico)

La tecnología del tratamiento anaerobio se ha desarrollado en gran medida desde sus primeras aplicaciones, principalmente debido a la simplicidad de su tecnología, al poco espacio requerido, a la poca cantidad de fango que produce y al balance energético positivo que tiene frente al tratamiento aerobio convencional por fangos activos. Además, el tratamiento anaerobio es un tratamiento biológico que se suele utilizar en las industrias ya que permiten eliminar DQO y no solo DBO₅. (J. B. van Lier, 2015)

El proceso biológico se dice que es anaerobio cuando no hay existencia de oxígeno disuelto. El proceso se basa en la digestión del sustrato por parte de las bacterias anaerobias que en su mayoría son anaerobias estrictas, es decir, que la presencia de oxígeno en el medio provocaría su desaparición.

Existen 3 fases en el tratamiento biológico anaerobio (Lucia Constanza Corrales MSc, 2015)

Hidrólisis: Los microorganismos producen unas enzimas que se encargan de transformar las moléculas de mayor tamaño en moléculas más pequeñas. Este proceso de hidrólisis que llevan a cabo bacterias acidogénicas suele ser el más lento y por ello el limitante.

Fermentación: En este proceso las moléculas de pequeño tamaño obtenidas son transformadas junto con ácidos de cadena corta, CO_2 , H_2 , N_2 , nuevas células y productos finales.

Metanogénesis: Finalmente, las bacterias metanogénicas se encargan de transformar el nitrógeno y los ácidos orgánicos volátiles en CO_2 , agua, amonio y otros productos finales.

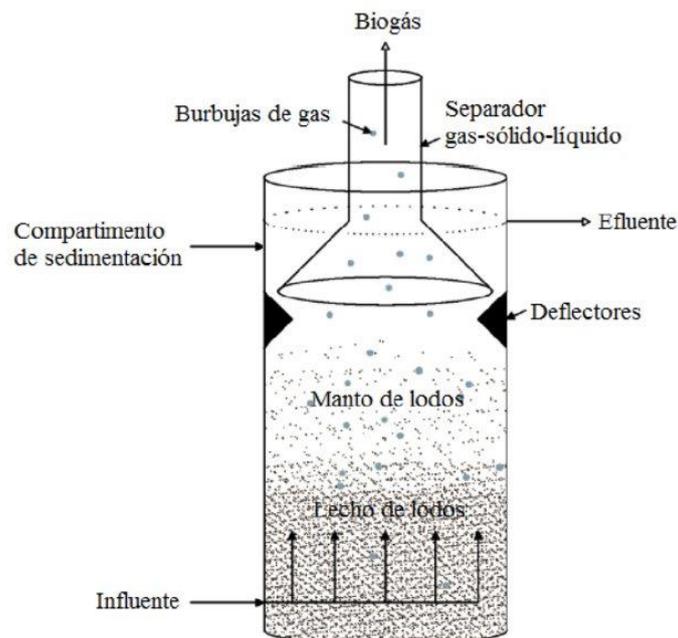


Figura 4. Esquema de tipo de digester anaerobio

Hay diferentes tipos de reactores que pueden ser utilizados para el proceso de digestión anaerobia, tales como: Filtro anaerobio (AF), Proceso biopelícula de flujo descendente (DAGP), Reactores de lecho expandido (AEBR) y fluidizado (FBR), y Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) que es el que se puede observar en la Figura 4 y es el que está mayormente extendido.

El agua residual para tratar se introduce por la parte inferior del reactor y fluye en sentido ascendente a través del manto de fangos granular. El tratamiento se produce al entrar en contacto el agua residual y los gránulos. El biogás originado en condiciones anaerobias (principalmente CH_4 y CO_2) provoca una circulación interior que colabora en la formación y mantenimiento de los gránulos. Parte del gas generado dentro del manto de fangos se adhiere a las partículas biológicas. Tanto el gas libre como las partículas a las que se ha adherido el gas ascienden hacia la zona superior del reactor, donde se libera el gas adherido a las partículas, al entrar éstas en contacto con unos deflectores desgasificadores. Los gránulos desgasificados vuelven a caer hasta la superficie del manto de fangos.

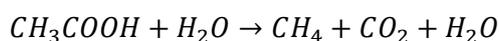
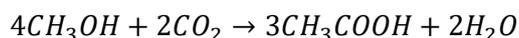
El gas libre y el gas liberado de las partículas se capturan en una bóveda o campana de recogida de gases instalada en la parte superior del reactor. El líquido, con un cierto contenido de sólidos residuales y de gránulos biológicos, se conduce a una cámara de decantación, donde se separan los sólidos residuales. Los sólidos separados se reconducen a la superficie del manto de fangos a través del sistema de deflectores.

Investigadores de China estudiaron el uso de un reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) con agua residual que contenía metanol (Yishan LIN, 2008). La conversión de metanol en metano es el principal proceso de un tratamiento anaerobio de agua residual que contiene esta sustancia. El ácido acético se puede producir como reacción secundaria e indeseada ya que se puede producir a partir del metanol y hace disminuir el pH.

La reacción de formación de metano es:



La reacción de formación del ácido acético:



En el estudio utilizaron un reactor UASB con un volumen de carga inicial (VLR) de 0,3 kg de DQO/m³ * d, y una concentración de 300 mg de DQO/L, que es la misma concentración del agua residual caracterizada en el presente trabajo.

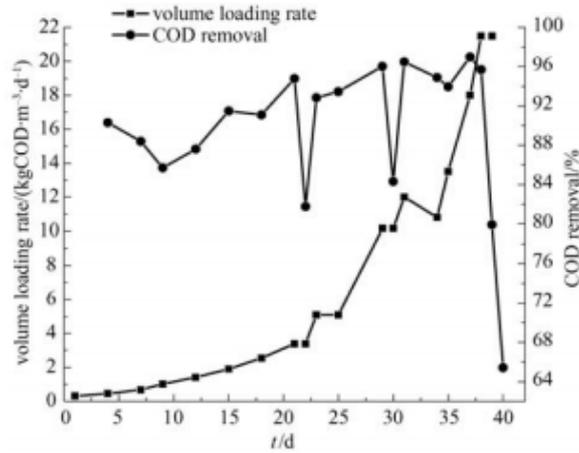


Figura 5. VLR y eliminación de DQO en el reactor durante la fase de puesta en marcha.

Observando la Figura 5, el reactor se mantuvo estable para valores de VLR inferiores a 18 kg DQO/m³ * d. La eliminación de DQO se mantuvo alta en todo momento aun con los cambios en el VLR. La máxima eliminación de DQO fue de 97%.

Durante la fase de funcionamiento constante a un VLR fijo de 18 kg DQO/m³ * d, la eliminación de DQO se mantuvo por encima del 90% en todo momento.

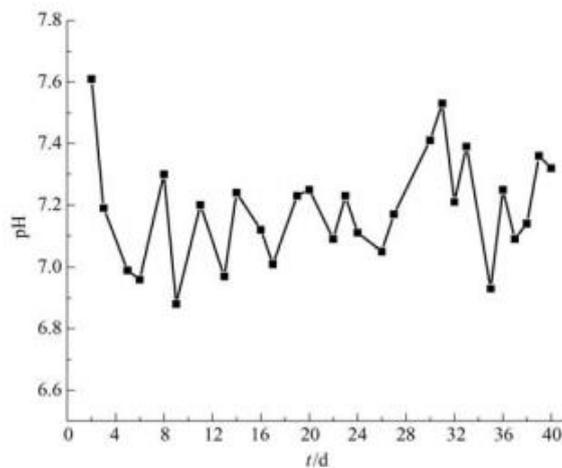


Figura 6. Variación del pH en el reactor.

En la Figura 6 se puede comprobar que la formación de ácido acético no causó un problema ya que los valores de pH se mantuvieron en valores adecuados.

En el ensayo se concluyó que los biorreactores anaerobios pueden ser usados en el tratamiento de aguas residuales que contengan metanol.

5.3 Reactores biológicos de membrana (MBR)

Los reactores biológicos de membrana son procesos que combinan el tratamiento biológico del agua residual con la tecnología de membranas. La membrana utilizada, que puede ir en el interior del reactor biológico o en el exterior, actúa como límite físico entre el área donde se da la degradación de la materia orgánica y la zona del agua ya tratada, sin contaminantes ni microorganismos.

Si las membranas están colocadas en el interior del reactor son membranas sumergidas y el efluente que sale del reactor es el agua tratada. En cambio, si la membrana está situada en el exterior del reactor, el efluente que sale de este se conduce a una membrana de ultrafiltración separando el agua tratada del concentrado, el cual vuelve al reactor.

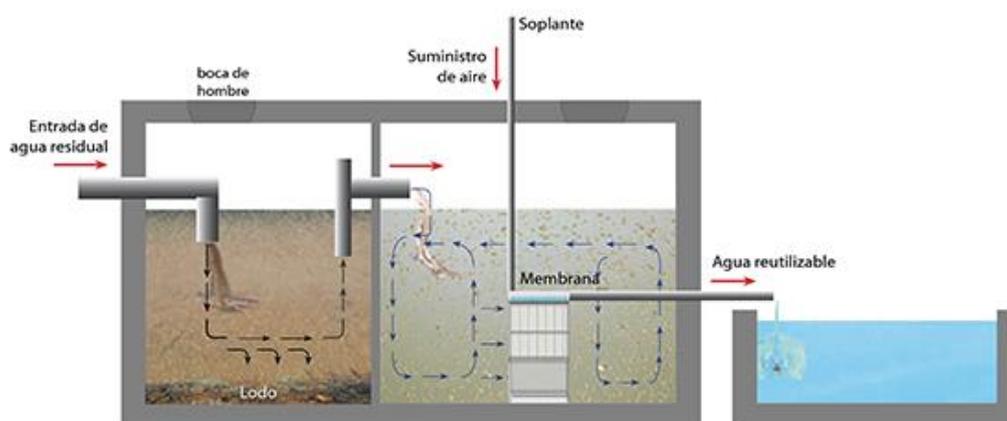


Figura 7. Esquema de un reactor biológico de membrana. (BIOAZUL, 2015)

Entre las ventajas de los MBR frente a utilizar un tratamiento secundario convencional se pueden encontrar:

- La filtración por membrana garantiza una calidad de agua tratada independientemente de la decantabilidad del fango. Eficaz retención de los sólidos suspendidos y de los compuestos coloidales por lo que permite su reutilización para diversos usos.
- Cuando se utilizan membranas de ultrafiltración se logra la retención de las bacterias y virus, por lo que se elimina de desinfección y la peligrosidad de sus subproductos.
- La ausencia del clarificador permite un desarrollo lento bacteriano y que persistan en el reactor incluso a tiempos de retención de sólidos cortos.
- Con la tecnología MBR se puede operar bajo unas concentraciones de 15–30 g/l SSLM por lo que la superficie de la planta se puede reducir en un 50% o más.

La Planta es más compacta al prescindir del decantador secundario y reactor biológico mucho más pequeño.

- Permite mayores edades de fango (hasta 40 días o más), por lo que la producción de fango se puede reducir en hasta un 40%.

Entre las principales limitaciones de los MBR en comparación con los procesos convencionales de fangos activados se pueden citar:

- Elevado coste de implantación y explotación.
- La polarización y otros problemas de ensuciamiento de las membranas también limitan su uso, es decir, Las altas concentraciones de fango pueden influir de forma negativa en el rendimiento de la membrana, aumentando el TPM (Transmembrane Pressure) o disminuyendo el flujo a través de la membrana.
- Dificultades en el tratamiento de los lodos generados por sus problemas de sedimentabilidad dado que la mayoría de los sólidos en suspensión son retenidos en el reactor.
- La posible acumulación en el reactor de compuestos inorgánicos no filtrables como metales pesados que a determinadas concentraciones pueden ser dañinos para la población bacteriana o afectar a la integridad de la membrana

Actualmente, en España existen varias instalaciones de este tipo, empleándose tanto para aguas residuales industriales como para aguas urbanas, siendo especialmente utilizado en el tratamiento de aguas para reutilización.

En cuanto a la aplicación de los MBR en aguas residuales industriales, diferentes estudios demuestran que se pueden utilizar correctamente para diferentes aguas residuales. En un ensayo investigadores de China probaron que son eficientes para el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas petroquímicas. Estas aguas tenían altos contenidos de DQO, nitratos y sólidos volátiles en suspensión. La aplicación de MBR en distintas configuraciones les dio unos resultados de eliminación del 75-80% para el DQO, 77-82% para los nitratos y 80-90% para los sólidos volátiles en suspensión. (Shujuan Huang, 2020)

Dentro de los MBR también existen configuraciones para tratamiento aerobio y anaerobio. Por ejemplo, un MBR anaerobio tiene mayor capacidad de tratamiento y da un efluente de mayor calidad, que uno aerobio, aunque los anaerobios también tienen sus desventajas principalmente con el ensuciamiento. (Thanh-Binh Nguyen, 2016)

Comparando los MBR y AnMBR en aguas residuales de una planta petroquímica, ambos son útiles para este tipo de aguas con concentraciones elevadas de DQO. Utilizando un MBR y un AnMBR en diferentes estudios, se eliminó el 95% del DQO con el primero (Jian-Jun Qin, 2007) y utilizando un AnMBR un 97% de DQO. (Zyl, Wentzel, Ekama, & Riedel, 2008).

Investigadores de Brasil probaron el uso de reactores anaerobios de membrana osmótica directa para tratar agua residual (Bárbara Caroline Ricci, 2021). Las características del agua residual se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del agua residual utilizada en el ensayo. Fuente: (Bárbara Caroline Ricci, 2021)

Parámetro	Valor
pH	8,2
DQO	280 mg/L
TSS	50 mg/L
VSS	42 mg/L
NH ₄ ⁺	34 mg/L
PO ₄ ³⁻	6,2 mg/L

Analizando los datos de la Tabla 6, los valores del agua residual del ensayo son similares a los del agua caracterizada en el presente trabajo, como se puede comprobar en la Tabla 4.

Los resultados que obtuvieron fueron una reducción del DQO en un 97,1% y una reducción significativa en turbidez, nitratos y fosfatos, demostrando que los reactores biológicos de membrana pueden ser utilizados para tratar aguas residuales con elevadas concentraciones de DQO, concentraciones de iones y de sólidos en suspensión.

6. TECNOLOGIA DE MEMBRANAS

Una membrana puede definirse como un film delgado que separa dos fases y actúa como una barrera selectiva al transporte de materia. En las últimas décadas se está experimentando un gran desarrollo en el uso de tecnología de membranas para tratar el agua de abastecimiento doméstico e industrial, así como en el tratamiento de aguas residuales. Esta tecnología está diseñada para las separaciones tanto físicas como fisicoquímicas.

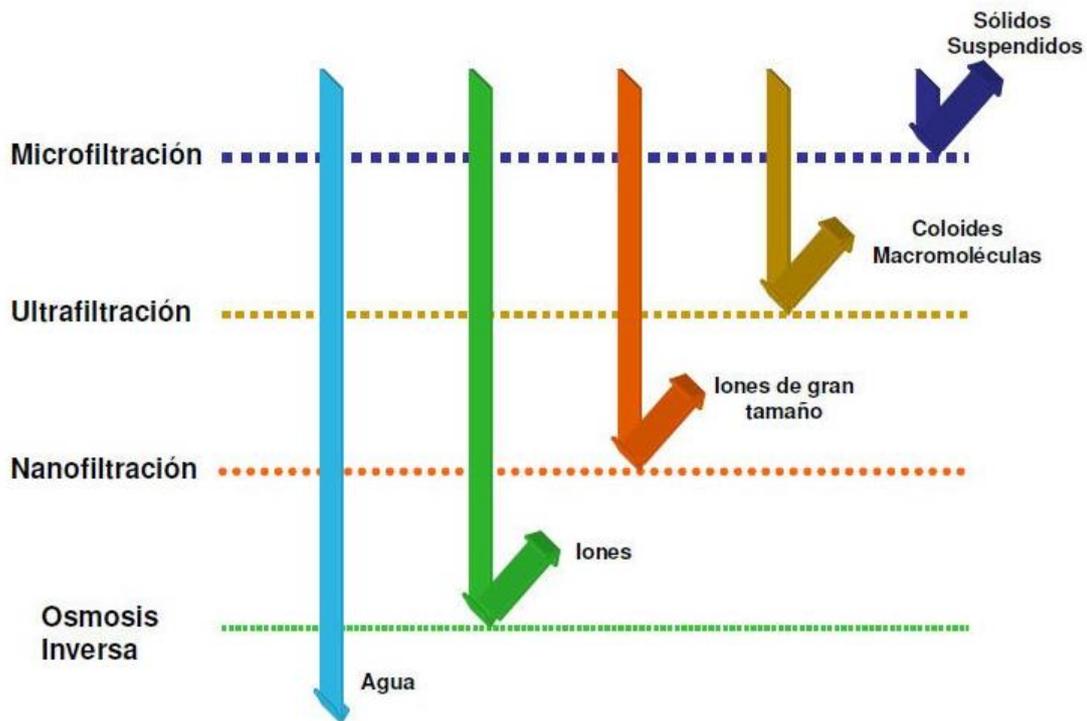


Figura 8. Representación de las distintas membranas y las partículas quedan retenidas en ellas.

Algunas de las ventajas de emplear membranas frente a otros procesos son: (Alfa Laval, s.f.)

1. La separación se produce en la misma fase, lo que resulta en un consumo de energía mucho menor respecto de, por ejemplo, la destilación.
2. No se produce acumulación, o se produce en pequeño grado, por lo que las membranas pueden estar trabajando en continuo sin la existencia de ciclos de regeneración, a diferencia de los procesos de adsorción.
3. No se requiere adición de reactivos, o en muy pequeño grado, a diferencia de los procesos convencionales de clarificación, que normalmente requiere de la adición de coagulantes y floculantes.

Las membranas se emplean en tratamientos de aguas residuales e industriales para la obtención de efluentes filtrados de alta calidad de forma previa a su vertido al medio natural, o para varias aplicaciones en reutilización de agua, como una tecnología que ahorra espacio.

El hecho de que las membranas dispongan de módulos que puedan tratar volúmenes de alimentación a nivel industrial, la propia simplicidad de las membranas, que no necesiten la adición de reactivos o que trabajen a temperaturas moderadas sin la existencia de cambios de fase son algunos de los aspectos positivos de las técnicas de membrana.

Las sustancias disueltas en el agua residual de la planta de metanol modificarán su velocidad de paso debido a la naturaleza de la membrana por lo que se obtendrán un flujo de permeado que tendrá una cantidad de contaminantes mínima que cumpla con los límites para que pueda ser reutilizada en la propia planta, y un flujo de rechazo que estará muy concentrado en contaminantes y que habrá que tratar.

En los aspectos negativos se encuentra el problema del ensuciamiento de las membranas y los costes de reemplazo de membranas, que se pueden mitigar con una buena selección de proceso y adecuadas prácticas de limpieza.

6.1 Clasificación de las membranas

Las membranas pueden clasificarse en función de distintos parámetros, que aportan información sobre su estructura, naturaleza, forma, composición, presión de trabajo, etc.

Algunas de ellas:

Según el mecanismo de separación

- Membranas porosas: Las membranas de microfiltración, ultrafiltración, diálisis y en parte las de nanofiltración son de este tipo de membranas ya que debido a la presencia de poros permiten la separación por diferencia de tamaño. Las membranas de NF tienen partes porosas y partes no porosas.
- Membranas no porosas: En este caso la separación se produce por difusión de especies. Las membranas de ósmosis inversa y pervaporación son de este tipo.
- Membranas de intercambio iónico: Son un tipo especial de membranas no porosas. Son geles muy hinchados portadores de cargas positivas o negativas. Las hay de intercambio aniónico si tiene cargas positivas y de intercambio catiónico si tiene cargas negativas.

Según su naturaleza

Las membranas anisótropas pueden a su vez clasificarse como:

- Membranas asimétricas (integrales). Los materiales de la capa externa y el del soporte son el mismo material.
- Membranas compuestas (mixtas). Consta de tres capas de distintos materiales:
Capa superior: Esta es la que actúa como capa activa.
Capa intermedia: Soporte poroso de la capa activa
Capa inferior: Tejido reforzado responsable de la resistencia mecánica de la membrana.

6.2 Tipologías de operación

Filtración en línea

En la filtración en línea las partículas que se desean eliminar quedan retenidas en el interior de la membrana resultando en una corriente ya tratada llamada permeado, en este tipo de filtración las membranas están colocadas en la línea de flujo de la alimentación.

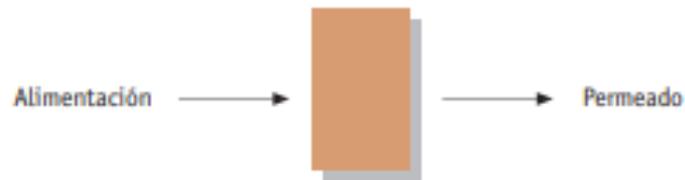


Figura 9. Esquema de una filtración por membrana en línea. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba, 2006)

Filtración tangencial

La filtración tangencial, a diferencia de la frontal, el líquido se hace circular por el filtro en luego de forzarlo a pasar a través de él, y se establece una diferencia de presión. El agua para tratar fluye paralela a la membrana y se recicla a través de un depósito. Las partículas más pequeñas que el tamaño del poro se empujan a través como filtrado.

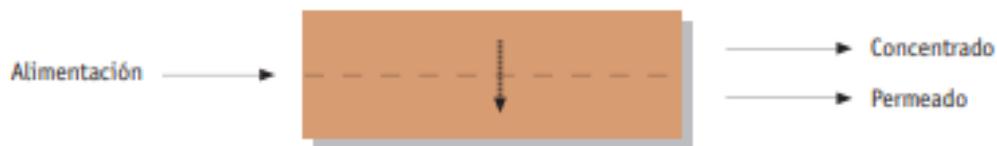


Figura 10. Esquema de una filtración por membrana tangencial. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba, 2006)

6.3 Configuraciones de las membranas

En cuanto a la disposición de la membrana, las configuraciones más comunes son en módulos de tipo laminares, tubulares, de membrana enrollada en espiral o de tipo fibra hueca. (Asociación española de desalación y reutilización, 2020)

- **Laminares o lámina plana:** Como su nombre indica, las membranas se colocan en capas unas encima de otras, separadas por espaciadores permeables que dirigen el flujo. En general este tipo de membranas tienen una buena relación superficie/volumen de filtrado.
- **Tubulares:** En este tipo de configuración la alimentación circula por dentro del tubo, en cambio, el permeado fluye desde el interior hacia el exterior. Esta configuración es común en la ultrafiltración.
- **De fibra hueca:** Esta configuración de la membrana consiste en una unidad integrada en la que fibras, muy delgadas, se insertan por ambos extremos de un soporte.
El principal problema de este tipo de configuración es el ensuciamiento.
- **De arrollamiento en espiral:** El enrollamiento en espiral consiste en enrollar un conjunto de membranas planas separadas entre sí por capas de tela de diferentes propiedades, estas capas de tela se utilizan como alimentadores y transportadores de solución de permeado y generadores de turbulencia. Tanto la membrana como el separador se enrollan en el tubo perforado central. La solución de alimentación entra paralela al tubo y solo atraviesa la capa permeable en contacto con la parte activa de la membrana. Una vez que atraviesa la membrana (perpendicular al flujo del alimento), continúa circulando en sentido espiral hasta llegar al tubo central que recoge todo el permeado. Esta configuración consigue aumentar enormemente la superficie de trabajo y reducir los costes energéticos, aunque tienen el inconveniente de que se ensucian fácilmente y son difíciles de limpiar.

6.4 Método de limpieza de membranas

El ensuciamiento de las membranas es un factor muy importante a tener en cuenta como ya se ha comentado ya que puede reducir el caudal de permeado e incrementar los costes energéticos. Las partículas, la bio-obstrucción y el ensuciamiento por incrustación o *scaling* son tres tipos de contaminación que pueden afectar a la membrana. El ensuciamiento proviene principalmente del bio-ensuciamiento, seguido de partículas coloidales, incrustaciones y metales. (N. Peña, 2012)

El proceso de ensuciamiento es inevitable en mayor o menor medida y en función de los contaminantes del agua a tratar y del tipo de membrana que se usa, los procesos de ensuciamiento serán diferentes. También afecta la naturaleza química de la membrana y las interacciones soluto-soluto y soluto-membrana. Además de los parámetros de operación utilizados. Es por ello por lo que depende de muchas variables y es poco probable que se elimine por completo. (M. Bartlett, 1995)

Cuando se da el ensuciamiento, se puede observar en la instalación mediante las siguientes características:

- Disminución del flujo de permeado.
- Aumento en la presión de la alimentación.
- Cambios en el rechazo de sales.

El proceso de ensuciamiento ha sido una de las principales áreas de estudio de las membranas, con el objetivo de evitarlo o reducirlo. Actualmente los métodos que se utilizan para controlarlo son:

- Pretratamiento del agua de alimentación.
- Limpieza de las membranas.
- Mejora de las propiedades de las membranas frente este problema.
- Optimización del funcionamiento del sistema.

En el caso del presente trabajo ya se ha establecido un sistema de pretratamiento con el objetivo de reducir el ensuciamiento, también se han hablado de los distintos tipos de configuración de las membranas de UF y cuales son óptimas para evitar este problema. Y en cuanto a la limpieza, se va a proceder a su revisión.

Mediante la limpieza, el problema se puede controlar mediante distintos tratamientos, dependiendo de que necesite la membrana.

Método físico: El método físico se conoce como contralavado, se basa en invertir el flujo de permeado, de esta forma, si de normal el permeado sale por arriba, en un contralavado entraría por arriba para eliminar las sustancias depositadas sobre la membrana. La creación de la turbulencia ayuda a reducir el ensuciamiento dificultando la deposición de los sólidos sobre la membrana como se puede observar en la Figura 11.

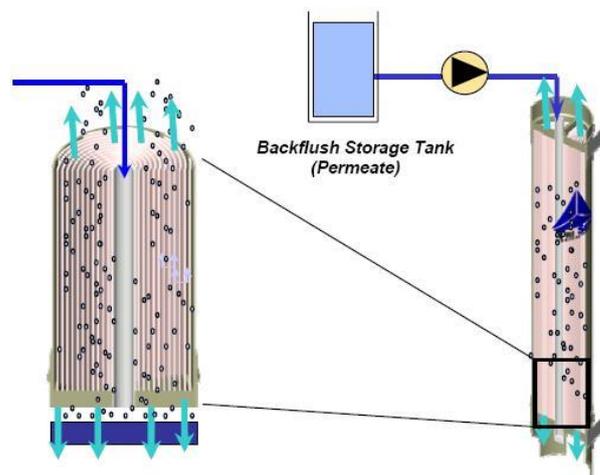


Figura 11. Proceso de contralavado sobre una membrana.

Tanto el contralavado como la creación de turbulencia son únicamente útiles en el caso del ensuciamiento externo, en el cual las sustancias se depositan en la membrana.

Método químico: el método químico consiste en lavar la membrana con diferentes productos como detergentes, ácidos o bases. Los métodos químicos que se pueden utilizar son:

- CEB (Chemically Enhanced Backwash): Un lavado a contracorriente mejorado químicamente (CEB) se utiliza para aumentar la eficacia de un lavado a contracorriente. Se lleva a cabo con menor frecuencia que el contralavado y es que el proceso es similar a este, la diferencia está en que en una limpieza CEB el permeado se mezcla con productos químicos para aumentar la eficacia del proceso.
- CIP (Clean in Place): Es un método eficaz de restaurar el rendimiento de la membrana pues es más potente que un CEB. . Este tipo de ensuciamiento puede ocurrir debido a condiciones de funcionamiento difíciles, por ejemplo, en situaciones donde hay una fluctuación significativa en la calidad del agua de alimentación, o como resultado de un uso inadecuado, tal como una falta de pretratamiento eficaz, tasas de flujos excesivos o dosis incorrectas de los productos químicos. Como regla general, CIP no es necesario en el funcionamiento normal.

6.3 Factores que reducen las prestaciones de las membranas

Cuando el flujo de permeado y el coeficiente de rechazo se mantienen dentro de las condiciones de diseño de la operación, se realiza la función normal de la membrana, es decir, las propiedades como la presión o el potencial eléctrico no cambia significativamente.

Tiene lugar en aquellos procesos que operan en la forma filtración tangencial, como es el caso de ósmosis inversa y ultrafiltración. En las condiciones de trabajo de estos procesos es difícil evitar que los componentes de la alimentación rechazados por la membrana no se acumulen en su superficie. El resultado es la creación de gradientes de concentración (polarización por concentración) en el lado de la alimentación, que pueden disminuir la eficiencia de separación de la membrana y el flujo de permeado.

La polarización de alta concentración aumentará la presión osmótica en el lado de alimentación, lo que también dará como resultado una disminución del flujo de permeado. Además, si la concentración es alta, la difusión del componente del agua a través de la membrana será ventajosa, lo que supondrá una reducción del coeficiente de rechazo. Esta desventaja de la membrana depende de las condiciones de operación, no del tiempo de uso de la membrana. La forma más sencilla de evitar la polarización es aumentar la velocidad de alimentación para que la turbulencia resultante arrastre el material depositado en la superficie de la película.

Ensuciamiento

El ensuciamiento se da cuando las partículas contaminantes del agua interactúan con la membrana y precipitan en ella o se quedan retenidas en ella. Esto hace que el flujo de permeado sea menor ya que los poros están siendo obstruidos por las partículas.

Este tipo de defecto de las membranas es función del tiempo que estén actuando y su tratamiento dependerá del tipo de contaminación que sufra la membrana ya que puede ser más superficial o interno en cuyo caso es posible que haya que hacer una parada del proceso para la limpieza de esta.

6.4 Electrodiálisis

Los procesos de tratamiento del agua residual basados en la electrólisis utilizan como fuerza impulsora la diferencia de potencial eléctrico entre los iones que resulta en el movimiento de estos.

La configuración de un equipo de electrodiálisis está compuesta por un grupo de membranas catiónicas y aniónicas, colocadas de forma alterna y separadas por placas.

En la Figura 12 se puede ver un esquema de un proceso típico de electrodiálisis.

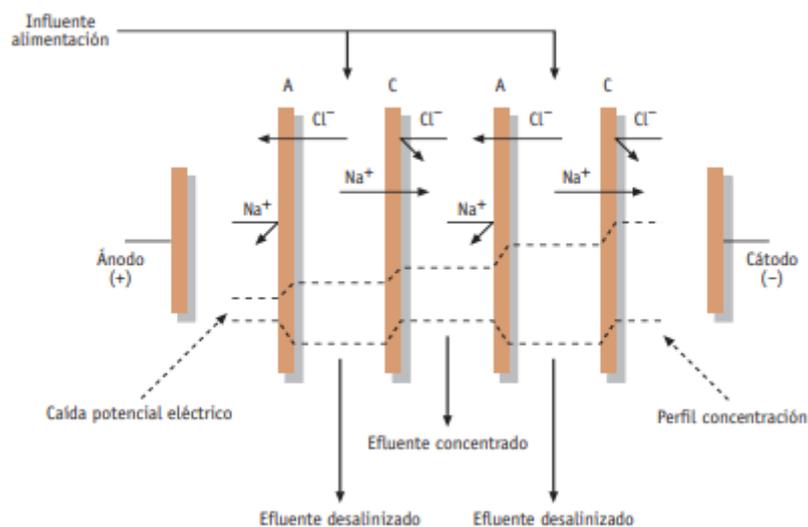


Figura 12. Esquema de un equipo de electrodiálisis. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba, 2006)

El aporte de agua residual entra en dirección longitudinal a las membranas y debido al campo eléctrico que se crea por la diferencia de potencial, hay un flujo de las cargas positivas hacia el cátodo y de las negativas hacia el ánodo. Por tanto, a la salida habrá dos corrientes, una muy concentrada y otra libre de la sustancia a eliminar.

En un estudio se investigó la electrodiálisis como tratamiento para aguas residuales industriales con altos contenidos en iones (Caline Rodrigues Gally, 2018). En dicho

estudio se utilizó un agua residual con las características que se pueden ver en la Tabla 7.

Tabla 7. Características del agua residual sin filtrar y el agua residual con una filtración mediante una membrana de celulosa de 0,5 µm.

Parámetro	Efluente (mg/L)	Efluente filtrado (mg/L)
Fluoruro	0,6	0,5
Cloruro	51,4 ± 10,6	42,5 ± 3,5
Nitrato	3,6 ± 0,5	13,2 ± 1,9
Fosfato	11,2 ± 0,4	10,6 ± 0,9
Sulfato	42 ± 4	39 ± 0,1
Sodio	66,7 ± 16,2	58,1 ± 4,6
Amonio	68,5 ± 1,9	58,4 ± 4,7
Potasio	12 ± 1,1	11,4 ± 0,4
Magnesio	3,7 ± 0,1	4
Calcio	24,4 ± 1,1	25,7 ± 0,5
pH	7,16	7,85
Conductividad (µS)	669	666

Los resultados que obtuvieron (Figura 13) han demostrado que las membranas de ED pueden ser utilizadas para tratar aguas residuales con altos contenidos en iones, y que son capaces de producir agua reutilizable a nivel industrial como en torres de refrigeración. Como desventaja, en el experimento calcularon el LCD (limiting current density) que es la densidad de corriente máxima necesaria para alcanzar la reacción deseada del electrodo antes de la descarga simultánea de iones indeseables, tanto en una membrana nueva como en una ya usada y los valores que obtuvieron fueron 2 y 1,4 mA.cm⁻² respectivamente, lo que indica que debido a factores como el ensuciamiento, la eficiencia de las ED se reduce notablemente.

Sin embargo, la reducción de la conductividad y los altos valores de extracción de iones demuestran la eficiencia de este tipo de separación por membranas. La capacidad de reducir iones corrosivos como Cl⁻ o iones incrustantes como Ca²⁺ o Mg²⁺ indican la eficiencia pues este tipo de iones limitan la reutilización a nivel industrial.

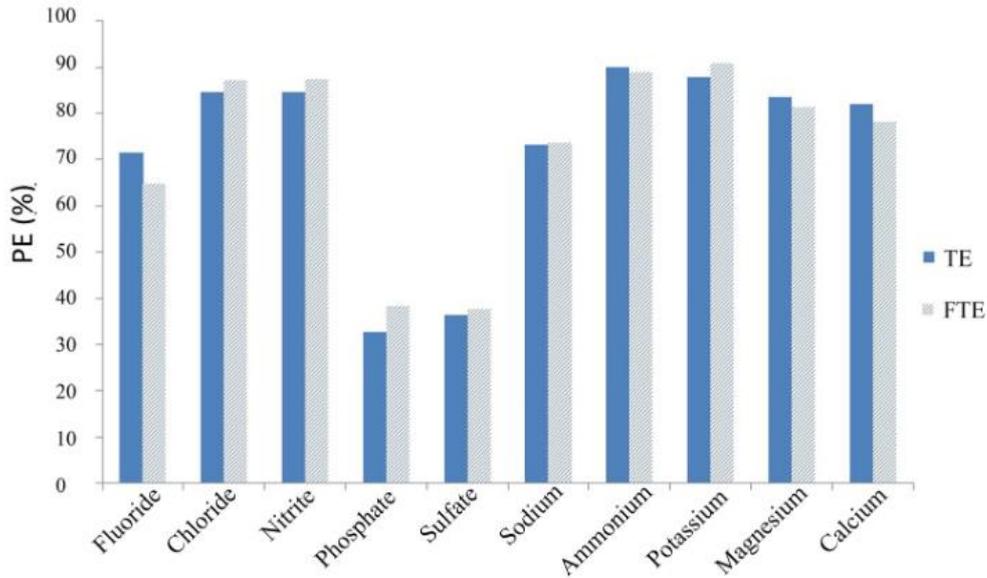


Figura 13. Extracción de iones (PE%) debido al tratamiento por electrodiálisis tanto para el agua sin tratar (TE) y el agua filtrada previamente (FTE).

6.5 Microfiltración

Se utilizan para la eliminación de sólidos en suspensión. No existe un tamaño o configuración estándar, siendo la más frecuente la de fibra hueca. En cuanto al tipo de material las membranas de microfiltración pueden ser cerámicas (aluminicas), minerales (circonio, titanio) y poliméricas (poliamida, polisulfona, polipropileno). En cuanto a su estructura pueden ser de láminas enrolladas en espiral o de láminas planas apiladas en paquetes, según tengan una estructura tubular autoportante, o según conformen haces de túbulos o fibras huecas filtrantes. Las membranas de fibra hueca tienen, generalmente, el diámetro de un fideo fino y son huecas por dentro. El agua circula de adentro a afuera o viceversa según el fabricante. Este tipo de membrana separa los contaminantes hasta 0,1 μm de tamaño. Esta operación permite eliminar quistes, bacterias y la mayoría de las partículas. Por lo tanto, su utilización es principalmente en la eliminación de partículas (conocido como clarificación). Consigue una reducción de la turbidez de hasta 1 UNT. Las presiones de funcionamiento para la MF son similares a las de la ultrafiltración (UF), es decir, presiones de funcionamiento comprendidas entre 0,15-4,5 bar.

6.6 Ultrafiltración

Es un proceso de membranas que se utiliza para eliminar partículas (clarificar) y desinfectar el agua. La ultrafiltración (UF) elimina contaminantes hasta 0,01 μm . Estas membranas son porosas y eliminan quistes, bacterias, virus, sólidos en suspensión y partículas de hierro y manganeso. Estos tipos de membranas no son eficaces en la eliminación de compuestos orgánicos naturales o sintéticos. La UF es similar a la coagulación y la filtración de arena, en cuanto que se usa como pretratamiento para las aguas potables. Estos sistemas se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de

nanofiltración u ósmosis inversa. Al igual que las membranas de microfiltración consigue una reducción de la turbidez de hasta 1 UNT. Su configuración más frecuente es la de fibra hueca.

El pretratamiento a la ultrafiltración es necesario para disminuir el ensuciamiento y a la vez incrementar la eficiencia en la eliminación orgánica. Los procesos de pretratamiento que se utilizan son la coagulación, la adsorción de carbón activo pulverizado (PAC) y la filtración directa. Numerosos estudios donde se combinan la coagulación y la ultrafiltración concluyen que se reduce el ensuciamiento coloidal y se mejora la eliminación de materia orgánica disuelta.

La ultrafiltración se puede utilizar directamente para la reutilización de efluentes de secundarios para multitud de usos o como un pretratamiento de un proceso de membranas de ósmosis inversa.

6.7 Nanofiltración

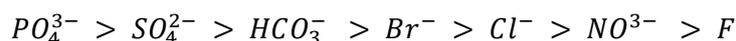
A la nanofiltración (NF) también se le conoce como ósmosis de baja presión. Están diseñadas para eliminar iones multivalentes, como el calcio y el magnesio, en las operaciones de ablandamiento de aguas. La tecnología se llama también de ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen dos cargas mejor que los que sólo tienen una carga (sodio, potasio, cloro). La NF utiliza filtración y difusión como técnicas de separación. La NF elimina contaminantes de hasta 0,001 µm de tamaño, esto incluye quistes, bacterias, virus, materia orgánica, sales, dureza, patógenos, pesticidas, turbidez y casi todos los contaminantes conocidos. Funcionan a presiones entre 5–10 bar. El rendimiento es hasta del 90%. Hay cuatro tipos de configuración de membranas para la eliminación de sólidos disueltos: enrolladas en espiral, de fibra hueca, tubular y de placa-bastidor. La primera configuración es la más frecuente. Las otras tres se utilizan sólo para casos específicos

6.8 Ósmosis inversa

El proceso de ósmosis inversa (OI) consiste en generar, mediante una membrana permeable al agua, una solución acuosa con bajo contenido en sal a partir de otra con alto contenido en sal. Es la tecnología utilizada para producir agua desalada a partir de agua de mar. Igual que en MF y UF, la causa que genera la fuerza impulsora para lograr la separación de la sal es una diferencia de presión transmembrana.

Sin embargo, en la OI el proceso de separación se debe a la diferente solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes de la solución acuosa. Los valores de operación de la diferencia de presión transmembrana y concentración de la solución son 7 – 70 bar y 200 – 30.000 ppm, respectivamente.

Las prestaciones de las membranas utilizadas en OI se pueden resumir en los siguientes puntos: Los iones multivalentes se retienen mejor que los monovalentes, siendo su clasificación de mayor a menor coeficiente de rechazo la que se muestra



Los gases disueltos como amoníaco, dióxido de carbono, dióxido de azufre, oxígeno, cloro y sulfuro de hidrógeno tienen una buena permeabilidad. El rechazo de los ácidos y las bases débiles es mayor a valores de pH donde están en su forma ionizada.

El rechazo de las moléculas orgánicas neutras aumenta con el peso molecular, compuestos con pesos moleculares por encima de 100 Da presentan valores altos del coeficiente de rechazo. La naturaleza del material de la membrana tiene una influencia importante en el valor de este parámetro.

Se estudió la efectividad del uso de membranas de ósmosis inversa para la eliminación de sólidos totales y metanol. En el estudio utilizaron una membrana SW30HR y un agua residual con un contenido de metanol de entre un 15 a 20% y 0,55 a 0,82% de sólidos totales. (J. Mora, 2002)

En el estudio se mantuvieron constantes la presión y la recirculación de flujo, (Q=300 litros/hora, P=50 bar), pero trabajando a tres temperaturas diferentes (20,30 y 40°C).

Las pruebas realizadas a mayores temperaturas provocan un aumento de flujo en el filtrado, esto es debido a que la viscosidad del agua disminuye y a parte, los poros de la membrana se dilatan.

En cuanto a los resultados que obtuvieron, respecto a los iones, los datos se pueden observar en la Tabla 8. De la tabla se concluye que los iones fueron rechazados con efectividad a excepción del B^{3+} , por lo que una membrana de OI sirve para tratar corrientes con contenido en iones como la caracterizada en el presente trabajo.

Tabla 8. Valores en porcentaje del rechazo de los distintos iones que contenía el agua residual tratada, a diferentes temperaturas.

Iones	Rechazo (%) a 20°C	Rechazo (%) a 30°C	Rechazo (%) a 40°C
Ca ²⁺	99,99	99,99	99,99
Mg ²⁺	98,08	98,36	99,59
Na ⁺	96,73	97,29	97,87
K ⁺	97,84	96,62	97,77
B ³⁺	87,14	81,94	84,04
Si ⁴⁺	94,8	92,83	96,8

Y en cuanto a la DQO:

Tabla 9. Valores de la DQO del agua inicial, filtrado promedio y el concentrado a diferentes temperaturas

Muestra	DQO (mgO₂/L) a 20°C	DQO (mgO₂/L) a 30°C	DQO (mgO₂/L) a 40°C
Filtrado promedio	122	119	119
Concentrado	37900	39300	39300
Agua original	-	9470	-

A partir de los resultados indicados en las Tablas 8 y 9 se deduce que la membrana de OI es correcta para un agua con alto contenido en DQO y con presencia de varios iones.

7. DESCRIPCION DEL TRATAMIENTO ELEGIDO

En cuanto a la regeneración de las aguas residuales, la aplicación de tecnologías de membranas está proporcionando una notable mejora en cuanto a la calidad de las aguas que se obtienen mediante este tratamiento, aunque también implican mayores costes. Por lo que la aplicación de los procesos de tratamiento debe buscar un equilibrio entre que sean sistemas viables y a costes competitivos.

En el caso de este trabajo, el objetivo es reutilizar el agua para reconducirla de nuevo en la propia planta de producción de metanol, ya sea en torres de refrigeración o como agua de proceso. Considerando la normativa a aplicar, que es la del RD 1620/2007 como ya se ha comentado con anterioridad, dependiendo de los usos que se le dé al agua marca unos valores máximos admisibles. Dentro de los usos industriales, el agua tratada que se vaya a utilizar en torres de refrigeración tiene que cumplir los valores más restrictivos de la norma (5mg/L de SS o 1 UNT de turbidez entre otras). Es por eso por lo que el agua que hay que obtener debe ser cumplir unos valores muy estrictos y por ello se deben aplicar los procesos que mejor traten el agua.

Por todo ello, teniendo en cuenta las ventajas del uso de las membranas:

- Elevada eficiencia de separación
- Procesos continuos
- Consumo de energía reducido y no se requieren reactivos químicos
- Plantas muy compactas que requieren de poco espacio

Y considerando la calidad del agua que hay que obtener, se diseñará un tratamiento mediante tecnología de membranas. Analizando las características de los distintos tipos de membrana se concluye que la membrana de ósmosis inversa es la que mejor trata el agua ya que es la que mejor capacidad tiene para eliminar los iones presentes en el agua al tener un tamaño de poro inferior al resto. Sin embargo, la membrana de OI es la que mayores problemas tiene de ensuciamiento, por ello hay que diseñar un sistema de pretratamiento previo a la membrana de OI.

Como ya se ha comentado con anterioridad, se suelen utilizar membranas de ultrafiltración y microfiltración como pretratamiento a una membrana de OI en un sistema combinado (Antonio Rodríguez Fernández-Alba, 2006). De esta forma, las membranas de UF y MF se encargan de eliminar la mayor parte de los sólidos en suspensión, reduciendo la carga de ensuciamiento de la membrana de OI.

En una planta real de transformación de carbón en metanol (ECO Environmental Investments, Ltd. situada en Mongolia), se diseñó un sistema combinado de membranas de UF con membranas de OI. Durante los ensayos con la planta piloto se dieron cuenta de que tenían grandes problemas con el ensuciamiento de las membranas de OI ya que se acumulaba un gran contenido de SS en dichas membranas. Las membranas de UF rompían sus fibras con gran facilidad permitiendo el paso de los sólidos en suspensión hacia las membranas de OI. (Mike Snodgrass, 2015)

En la planta real de Mongolia fue necesario aplicar un proceso previo a la membrana de ultrafiltración ya que, si no, esta se rompía y ensuciaba con gran facilidad teniendo que parar la planta en numerosas ocasiones.

Es por ello por lo que diseñar un buen sistema de pretratamiento es crucial para el correcto funcionamiento de un sistema combinado de membranas.

En el departamento de ingeniería medioambiental en Corea del Sur, se investigaron algunos tratamientos previos a una membrana de UF con el objetivo de reducir el ensuciamiento de esta, de forma que esta combinación de pretratamiento y membrana de UF pudiera producir un agua residual lo suficientemente tratada como para no causar problemas a la membrana de OI. (C.W. Lee, 2005)

En dicha investigación se estudiaron los procesos de coagulación, carbón activo en polvo (PAC) y un proceso de filtrado. En cuanto a la coagulación se utilizó alumbre ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$) y los resultados que obtuvieron se pueden observar en la Figura 14.

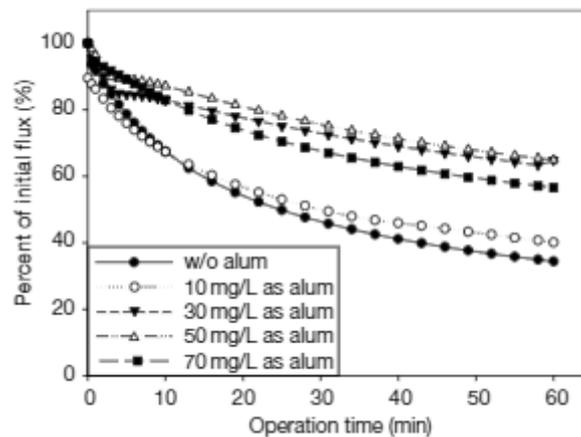


Figura 14. Cambios en el flujo de la membrana de UF bajo varias dosis de coagulante.

Lo que se extrae de la Figura 13 es que con una concentración de coagulante entre 30-50 mg/L se producen los mejores resultados, provocando un cambio del 40% de flujo que tendría la membrana sin pretratamiento a un 70%, lo que es una mejora muy notable.

En cuanto al carbón activo, los resultados que mostró fueron ligeramente inferiores a los obtenidos con el coagulante, pero en cambio probaron a utilizar una filtración directa con un tamaño de poro de 0,2 μ m seguido del carbón activo, y los resultados fueron los siguientes (Figura 15):

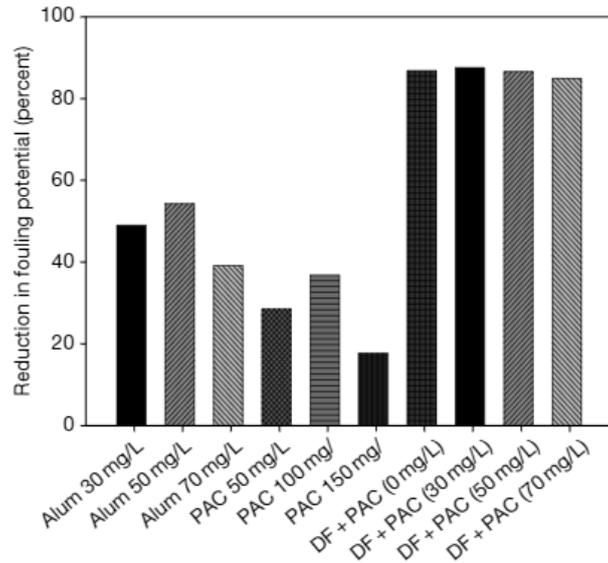


Figura 15. Reducción del potencial de ensuciamiento bajo diferentes condiciones previas a una membrana de UF

La Figura 15 proporciona datos muy interesantes pues los mejores resultados se dan cuando existe una filtración directa (0,2 μm), esto es debido a que las partículas de un tamaño de entre 0,2-1,2 μm estaban causando un gran impacto en el ensuciamiento. La adición de PAC no es determinante pues se dan los mismos valores cuando no se añadió PAC.

Gracias a este estudio se concluye que o bien una coagulación con una dosis de 50mg/L o una filtración directa son dos buenas técnicas para pretratar el agua residual previo a la membrana de UF de forma que esta no se rompa ni obstruya y por tanto no afecte a la membrana de OI. Aunque la filtración directa es sin duda la mejor opción.

Por todo ello, debido a que el agua a tratar se quiere reutilizar en torres de refrigeración de la planta de producción de metanol, esta agua debe alcanzar valores muy estrictos de calidad, por lo que se ha elegido la membrana de OI ya que proporciona el agua más limpia. Pero debido a que este tipo de membranas tienen problemas con el ensuciamiento hay que colocar, previo a ella, una membrana de UF pues ya hay estudios y casos reales que han observado el buen comportamiento de este sistema combinado de membranas. Junto con el estudio de C.W. Lee y colaboradores en el que concluyen que es necesario un pretratamiento antes de la membrana de UF para evitar daños y ensuciamiento en esta, se deduce que un sistema de filtración directa es la solución óptima, y con todo ello reducir al mínimo los problemas de ensuciamiento de la membrana de OI. Así, un sistema de filtración directa como pretratamiento junto con un sistema combinado de membranas de UF y OI es la solución elegida en el presente trabajo.

En el siguiente diagrama de bloques, Figura 16, se muestra con mayor precisión el esquema de la instalación.

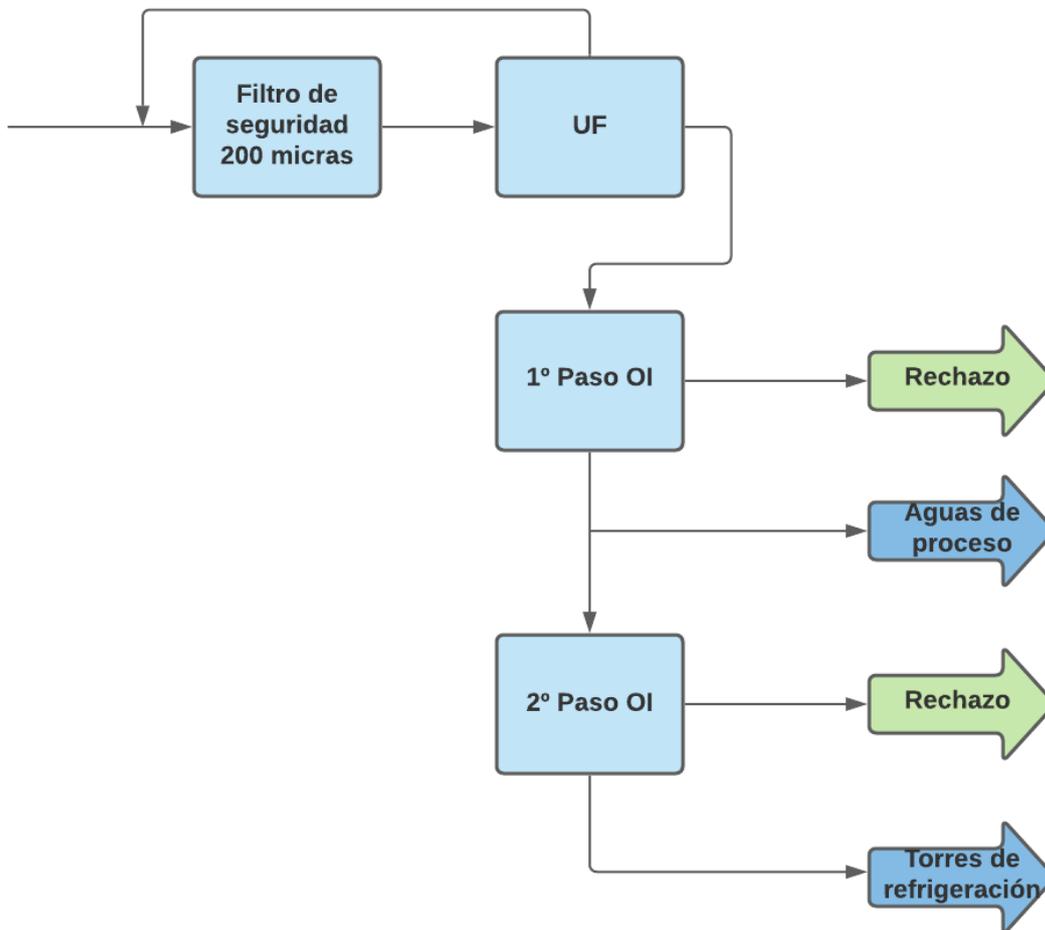


Figura 16. Diagrama de bloques de la planta de tratamiento de aguas residuales del presente trabajo.

8 DISEÑO DE LA INSTALACION DE UF

En cuanto a las membranas de ultrafiltración, los materiales que se suelen emplear en su fabricación son: poliacrilonitrilo, polímeros de polivinilcloruro/poliacrilonitrilo, polisulfonas, fluoruro de polivinilideno, poliamidas aromáticas, acetato de celulosa y materiales cerámicos (óxidos de titanio, aluminio y silicio).

En este caso se va a utilizar una membrana de fluoruro de polivinilideno (PVDF) (Figura 17). Este material garantiza una buena estabilidad química y mecánica, junto con una buena resistencia a la incrustación. Algunos casos reales que utilicen este material en membranas de UF son la planta de tratamiento de aguas residuales industriales en NingBo, China; una planta de tratamiento de aguas provenientes de una refinería de aceite en Beijing, China o el pretratamiento de agua de mar utilizado en HeBei, China. Todos los casos operando desde 2004. Las características del agua residual de la planta de NingBo se pueden ver en la Tabla 10, estos valores son similares a los del agua caracterizada en el presente trabajo por lo que se demuestra que una membrana de UF de PVDF es viable. (DOW)

Tabla 10. Valores de los principales parámetros del agua residual tratada en la planta de NingBo. (DOW)

Parámetro	Unidades	Valores
Temperatura	°C	18-25
pH		6,6
SiO ₂	mg/L	22,35
Fe	mg/L	0,3
Dureza	mmol/L	7,45
DQO	mg/L	10,24
TDS	mg/L	523,67
Conductividad	µs/cm	1160

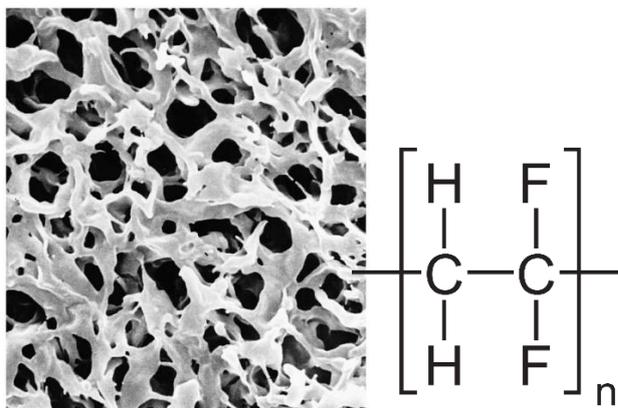


Figura 17. Filtro de membrana de fluoruro de polivinilideno. Fuente: (Fisher scientific, 2021)

El agua que va a tratar la membrana ya lleva un pretratamiento y el objetivo es disminuir los sólidos en suspensión y la turbidez, este material es adecuado ya permite las cantidades de contaminantes de esta agua y puede manejar un flujo de permeado grande, ideal para la cantidad de agua que se desea tratar.

Los requerimientos que debe presentar la membrana están enfocados en aquellos que permitan trabajar con la temperatura y el caudal del agua y que tengan un alto rechazo de sólidos, con el objetivo de disminuir la turbidez. Para ello se escoge la membrana de la serie SFX-2680 de la compañía DOW (Figura 18). Las especificaciones se muestran en la Tabla 11.



Figura 18. Imagen de un módulo de UF de la serie SFX-2680.

La tecnología DOW UF está basada en fluoruro de poliviinilideno hidrofílico de doble pared. La naturaleza hidrofílica de este material produce una reducción en el ensuciamiento orgánico de otros materiales más hidrófobos como poliertersulfona (PES), polipropileno (PP) o poliestireno (PS). La doble pared proporciona una mayor robustez y menor tendencia a la rotura.

Las fibras huecas de ultrafiltración tienen un diámetro interior de 0.70 mm y exterior de 1.30 mm y se disponen en haces de miles de fibras que se introducen en recipientes cilíndricos de U-PVC en configuración vertical, configurando un módulo muy compacto con el que se consigue una buena eficiencia en poco espacio.

La membrana presenta un tamaño de corte de 0.030 micras nominal, con lo que se consigue una gran eliminación sólidos en suspensión y turbidez, generando un filtrado de gran calidad.

Las membranas de fibra hueca de DOW trabajan de fuera hacia dentro, es decir, el agua filtrada se recoge en el interior de las fibras y la suciedad queda retenida en el exterior.

Este sistema evita la obstrucción de las fibras por los contaminantes presentes en la corriente de alimentación y permite una mayor carga contaminante de entrada, comparado con los sistemas que trabajan de dentro a fuera.

Tabla 11. Especificaciones técnicas para cada módulo de membrana de UF.

Tipo de modulo	Serie SFP-2660
Propiedades	
Longitud-L	1863 mm
Longitud-L ₁	1500
Longitud-L ₂	1610
Longitud-L ₃	1710
Diámetro-D	165
Anchura-W ₁	125 mm
Anchura-W ₂	250 mm
Superficie de membrana	33 m ²
Volumen	16 L
Peso (lleno)	41 kg
Peso (vacío)	25 kg
Fibras/módulo	5,760
Carcasa	UPVC

Los datos de longitudes y diámetros se pueden ver reflejados en la Figura 19:

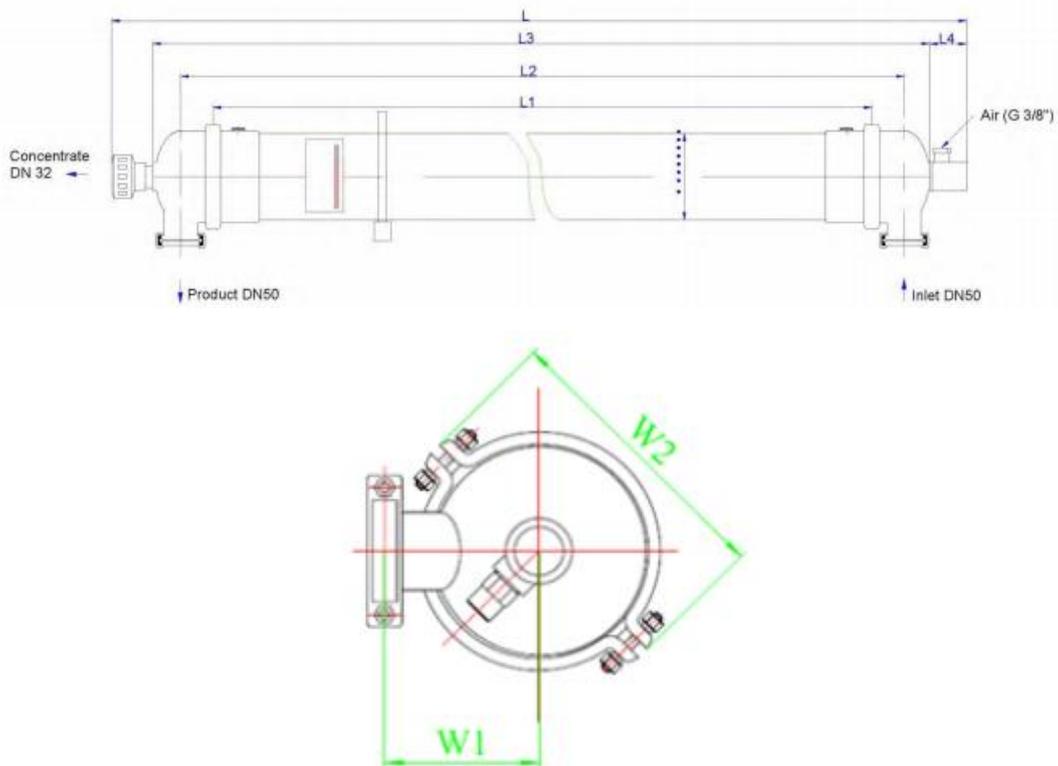


Figura 19. Dimensiones de los módulos de la membrana escogida.

En las siguientes tablas (Tablas 12 y 13) se detallan los rangos de operación y las condiciones típicas de funcionamiento de este tipo de membranas, proporcionadas por el fabricante.

Tabla 12. Rangos de operación de los módulos de membrana de DOW.

Rangos de operación	Valores
Flux de permeado	40-120 L/m ² h
Temperatura	1-40 °C
Máxima presión de entrada	6 bar
pH	2-11
Limpieza con NaOCl (máxima concentración)	2000 ppm

Tabla 13. Condiciones de proceso

Condiciones de proceso	Valor máximo
Máxima presión transmembrana	2,1 bar
Máxima presión en el contralavado	2,5 bar
Flujo de contralavado	100-150 l/m ² h
Sólidos en suspensión totales	100
Tamaño de partícula	300 µm
Frecuencia de contralavado	Entre 20 y 60 min
Turbidez	300 NTU
Materia en suspensión	100 mg/L
Carbono orgánico total	40 mg/L
Tamaño partícula	300 µm
Aceites/grasas	2 mL

El valor máximo admisible de tamaño de partícula es de 300 µm, pero el valor ideal de este es de menos de 150 µm. Esto quiere decir que en momentos puntuales puede retener partículas de 300 µm, pero en exceso puede provocar problemas de ensuciamiento. Es por eso por lo que se utiliza un filtro como pretratamiento como ya se ha comentado y será de 200 micras.

Los que menores costes conllevan son los de membrana en espiral y de fibra hueca. En cambio, los módulos tubulares son más adecuados en los casos que haya mayor problema de ensuciamiento, ya que al tener un mayor diámetro de la membrana reduce este problema. En este caso como la membrana de UF ya cuenta con un pretratamiento escogido adecuadamente para solucionar los problemas de ensuciamiento, la mejor configuración será en espiral o de fibra hueca. Debido a que el proveedor de membranas DOW que se ha escogido cuenta con módulos de fibra hueca, esta será la opción escogida. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba, 2006)

En la Figura 20 se observan las fibras huecas de una membrana de UF.

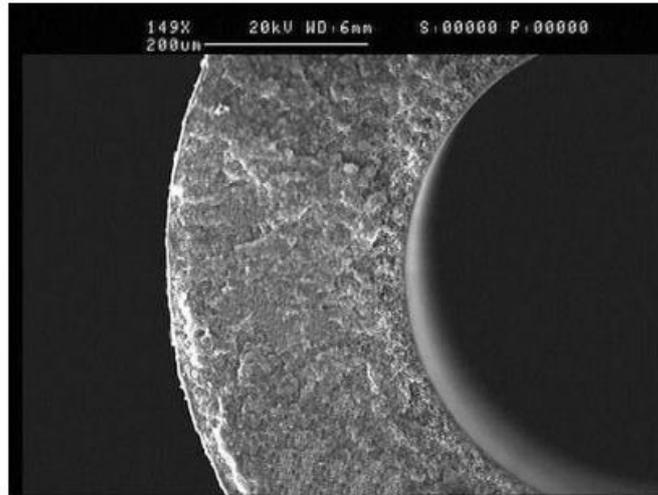


Figura 20. Sección al microscopio de la fibra hueca de una membrana de UF.

8.1 Cálculo del número de módulos necesarios y rendimiento.

La planta de tratamiento a diseñar tiene que tratar 120 m³/día. En la planta de tratamiento de aguas provenientes de una planta de producción de metanol en la ciudad de Ordos, la cual utiliza de igual forma un sistema combinado de ultrafiltración y ósmosis inversa, utiliza membranas de UF del mismo material (PVDF) con el mismo tamaño de poro (0.3 μm). En esta planta los módulos de UF producen un rendimiento del 90% por lo que se va a suponer ese rendimiento y junto con el caudal de entrada de la planta se puede obtener el caudal de permeado de la instalación mediante el uso de la Ecuación 1.

$$Q_{entrada} = 120 \frac{m^3}{día} = 5000 \frac{L}{h}$$

$$Q_{permeado} = Rendimiento * Q_{entrada}$$

Ecuación 1

$$Q_{permeado} = 0,9 * 5000 \frac{L}{h} = 4500 \frac{L}{h}$$

Para calcular el área total del sistema de UF hace falta hallar el flujo de la membrana de UF. El flujo de diseño (JV) de una membrana es la cantidad de agua de permeado, que la membrana produce por metro cuadrado y unidad de tiempo.

Para obtener el dato del flujo de diseño se va a utilizar el valor recomendado por el fabricante. Para ello se ha hecho uso del software Wave el cual está desarrollado por la empresa DOW que es de donde proceden las membranas de UF de esta planta. El programa indica que un flujo de permeado adecuado para las condiciones de operación es de $21 \frac{L}{m^2 * h}$.

A continuación, mediante la ecuación 2 se puede obtener el área total necesaria de las membranas.

$$A_{Total} = \frac{Q_{permeado}}{J_{permeado}} = \frac{4500 \frac{L}{h}}{21 \frac{L}{m^2 \cdot h}} = 214,29 m^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

A partir del área total de la instalación obtenida mediante la ecuación 2 y sabiendo el área de cada módulo de membrana, la cual la da el fabricante, se puede calcular el número de módulos de membrana necesarios para la planta mediante la Ecuación 3.

$$n^{\circ} \text{ de módulos de UF} = \frac{A_{Total}}{A_{módulo de membrana}} = \frac{214,29 m^2}{33 m^2} = 6,49 \quad \text{Ecuación 3}$$

Aproximadamente hacen falta 7 módulos de membrana de UF. Este dato coincide con la configuración propuesta por el programa con la salvedad de que el programa sobredimensiona con el objetivo de mantener la eficiencia cuando se tenga que parar una membrana para su limpieza. Es por ello por lo que se van a utilizar 8 módulos de membrana que se van a colocar en tubos de presión de 4 módulos cada uno. Por lo que habrá 2 tubos de presión.

Con el dato del número de módulos y sabiendo el área de cada una de ellas, se puede calcular el área total de la instalación real con el uso de la ecuación 4.

$$\text{Área}_{Total \text{ real}} = 8 \text{ módulos} * 33 m^2 = 264 m^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Con todos los datos introducidos en el programa Wave como las características del agua residual, la membrana escogida y el número de módulos, este indica que el caudal de permeado obtenido es de 109,1 m³/día pero de ese caudal parte irá hacia un tanque de permeado ya que esa agua se va a utilizar para la limpieza de las membranas. Al final el caudal que va hacia las membranas de OI es de 97,4 m³/día. Por lo que 11,7 m³/día irán al tanque de permeado.

Y mediante la diferencia del caudal de entrada y el de permeado se obtiene el rechazo que es de 10,9 m³/día.

En cuanto a la limpieza de las membranas se les va a aplicar los métodos de contralavado, CEB y CIP. La limpieza tiene lugar a temperatura ambiente.

En las siguientes tablas (14 y 15) se especifican los flujos y duraciones de los métodos de limpieza

Tabla 14. Valores de los flujos de los diferentes métodos de limpieza.

Flujos	Valores
Flujo de contralavado	$50 \frac{L}{m^2 * h}$
Flujo CEB	$40 \frac{L}{m^2 * h}$
Flujo de aire	$5 \frac{Nm^3}{h * módulo}$
Flujo CIP	$35 \frac{m^3}{d * módulo}$

Tabla 15. Frecuencia de las operaciones de las membranas de UF.

Frecuencia	Tiempo
Filtración	15 min
Ácido CEB	36 h
Base CEB	12 h
CIP	30 d
Tiempo en espera por cada tubo al día	10 min

En cuanto al método de contralavado, los datos del proceso se van a detallar en la Tabla 16

Tabla 16. Tiempos del método de contralavado.

Operaciones	Duración
Limpieza con aire	20 s
Drenaje	30 s
Contralavado	20 s
Flujo final	60 s
Número de contralavados entre cada limpieza con aire	1 contralavado

En cuanto al CEB se va a utilizar HCl como ácido con una concentración de 1000 ppm, y NaOH como base con una concentración de 500 ppm. Las duraciones de las operaciones son las mismas que para el contralavado (Tabla 16).

Por último, en el método CIP se van a utilizar los mismos compuestos como ácido y base, pero con unas concentraciones de 2000 ppm para el HCl y 1000 ppm para el NaOH. La duración del remojo químico es de 90 min.

Todos los valores indicados respecto a la limpieza de las membranas están dentro de los rangos adecuados que proporciona el fabricante.

8.2 Tanque de almacenamiento de la corriente de entrada.

Justo en la entrada de la corriente de agua residual se va a situar un tanque de almacenamiento, con la finalidad de homogeneizar el agua y de poder controlar la temperatura y el pH. Se va a suponer que el agua va a tener un tiempo de residencia de 1 hora en este tanque. Por lo que, mediante la ecuación 6 se puede obtener el volumen necesario de este tanque.

$$V_{D1} = Q_{entrada} * tiempo_R * F_{seguridad} = 120 \frac{m^3}{día} * 1 \frac{día}{24 hr} * 1,2 * 1 hr = 6 m^3 \quad \text{Ecuación 6}$$

Como se puede observar en la ecuación 6 se incorpora un factor de seguridad de un 20%. El resultado obtenido es 6 m³, se va a utilizar un tanque de la empresa Hidroserver de 6 m³ con un diámetro de 1,5 m y una altura de 3,84 m. El tanque está hecho de polietileno y cuenta con un cubeto envolvente para retener un posible derrame.

8.3 Tanque de almacenamiento del agua de permeado para el proceso de limpieza.

El tanque de agua de permeado tiene como función proporcionar agua a los procesos de limpieza. De este tanque parten dos corrientes, una que se dirige a las membranas de UF para llevar a cabo el proceso de contralavado, y otra que va al tanque de mezcla donde se preparan las disoluciones de limpieza CEB y CIP. El programa Wave indica los caudales que se necesitan en cada proceso. El proceso que requiere un mayor caudal es el contralavado. Pero debido a que tras cada filtración una parte del permeado se destina a este tanque, no es necesario que el tanque tenga que retener agua para la limpieza de una hora, si no, para un solo contralavado, ya que tras la siguiente filtración el tanque de permeado se volverá a llenar.

El volumen del tanque de permeado indicado por el programa es de 1,004 m³ y aplicándole el factor de seguridad:

$$V_{D2} = 1,004 * 1.2 = 1,205 m^3$$

Se va a utilizar un tanque de la empresa Hidroserver de 3000 L que tiene una altura de 2,2 m y un diámetro de 1,5 m.

8.4 Tanque de almacenamiento de mezcla

El volumen del tanque de mezcla debe ser ligeramente superior al de permeado ya que en este se va a mezclar el ácido y la base con el agua de permeado. Para ello se va a escoger un tanque de 2 m³ de la empresa Hidroserver.

8.5 Tanque de ácido y base.

Para el dimensionamiento de los tanques de ácido y base se considera que el volumen que deben tener es la diferencia entre el tanque de mezcla y el de agua del permeado.

$$V_{\text{Ácido y Base}} = (2 - 1,4) * 1,2 = 0,72 \text{ m}^3$$

El tanque escogido de la empresa Hidroserver tiene un volumen de 1 m³ y una altura de 1,35 m.

9 DISEÑO DE LA INSTALACION DE OI

En primer lugar, hay que hacer una revisión sobre las características del agua en la entrada al sistema de ósmosis inversa. Los iones se mantienen en el agua ya que la membrana de UF no los elimina. El objetivo del sistema de OI es producir agua limpia que se pueda utilizar de nuevo en la planta de producción de metanol (aguas de proceso) y también su reutilización en torres de refrigeración. Debido a que, en la legislación en el RD 1620/2007, hay diferentes valores máximos de calidad del agua para los dos casos, se van a implementar dos pasos de OI, parte del permeado del primer paso saldrá como agua para reutilizar en la planta, y el resto del permeado irá al segundo paso de OI, del cual su permeado irá para utilizarse en torres de refrigeración.

9.1 Diseño del primer paso de membrana.

La membrana que se va a utilizar en este primer paso de OI es ESPA-LD-4040 de Hydranautics. Es una membrana con una configuración de enrollamiento en espiral las cuales tienen menores problemas de ensuciamiento que las de fibra hueca. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba, 2006).

Las características de la membrana se pueden observar en la Tabla 17 junto con una imagen de su esquema y de la membrana (Figuras 21 y 22).

Tabla 17. Especificaciones de la membrana ESPA-LD-4040. (LENNTECH, 2020)

Especificaciones	Unidades	Valor
Marca	-	Hydranautics ESPA Membranes
Material	-	Poliamida
Porcentaje promedio de rechazo de NaCl	%	99,6
Presión máxima	kPa	41,37
Temperatura máxima	°C	45
Área activa	m ²	7,4
Longitud	cm	101,6
A	mm	1016
B	mm	100,3
C	mm	19,1
Peso	Kg	3,6

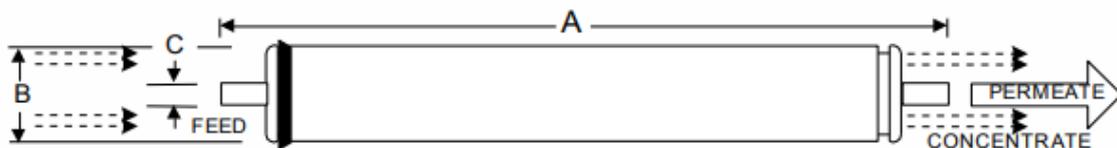


Figura 21. Esquema de la membrana ESPA-LD-4040 con sus medidas.



Figura 22. Imagen de la membrana ESPA-LD-4040.

9.1.1 Caudales del primer paso de OI

Los datos de partida son los siguientes:

$$\text{Caudal de alimentación} = Q_a = 102 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Rendimiento} = Y = 60\%$$

Se toma el valor del factor de recuperación cogiendo de referencia el de la planta real de Ordos.

A partir de la ecuación 7 se puede obtener el caudal de permeado:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_a} \quad \text{Ecuación 7}$$

Por lo que el valor de Q_p :

$$Q_p = Y * Q_a = 0,58 * 120 = 61,2 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 2550 \text{ L/h}$$

Y mediante el balance de la ecuación 8 podemos hallar el caudal de rechazo.

$$Q_a = Q_p + Q_r \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Q_r = Q_a - Q_p = 102 - 61,2 = 40,8 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 1700 \text{ L/h}$$

9.1.2 Cálculo del número de módulos necesario

En este caso se ha hecho uso del software IMSDesing desarrollado por Hydranautics que son los fabricantes de la membrana escogida para la OI. En este programa se indica un flujo de permeado promedio de $19,1 \frac{L}{m^2 \cdot h}$.

$$A_{Total} = \frac{Q_{permeado}}{J_{permeado}} = \frac{2550 \frac{L}{h}}{19,1 \frac{L}{m^2 \cdot h}} = 133,5 m^2$$

A partir del área total de la instalación obtenida mediante la ecuación 2 y sabiendo el área de cada módulo de membrana, la cual la da el fabricante, se puede calcular el número de módulos de membrana necesarios para la planta mediante la Ecuación 3.

$$n^{\circ} \text{ de módulos de UF} = \frac{A_{Total}}{A_{módulo de membrana}} = \frac{133,5 m^2}{7,4 m^2} = 18,04$$

Por lo que se necesitan 18 membranas de OI que se pueden agrupar en 6 módulos por cada tubo de presión, resultando en 3 tubos de presión. De igual modo que en la ultrafiltración se van a utilizar 4 tubos de presión de forma que se puedan limpiar sin perder eficiencia.

Utilizando el programa de IMSDesign ya comentado podemos utilizar un factor de ensuciamiento de cada membrana de forma que produzca datos más realistas, así como un aumento del paso de sal anual y la edad de la membrana. Este último valor se fija en 3 años, ya que un diseño evaluado pensando en el arranque de la planta (0 años), no es fiable. Los valores típicos para una correcta predicción a la hora de dimensionar las membranas, es una edad de membrana entre 3-5 años. Por otro lado, el factor de ensuciamiento de la membrana va ligado a la edad de esta y a la disminución del flujo por año, por lo que, al modificar estos parámetros, dicho factor se corrige automáticamente.

El porcentaje de disminución de flujo considerado oscila normalmente, entre el 4,5 y el 8,5 %. Depende de la calidad del agua y de la eficacia del tratamiento previo. Para el presente estudio se fijó en un 5 %.

Por el contrario, el factor de incremento de paso de sales anual viene definido según el material y modelo del elemento, aunque se puede modificar, sin salir del rango para las membranas de poliamida (5-15 % anual). En el diseño éste se establece en un 7%, lo que quiere decir que, al cabo de 3 años, la salinidad del permeado se incrementará un 21 % más respecto a la inicial.

Tras escoger la membrana el programa indica la mejor configuración de etapas, tubos de presión por etapa y número de elementos por tubo de presión.

El programa indica que para la membrana escogida se necesitan 6 módulos en cada tubo de presión y 3 tubos, por lo que coincide con los resultados obtenidos previamente, aunque en el programa no tiene en cuenta el sobredimensionamiento.

En los resultados obtenidos por el programa, aparece el índice de Langelier que determina si un agua es corrosiva (rojo) o por el contrario tiende a provocar incrustaciones de carbonato de calcio (amarillo), como es el caso. En este caso el programa advierte de que es necesario un antiincrustante. Por tanto, el sistema tendrá la necesidad de incorporar un inhibidor de incrustaciones.

Los resultados obtenidos son los de la Tabla 18

Tabla 18. Resultados obtenidos por el programa IMSDesign

	Entrada	Rechazo	Permeado
Caudal (<i>m³/día</i>)	102	40,8	61,2
Presión (bar)	6,72	6,25	0
TDS (mg/l)	2714	6656	80,1
pH	6,99	7,34	5,51
Conductividad (<i>μS/cm</i>)	4395	9986	123

9.2 Diseño de la instalación de OI (Segundo paso de membrana)

Tomando de ejemplo los estudios realizados por Mike Snodgrass et al. en la planta real de Ordor, se va a suponer que de los 61,2 m³/día que salen por el permeado del primer paso de OI, 30 m³/día van a ir destinados a torres de refrigeración por lo que esa cantidad irá al segundo paso de OI, el resto irá para su reutilización como agua de proceso a la planta de producción de metanol ya que cumple con la legislación.

A continuación, se va a realizar el diseño del segundo paso tomando como datos de partida los del permeado del primer paso y un caudal de 30 m³/día. Para continuar con los cálculos se van a coger los datos proporcionados por el programa pues son más realistas al tener en cuenta la edad de la membrana y una disminución en su flujo por cada año

La membrana que se va a utilizar en este caso es la membrana SanRO-HS2-4 de Hydranautics. Sus especificaciones y su esquema se pueden ver en la Tabla 19 y Figuras 23 y 24 respectivamente.

Tabla 19. Especificaciones de la membrana SanRO-HS2-4. (LENNTECH, s.f.)

Especificaciones	Unidades	Valor
Marca	-	Hydranautics
Porcentaje promedio de rechazo de NaCl	%	99,6
Presión aplicada	Mpa	1,28
Temperatura máxima	°C	45
Área activa	m ²	8,3
Longitud	cm	102

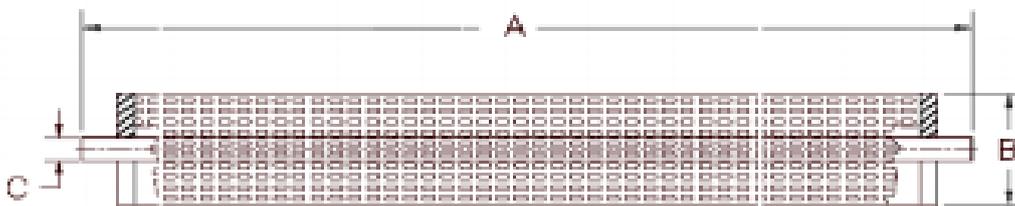


Figura 23. Esquema de la membrana SanRO-HS2-4.



Figura 24. Membrana SanRO-HS2-4.

9.2.1 Caudales del primer paso de OI

Los datos de partida son los siguientes:

$$\text{Caudal de alimentación} = Q_a = 30 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Rendimiento} = Y = 80\%$$

Se toma el valor del factor de recuperación cogiendo de referencia el de la planta real de Ordos.

A partir de la ecuación 7 se puede obtener el caudal de permeado:

$$Q_p = Y * Q_a = 0,8 * 30 = 24 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 1000 \text{ L/h}$$

Y mediante el balance de la ecuación 8 podemos hallar el caudal de rechazo.

$$Q_r = Q_a - Q_p = 30 - 24 = 6 \frac{m^3}{día} = 250 L/h$$

9.2.2 Cálculo del número de módulos necesario

De igual forma mediante el programa IMSDesign este indica un flujo de permeado promedio de $8,5 \frac{L}{m^2 \cdot h}$

$$A_{Total} = \frac{Q_{permeado}}{J_{permeado}} = \frac{1000 \frac{L}{h}}{8,5 \frac{L}{m^2 \cdot h}} = 117,65 m^2$$

A partir del área total de la instalación obtenida mediante la ecuación 2 y sabiendo el área de cada módulo de membrana, la cual la da el fabricante, se puede calcular el número de módulos de membrana necesarios para la planta mediante la Ecuación 3.

$$n^{\circ} \text{ de módulos de UF} = \frac{A_{Total}}{A_{módulo de membrana}} = \frac{117,65 m^2}{8,3 m^2} \approx 14$$

Por lo que se necesitan 14 membranas de OI que se pueden agrupar en 7 módulos por cada tubo de presión, resultando en 2 tubos de presión. Y teniendo en cuenta el sobredimensionamiento se instala un tubo de presión extra.

Los resultados obtenidos son los de la Tabla 19

Tabla 20. Resultados obtenidos por el programa IMSDesign.

	Entrada	Rechazo	Permeado
Caudal (m ³ /día)	30	6	24
Presión (bar)	2,28	2,18	0
TDS (mg/l)	105	465	14,9
pH	6	6,65	4,83
Conductividad (μS/cm)	152	670	26,1

9.3 Limpieza de las membranas de OI

En cuanto a la limpieza de las membranas de OI se va a utilizar el mismo sistema de limpieza que en UF. El agua de permeado almacenada, junto con NaOH (pH 12) y HCl (pH 2) mezclados en el tanque 4 (tanque de mezcla) en las concentraciones necesarias para poder realizar una limpieza de las membranas si fuese necesario. Cada módulo de membrana de OI cuenta con una válvula de tres vías justo en su entrada con el objetivo de en el momento de limpiar un módulo, cerrar la entrada de agua y abrir la entrada de disolución, de esta forma se puede trabajar en continuo y no es necesario parar toda la planta. Además, como en el dimensionamiento ya se tuvo en cuenta la limpieza, no se perderá eficiencia ya que hay un mayor número de módulos para ello.

10. ELEMENTOS SECUNDARIOS DE LA PLANTA

10.1 Bombas

Para la correcta selección de las bombas que van a impulsar las corrientes de agua hay que tener en cuenta que van a trabajar con aguas residuales. Es por ello por lo que se van a escoger bombas centrífugas ya que son adecuadas para trabajar con sólidos en suspensión.

Para la bomba que impulsa el agua de entrada (B1), el programa Wave indica que tiene que ser capaz de impulsar un caudal máximo de 164,6 m³/d y con una presión del al menos 3,4 bares. Se van a seleccionar bombas de la empresa Grundfos, en este caso, el modelo *SE.35.100.130.2.52S.C.N.51D.A* será la B1 ya que es específica para tratar aguas residuales, tiene un caudal máximo de 5780 m³/día y proporciona una presión suficiente para la instalación.

Para la bomba B2 que impulsa el caudal de contralavado, según el programa Wave debe permitir un caudal máximo de 158 m³/día y una presión de 2,5 bares. En este caso como la bomba se encarga de impulsar parte del permeado no hace falta que esté preparada para tratar aguas residuales. En este caso se ha escogido la bomba *CRK 4-30/3 A-W-A-AUUV*. Tiene un caudal nominal de 100 m³/día, y proporciona una presión suficiente para la instalación.

La bomba que impulse la corriente de ácido y de base y de la disolución va a ser una de la empresa Lutz, la bomba que sirve tanto para ácido como para base es la 0205-121. Tiene un caudal máximo de 65 m³/día y una altura máxima de 16 m.

Para el resto de las bombas de la planta se va a utilizar el modelo *DP10.65.26.2.50* de Grundfos que está preparada para tratar aguas residuales y proporciona un caudal y una altura suficiente para las necesidades de las bombas, siendo además económica.



Figura 25. Bombas escogidas para la planta.

En la Figura 25 se pueden ver las diferentes bombas de la planta que se van a utilizar. De izquierda a derecha: *DP10.65.26.2.50*, *SE.35.100.130.2.52S.C.N.51D.A*, *CRK 4-30/3 A-W-A-AUUV* y *0205-121*.

10.2 Válvulas

En la instalación se utilizan diferentes tipos de válvulas; válvula de seguridad, válvula reguladora de presión, válvula de compuerta y válvula de tres vías. La válvula de seguridad se coloca con el objetivo de que se abra en caso de que se produzca alguna sobrepresión en el sistema, impidiendo así, que se desarrolle un daño en el sistema.

La válvula de seguridad escogida es de la empresa Nabic Valve, el modelo N-542-025. Esta válvula es de acero inoxidable, de tipo hermética y con una presión nominal máxima de 25N. (Valfonta, 2011)

La válvula de 3 vías se utiliza para conectar con la salida una corriente u otra alternativamente. Para la planta se van a utilizar las válvulas de tres vías de la empresa RSpro. En concreto el modelo 232LPPC. Las válvulas están fabricadas en fundición nodular y acero inoxidable. (Bvalve, 2021)

En cuanto a las válvulas de compuerta se utilizan para permitir o detener el paso del agua gracias a un sistema giratorio a modo de grifo en su parte superior levantando o dejando caer la compuerta para liberar o impedir el paso del líquido. Se van a utilizar válvulas de la empresa RSpro. (Genebre, s.f.)

Por último, las válvulas reductoras de presión se colocan antes de la entrada a cada módulo de membrana de ultrafiltración para asegurar que la presión sea menor de 6 bares que es la presión máxima de la membrana. Se van a utilizar válvulas de la empresa RSpro. (Genebre, s.f.)

En la Figura 26 se pueden observar las válvulas mencionadas en dicho orden.



Figura 26. Válvula de seguridad, de tres vías, de compuerta y reductoras de presión de izquierda a derecha.

10.3 Agitador de mezcla

Para los cinco tanques de la planta se van a utilizar agitadores verticales de la marca Traxco. En específico el de 1,3 m, tiene un motor trifásico de 1/2 HP, con una potencia de 370 W y 1400 r.p.m. El agitador de mezcla es el que se puede ver en la Figura 27. (Traxco, 2020)



Figura 27. Agitador de mezcla VTG de la marca Traxco

10.4 Caudalímetros

Para los caudalímetros se van a utilizar los de la marca Siemens, en concreto el modelo 7ME6310-3TA11-1LA1. Es un sensor de caudal electromagnético de paso total. Adecuado para la medición de líquidos con aplicaciones principales en la industria química. El caudalímetro elegido es el que se puede ver en la Figura 28. (wiautomation, 2021)



Figura 28. Caudalímetro escogido para la planta, de la marca Siemens.

10.5 Manómetros

Para medir la presión se van a utilizar manómetros de la marca Gesa, en concreto el manómetro M0301 con caja en acero inoxidable y rosca de latón (Figura 29). cuyo objetivo es medir la presión que hay en el interior y, evitar así, que se produzca una sobrepresión en su interior. Además, se coloca un manómetro conectado a un controlador PID después de las bombas dosificadoras y antes del caudalímetro, de forma que, si la presión es superior a 3 bares, el PID manda una señal eléctrica a la bomba que se encarga de disminuir la presión por medio de una variación del caudal que la atraviesa. Por otra parte, se coloca un manómetro a la entrada de la membrana de OI y otro a la salida con el objetivo de controlar la presión transmembrana.



Figura 29. Manómetro de la marca Gesa escogido para la planta.

10.6 Controlador PID

En la planta se ha colocado un controlador PID junto con los caudalímetros y manómetros que están colocados junto con una bomba. Su función es la de controlar el caudal y la presión que circula por las tuberías en esos puntos de forma que si se sale de los parámetros deseables envíe una señal a la bomba para que esta impulse un mayor o menos caudal. El controlador elegido es de la marca Omega, la serie Platinum, el modelo CN32PT-220, que es el que se puede ver en la Figura 30. (Farnell, s.f.)



Figura 30. Controlador CN32PT-220 de la marca Omega escogido para la planta.

10.7 Sensor de temperatura.

Los sensores de temperatura se colocan en cada uno de los tanques con el objetivo de controlar la temperatura en ellos. Se ha escogido uno del fabricante Endress Hauser, el modelo iTHERM TM101-AACAA4GC2A1A1. Es un sensor de acero inoxidable que puede llegar a medir en un rango de temperaturas desde -50° hasta los 200°C. En la siguiente Figura 31 se puede observar el modelo escogido. (Automation24, 2021)



Figura 31. Sensor de temperatura del fabricante Endress Hauser escogido para la planta.

10.8 Sensor de nivel

Para medir el nivel inferior y superior de cada tanque se va a hacer uso de los sensores de nivel de Endress Hauser que aguantan temperaturas de entre -20°C y 80°C y presiones hasta 25 bares. El modelo escogido, FTC260-AA2D1, es el que se puede ver en la Figura 32. (Automation24, 2021)



Figura 32. Sensor de nivel del fabricante Endress Hauser escogido para la planta.

10.9 Medidor de pH

El medidor de pH escogido es el de la marca PCE instruments, el modelo PCE-CP 10. Es el que se puede ver en la Figura 33. (PCE instruments, 2020)



Figura 33. Medidor de pH para la planta.

10.10 Compresor

El compresor está situado en la corriente de aire previo a la entrada de este en las membranas con el objetivo de que adquiera la presión adecuada. Se va a utilizar un compresor de la marca CEVIK pro, el modelo Ca-Ab100/3M. (CEVIKpro, 2021) Tiene un caudal de aire aspirado máximo de 355 l/min y una presión máxima de 10 bares. El modelo escogido es el que se puede ver en la Figura 34



Figura 34. Compresor de la marca Cevik pro escogido para la planta.

10.11 Tuberías

Se van a utilizar tuberías de PVC y para el cálculo del diámetro de los diferentes tramos se va a hacer uso de la ecuación 9.

$$D = \sqrt{\frac{4*Q}{v*\pi}}$$

Ecuación 9

Donde Q es el caudal que circula por la tubería y v es la velocidad media de flujo, para este caso se va a suponer una velocidad media de 2 m/s para todas las zonas. En la Tabla 21 se pueden observar los diferentes tramos de tuberías con sus diámetros correspondientes en función del caudal.

Tabla 21. Cálculo de los diámetros de las tuberías en función del caudal circulante.

Tramo	Caudal (m ³ /día)	Diámetro (m)
Entrada	120	0,0300
Permeado UF	111	0,0285
Rechazo UF	8,7	0,0080
Entrada OI 1ºPaso	25,5	0,0137
Permeado OI 1ºPaso	15,3	0,0106
Rechazo OI 1º Paso	10,2	0,0087
Unión permeados de cada tubo de presión	61,2	0,0212
Entrada OI 2ºPaso	10	0,0086
Permeado OI 2ºPaso	8	0,0077
Rechazo OI 2ºPaso	2	0,0038
Tuberías de dosificación	120	0,0300
Resto de tuberías	120	0,0300

Para determinar la longitud de los diferentes tramos se ha medido sobre el plano a escala y las tuberías se van a comprar son de Bricodepot. (Bricodepot, s.f.) En la Tabla 23 están indicados los diámetros comerciales más cercanos a los diferentes diámetros calculados en la Tabla 21, el mínimo diámetro comercial es de 16 mm por lo que muchos tramos están agrupados en este diámetro comercial.

Tabla 23. Distancia en metros a comprar para los diferentes diámetros comerciales.

Diámetros comerciales escogidos (mm)	Longitud para comprar (m)
32	180
25	5
16	60

calidad donde puede regresar al tanque D1 o si no lo pasa a un gestor de residuos. A la salida del filtro se le introduce el antiincrustante al agua.

El agua que sale del filtro llega a la bomba B2 y aquí pasa por un manómetro y un caudalímetro que están conectados a un controlador PID, el objetivo es mantener el agua dentro de los parámetros establecidos. Tras esto el agua entra dentro de los módulos de membrana de UF. A la salida, se dirige a un control de calidad donde si no lo cumple regresa al tanque D0 y si sí que lo cumple puede avanzar hacia el sistema de OI. Una parte del permeado se dirige al tanque D2 con la finalidad de tener agua para los procesos de limpieza.

11.2 Limpieza a contralavado de UF

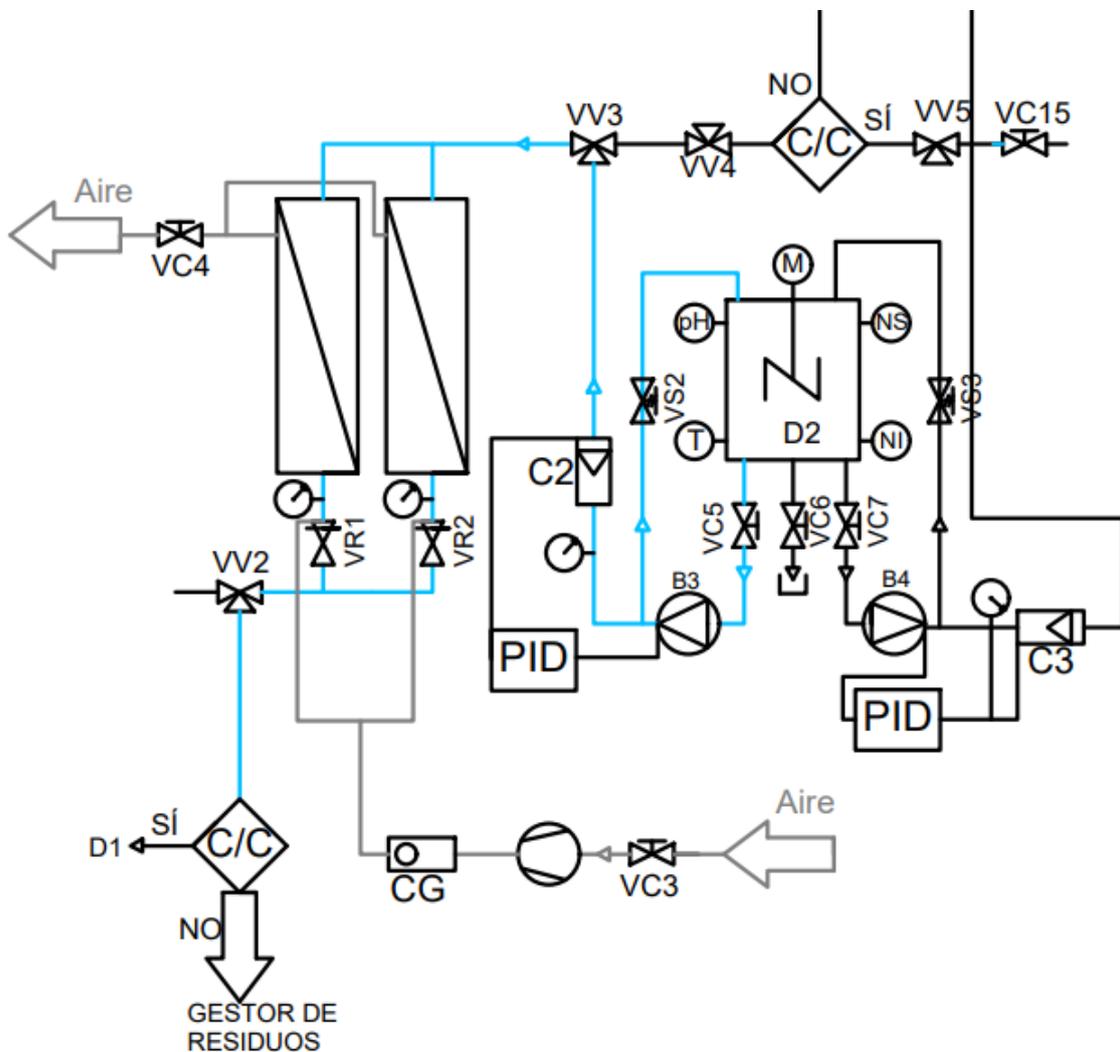


Figura 36. Recorte del plano general de la planta en el que se muestra el sistema de UF.

El objetivo del contralavado es introducir parte del permeado almacenado en la dirección contraria al flujo de operación de agua residual para así desobstruir los poros. Para ello se introduce desde la parte de arriba de la membrana y el recorrido en ella es de fuera hacia dentro. Este proceso dura 40 segundos y tras ello se introduce la corriente de aire para barrer todos los restos que se hayan podido quedar retenidos en la membrana.

En primer lugar, se cierra la válvula VC1 que es la que está situada a la salida del tanque de entrada D1.

A continuación, se abren las válvulas VC5, que es la que controla la salida de permeado del tanque D2, y VV3 para que el agua del permeado pueda entrar por la parte superior de la membrana. Esto se mantiene durante 40 segundos.

Por último, se cierra la válvula VC2 y se abre la VC3 que suministra el aire durante 20 segundos. Al acabar se cierra la VC3 y se abre la VV2 que dirige el agua al control de calidad donde puede dirigirse al tanque D1 o a gestión de residuos.

11.3 Limpieza CEB Y CIP

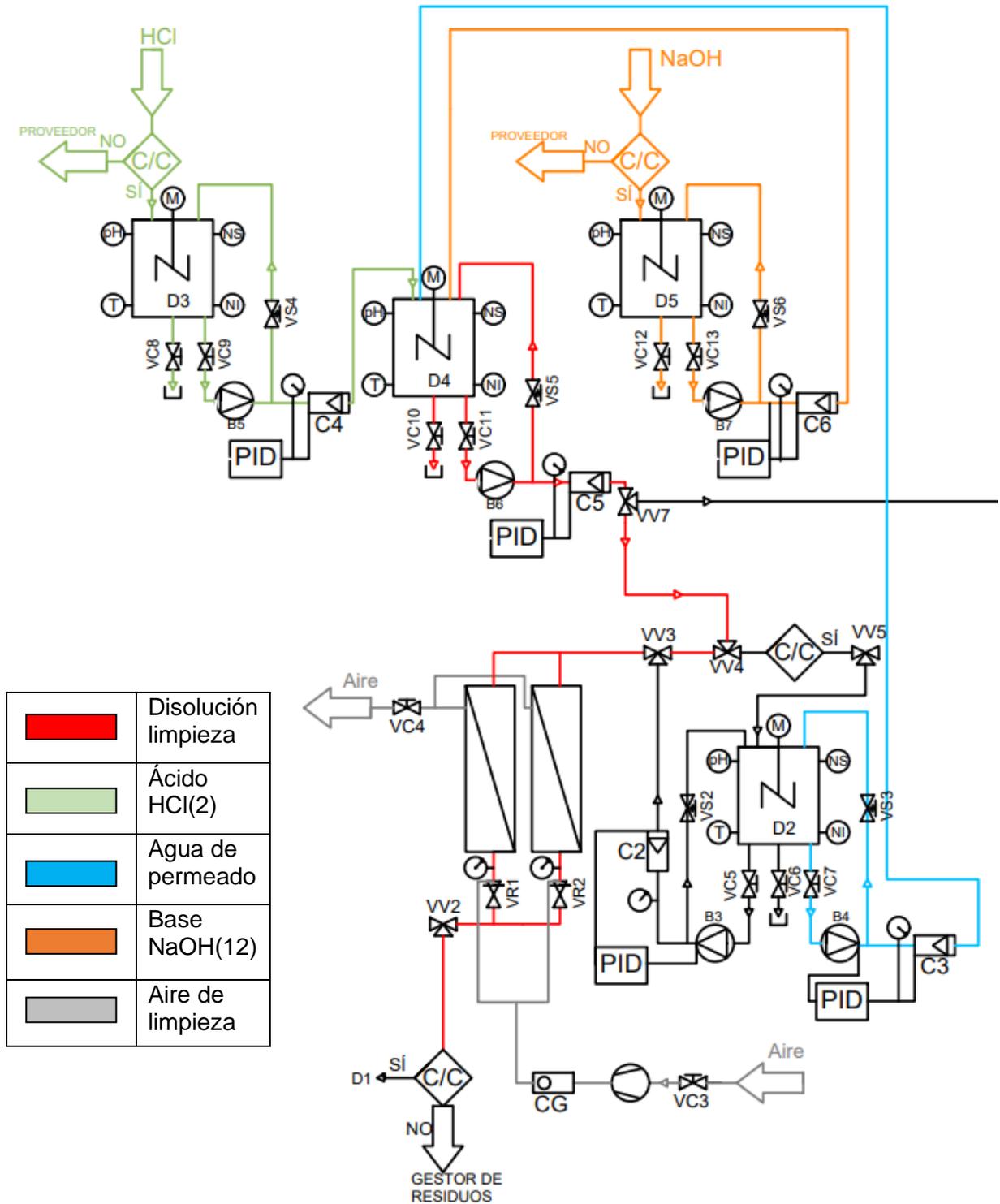


Figura 37. Recorte del plano general de la planta en el que se muestra el sistema de UF

Tanto para la limpieza CIP como para la CEB el sistema es el mismo, tan solo cambian las concentraciones y la duración de cada proceso.

El proceso empieza abriéndose la válvula VC9 que está situada a la salida del tanque de ácido, también tienen que estar en marcha la bomba B5 que suministre el ácido al tanque de mezcla D4.

En el tanque D4 tiene lugar la mezcla, para ello se abre la válvula VC7 y se activa la bomba B4, esto hace que salga agua de permeado del tanque D2 dirigiéndose al tanque D4.

Una vez se tiene preparada la disolución, se abre la válvula VC11 y se activa la bomba B6, de esta forma la disolución puede llegar hasta la válvula VV4 y de ahí hacia las membranas. El tiempo que esté la disolución en las membranas depende de si es limpieza CEB o CIP y ya se especificaron las duraciones con anterioridad.

Tras esto se lleva a cabo un enjuague siendo el mismo procedimiento que en un contralavado. Y, por último, se introduce la base en el tanque de mezcla abriéndose la válvula VC13 y activándose la bomba B7. Se prepara la disolución y de igual forma que antes se hace circular la mezcla en las membranas entrando por la parte superior.

Para que no queden restos se volverá a enjuagar hasta que se eliminen y el pH vuelva a valores de operación.

11.4 Sistema de OI

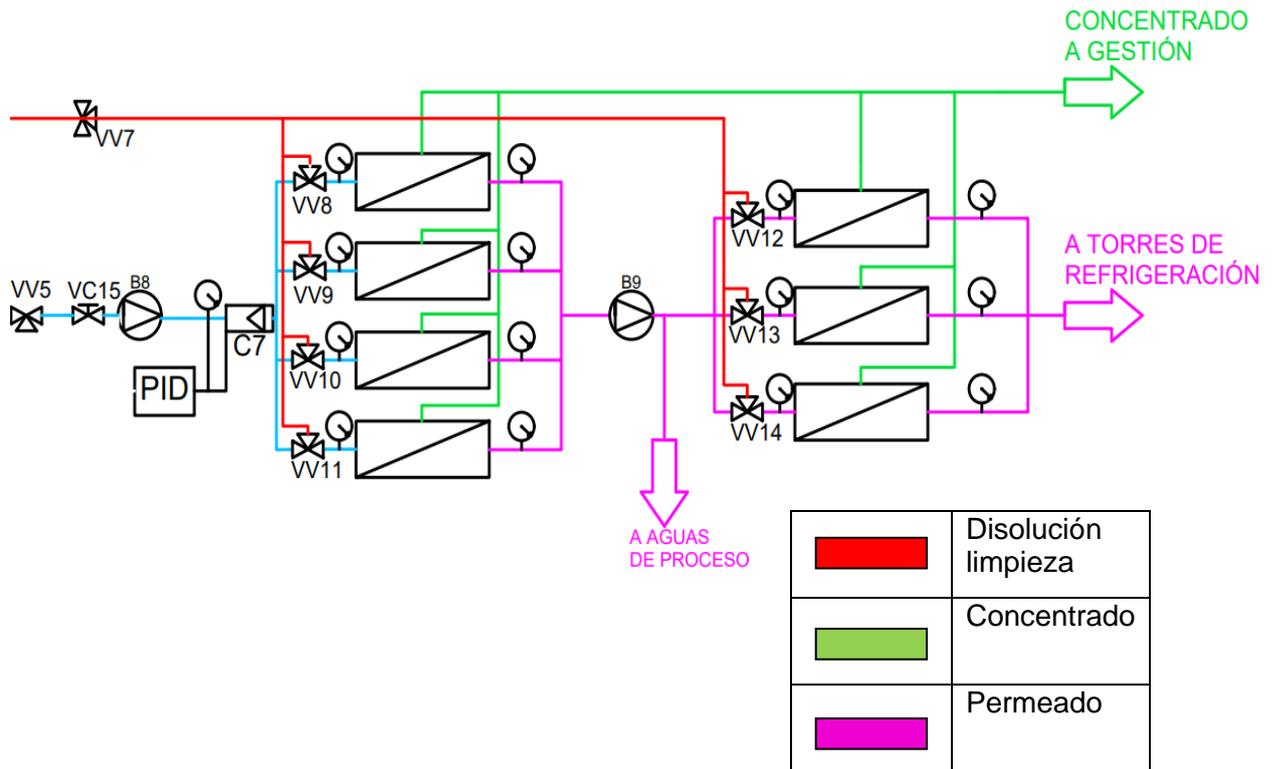


Figura 38. Recorte del plano general de la planta en el que se muestra el sistema de OI.

En cuanto al sistema de ósmosis inversa, el agua que sale del permeado de UF avanza por la válvula VV5 y llega a la bomba B8 donde es impulsado hacia las membranas de OI. Hay un manómetro en la entrada y otro en la salida de cada módulo con el objetivo de controlar la presión transmembrana.

A la salida de la primera etapa el agua pasa por otra bomba (B9) antes de dirigirse a la segunda etapa o para su reutilización como aguas de proceso.

En el momento en el que se tenga que limpiar un tubo, la disolución de limpieza que viene del tanque de mezcla pasa por la válvula VV7 y se dirige hacia las válvulas VV8, VV9, VV10, VV11, VV12, VV13 o VV14 en función de tubo a limpiar, la válvula de tres vías cierra el paso de aguas residual y permite el de la entrada de disolución de limpieza.

12. CONCLUSIONES

En el presente TFG se ha diseñado una planta de tratamiento de aguas residuales para tratar 120 m³/día procedentes de una planta de producción de metanol. Las conclusiones obtenidas de este trabajo son:

En primer lugar, se han estudiado las características físico-químicas de los efluentes de este tipo de instalaciones para poder elegir el tratamiento más adecuado. De esta búsqueda se ha visto que el agua residual tiene gran cantidad de sólidos en disolución, sólidos en suspensión y elevada turbidez.

En segundo lugar, se han analizado algunos métodos existentes que traten los contaminantes principales que lleva el agua a tratar como la adsorción, tratamiento biológico y reactores de membrana. Finalmente, se ha elegido un tratamiento físico mediante membranas sintéticas.

Se ha seleccionado las técnicas de membrana, las cuales se ha visto que pueden también tratar el agua residual del presente trabajo sin un elevado consumo de productos químicos, ni una gran necesidad de espacio, además de que pueden trabajar en continuo y son modulares.

Tras elegir el tratamiento más adecuado se ha procedido a su justificación y es que para eliminar tanta cantidad de iones que presenta el agua es necesario el uso de ósmosis inversa ya que separa ese tamaño de molécula. El principal problema es el ensuciamiento de esta y es por ello por lo que se ha implementado membranas de ultrafiltración como un pretratamiento a la OI. A partir de la bibliografía se ha optado por realizar una filtración directa de entre 150 y 200 micras, ya que puede reducir el ensuciamiento y proteger a la membrana de UF de las partículas más grandes.

La instalación cuenta con diferentes procesos de limpieza de las membranas con el fin de aumentar su eficiencia y su vida útil. Se ha implementado una limpieza a contralavado tras cada filtración, una limpieza CEB al día, y una limpieza CIP al mes.

Gracias a la planta diseñada en el presente trabajo se ha conseguido reutilizar el agua dentro del mismo proceso obteniéndose de esta forma agua reutilizada para aguas de proceso y para torres de refrigeración.

Por último, se ha realizado un diagrama de flujo de la planta, así como un presupuesto que permite saber el coste total de la instalación que asciende a 124.379,75 €.

Bibliografía

- A.Aghakhani, S. B.-F. (2010). Application of some combined adsorbents to remove salinity parameters from drainage water. *Desalination*, 217-223.
- Acosta Herrera, V.-M. F.-B.-C.-M. (2021). Competitive adsorption of pollutants from anodizing wastewaters to promote water reuse. *Journal of Environmental Management*, Volumen 293.
- Alfa Laval. (s.f.). *industrial news service*. Obtenido de <https://ins-news.com/es/100/81/2352/Filtraci%C3%B3n-por-membrana-con-ventajas-integradas.htm>
- Andrea Alejandra Acosta-Herrera, V.-M. F.-B.-C.-M. (2021). Competitive adsorption of pollutants from anodizing wastewaters to promote water reuse. *Journal of Environmental Management*, Volumen 293.
- Antonio Rodríguez Fernández-Alba, P. L. (2006). *tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Madrid.
- Asersa. (25 de Febrero de 2021). *Asociación Española de Reutilización Sostenible del Agua*. Obtenido de <https://www.asersagua.es/water-factory-21-una-planta-de-regeneracion-pionera/>
- Asociación española de desalación y reutilización. (25 de Febrero de 2020). *AEDyR*. Obtenido de <https://aedyr.com/tipo-configuracion-modulos-membranas/>
- Automation24. (2021). *Automation24*. Obtenido de https://www.automation24.es/sensor-de-temperatura-endress-hauser-itherm-tm101-aacaa4gc2a1a1?previewPriceListId=1&gclid=CjwKCAjw95yJBhAgEiwAmRrutPXOm6OtuO_PiShG7JmkwVaeGjHdD1I38mpWPg-0KX7A_L-8CNRr3BoC4PsQAvD_BwE
- Automation24. (2021). *Automation24*. Obtenido de https://www.automation24.es/sensor-de-nivel-de-un-punto-capacitivo-endress-hauser-minicap-ftc260-aa2d1?previewPriceListId=1&gclid=CjwKCAjw95yJBhAgEiwAmRrutH0mgEv_Egs6icw4rwo30-KRtg46FGfMSijFOXZFLIVbktcLfC5yyRoCgDUQAvD_BwE
- Bárbara Caroline Ricci, G. A. (2021). A novel submerged anaerobic osmotic membrane bioreactor coupled to membrane distillation for water reclamation from municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, Volume 414.
- BIOAZUL. (2015). *BIOAZUL*. Obtenido de <https://www.bioazul.com/mbr-biorreactor-de-membrana/>
- Boletín Oficial del Estado. (2007). *RD 1620/2007*.
- Bricodepot. (s.f.). *Bricodepot*. Obtenido de <https://www.bricodepot.es/tubo-pvc-o-16-mm-3-metros>
- Bvalve. (2021). *Bvalve*. Obtenido de <https://www.bvalve.es/productos/valvulas-de-control-de-tres-vias/>

- C.W. Lee, S. B. (2005). Application of ultrafiltration hybrid membrane processes for reuse of secondary effluent. *Desalination*, 239-246.
- Caline Rodrigues Gally, T. B.-F.-H. (2018). Electrodialysis for the tertiary treatment of municipal wastewater: Efficiency of ion removal and ageing of ion exchange membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5855-5869.
- CEVIKpro. (2021). *Leroy Merlin*. Obtenido de <https://www.leroymerlin.es/fp/10905223/compresor-correas-cevik-pro-ca-ab100-3m-de-3-cv-y-100l-de-deposito>
- Chemical Products ZOR. (s.f.). *Chemical Products ZOR*. Obtenido de <http://cpzor.com/Industria-petroquimica.php>
- Constanza Corrales, D. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta.
- Cramix. (2020). *Cramix*. Obtenido de <https://cramix.com/productos/agitadores-industriales/>
- CSM. (s.f.). *Technical Manual Reverse Osmosis Membrane*.
- DOW. (s.f.). *Dow Water Solutions*. Obtenido de www.dowwatersolutions.com
- Farnell. (s.f.). *Farnell*. Obtenido de <https://es.farnell.com/omega/cn32pt-220/temperature-controller-0-to-50deg/dp/3410267>
- Fisher scientific. (2021). *Fisher Scientific*. Obtenido de <https://www.fishersci.es/shop/products/emd-millipore-durapore-pvdf-membrane-filters-hydrophilic-0-45-pore-size-6/10277850>
- GEDAR. (2018). *Gestión de Aguas y Residuos*. Obtenido de <https://www.gedar.es/clasificacion-de-los-solidos-del-agua-residual/>
- Genebre. (s.f.). *Genebre*. Obtenido de <https://www.genebre.es/valvula-de-compuerta-con-cierre-de-epdm-y-cuerpo-de-fundicion-nodular-pn-16>
- Germán Isiordia, R. G.-E.-C. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y ciencias del agua*.
- Hongbin Yin, Y. Y. (2011). Phosphate removal from wastewaters by a naturally occurring, calcium-rich sepiolite. *Journal of Hazardous Materials*, 362-369.
- J. B. van Lier, F. P. (2015). Celebrating 40 years anaerobic sludge bed reactors for industrial wastewater treatment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 681-702.
- J. Mora, P. J.-M. (2002). Eliminación de sal y metanol del agua residual industrial por ósmosis inversa. *Tecnología en marcha*.
- Jafarinejad, S. (2017). Petroleum Waste Treatment and Pollution Control. En S. Jafarinejad, *Petroleum Waste Treatment and Pollution Control* (págs. 19-83).
- Jian-Jun Qin, M. H. (2007). Feasibility study on petrochemical wastewater treatment and reuse using submerged MBR. *Journal of Membrane Science*, 161-166.

- Jordan Hristov, J. B.-H. (2021). Reuse of treated water in European agriculture: Potential to address water scarcity under climate change. *Agricultural Water Management*.
- Jürgen Haid, U. K. (2007). Lurgi's Mega-Methanol technology opens the door for a new era in down-stream applications. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 399-404.
- LENNTECH. (2020). *LENNTECH*. Obtenido de <https://www.lenntech.es/productos/Hydranautics-ESPA-Membranas/ESPA2-LD-4040/ESPA2-LD-4040/index.html>
- LENNTECH. (s.f.). *LENNTECH*. Obtenido de https://www.lenntech.com/Data-sheets/Toray-TMG-D-L.pdf?h=1&language_id=24
- Lorena Delgadillo-Velasco, V. H.-M.-V.-M.-V. (2018). Screening of commercial sorbents for the removal of phosphates from water and modeling by molecular simulation. *Journal of Molecular Liquids*, 443-450.
- Lucia Constanza Corrales MSc, D. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta.
- M. Bartlett, M. B. (1995). An experimental study for the development of a qualitative membrane cleaning model. *Journal of Membrane Science* 105, 147-157.
- Methanol Institute. (s.f.). *Methanol Institute*. Obtenido de <https://www.methanol.org/about-methanol/>
- Mike Snodgrass, R. V. (2015). *Wastewater Reuse at a Methanol Production Plant*.
- N. Peña, S. G. (30 de Mayo de 2012). Evaluating impact of fouling on reverse osmosis membranes performance. *Desalination and Water Treatment* 51, 958-968.
- OCWD. (2019). *Orange County Water District*. Obtenido de <https://www.ocwd.com/about/history/>
- Pablo Ures Rodríguez, A. J. (2015). *FILTRACIÓN EN MEMBRANA Y ÓSMOSIS INVERSA*. La Coruña.
- PCE instruments. (2020). *PCE instruments*. Obtenido de https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-ph-kat_70094.htm
- Reza Haghsheno, A. M. (2009). Study of kinetic and fixed bed operation of removal of sulfate anions from an industrial wastewater by an anion exchange resin. *Journal of Hazardous Materials*, 961-966.
- Salvatierra, C. F. (18 de Agosto de 2005). *Textos científicos*. Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/quimica/metanol/obtencion>
- Sastre, J. A. (2005). *Tecnologías para La Sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Madrid: Fundación EOI.
- Shujuan Huang, C. K. (2020). Performance and process simulation of membrane bioreactor (MBR) treating petrochemical wastewater. *Science of the Total Environment*.

- Sidharth Abrol, C. M. (2011). Modeling, simulation and advanced control of methanol production from variable synthesis gas feed. *Computers and Chemical Engineering*, 117-131.
- Tejedor, A. S. (2012). *Química Orgánica Industrial*. Obtenido de <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-04.php>
- Thanh-Binh Nguyen, X. T.-D.-H.-D.-T.-T.-T.-L. (2016). Anaerobic membrane bioreactors for industrial wastewater treatment. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 168-188.
- Torres, A. (s.f.). *Análisis de aguas residuales*. Granada.
- Traxco. (2020). *Traxco*. Obtenido de <https://www.traxco.es/tienda/agitadores-industriales>
- Valfonta. (2011). *Valfonta*. Obtenido de <https://www.valfonta.com/producto/valvula-de-seguridad-de-apertura-total-alper/>
- Vinyl plus. (13 de Julio de 2015). *VinylPlus, Committed to Sustainable Development*. Obtenido de <https://vinylplus.eu/>
- wiautomation. (2021). *wiautomation*. Obtenido de https://es.wiautomation.com/siemens/productos-generales/7ME63103TA111LA1?utm_source=shopping_free&utm_medium=organic&utm_content=ES114476&gclid=Cj0KQCQjwg7KJBhDyARIsAhrAXaGAue7ZQulUM8JVUXvCUAySO6vYRFodOqud0A0Z-P0MY9oUaxoT9i0aAqgWEALw_wcB
- Yishan LIN, Y. H. (2008). *Anaerobic treatment of wastewater containing methanol in upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor*. Xi'an: Higher Education Press and Springer-Verlag 2008.
- Zhangyi Xu, Y. X. (2019). A sustainable ferromanganese biochar adsorbent for effective levofloxacin removal from aqueous medium. *Chemosphere*, Volume 237.
- Zyl, P. J., Wentzel, M. C., Ekama, G. A., & Riedel, K. J. (2008). Design and start-up of a high rate anaerobic membrane bioreactor for the treatment of a low pH, high strength, dissolved organic waste water. *Water Science & Technology*, 291-295.

ANEXO 1 Fichas de las membranas seleccionadas

Membrana SP-2660

DOW™ Ultrafiltration Modules

Model SFP-2660 and SFD-2660

Features

The DOW™ ultrafiltration (UF) modules are made from high strength, hollow fiber membranes that have excellent features and benefits:

- 0.03 µm nominal pore diameter for removal of bacteria, viruses, and particulates including colloids to protect downstream processes such as RO
- PVDF polymeric hollow fibers for high strength and chemical resistance allows longer membrane life
- Hydrophilic PVDF fibers for easy cleaning and wettability that help maintain long term performance
- Outside In flow configuration for high tolerance to feed solids that helps reduce the need for pretreatment processes
- U-PVC housing, helping to eliminate the need for costly pressure vessels

This module is an ideal choice for systems capacities of 50 m³/hr (220 gpm) or less. The shorter, 60 inch length module offers higher efficiencies over a wider range of feed water conditions compared to longer length modules. The smaller, 6 inch diameter module allows a more compact design for space constrained installations.

DOW™ Ultrafiltration Modules can be used for a wide variety of treatment applications such as surface water, seawater, industrial wastewaters, and secondary effluent wastewater.



Product Specifications

Model	Type	Part #	Membrane area		Module volume		Weight (empty/ water filled)	
			m ²	ft ²	Liters	Gallons	Kg	lbs
SFP-2660	Pretreatment	280931	33	355	16	4.2	25/41	55/90
SFD-2660	NSF/ANSI 61 Drinking water	324166	33	355	16	4.2	25/41	55/90

Figure 1: SFP and SFD 2660 (6-inch diameter)

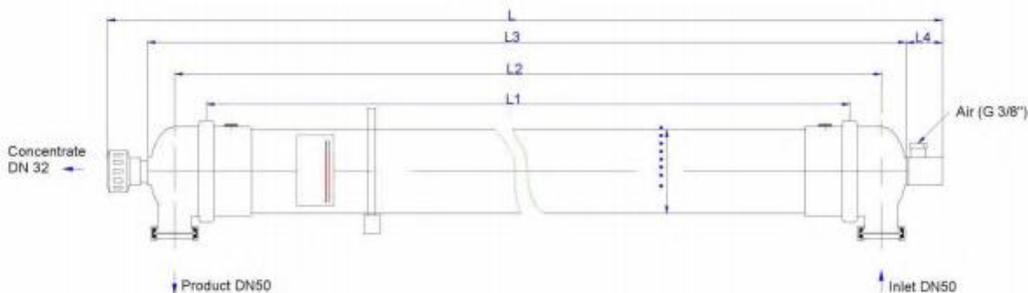
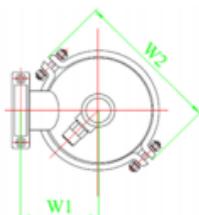


Figure 2



Properties Units	Length				Diameter D	Width	
	L	L1	L2	L3		W1	W2
SI (mm)	1863	1500	1610	1710	165	125	250
US (inch)	73.2	59.1	63.4	67.3	6.5	4.9	9.8

Operating Parameters

	SI units	US units
Filtrate Flux @ 25°C	40 – 90 l/m ² /hr	24 – 53 gfd
Flow Range Per Module ¹	1.3 – 3.0 m ³ /hr	5.9 – 13.1 gpm
Temperature	1 – 40°C	34 – 104°F
Max. Inlet Module Pressure (@ 20°C)	6.25 bar	93.75 psi
Max. Operating TMP	2.1 bar	30 psi
Max Operating Air Scour Flow	12 nm ³ /hr	7.1 scfm
Max Backwash Pressure	2.5 bar	36 psi
Operating pH	2- 11	
NaOCl (max.)	2,000 mg/L	
Particle Size (max.)	300 μ	
Flow Configuration	Outside in, dead end flow	
Expected Filtrate Turbidity	≤0.1 NTU	
Expected Filtrate SDI	≤2.5	

¹ Flow range represents DOW™ Ultrafiltration SFP-2660 and SFD-2660 Modules for filtrate flux range shown

Important information

Proper start-up of a UF system is essential to prepare the membranes for operating service and to prevent membrane damage. Following the proper start-up sequence also helps ensure that system operating parameters conform to design specifications so that system water quality and productivity goals can be achieved. Before initiating system start-up procedures, membrane pretreatment, installation of the membrane modules, instrument calibration and other system checks should be completed. Please refer to the product technical manual.

Operation guidelines

Avoid any abrupt pressure variations during start-up, shutdown, cleaning or other sequences to prevent possible membrane damage. Flush the UF system to remove shipping solution prior to start-up. Remove residual air from the system prior to start up. Manually start the equipment. Target a permeate flow of 60% of design during initial operations. Depending on the application, permeate obtained from initial operations should be discarded. Please refer to the product technical manual.

ESPA2-4040



Membrane Element

ESPA2-4040

(Low Fouling Technology)

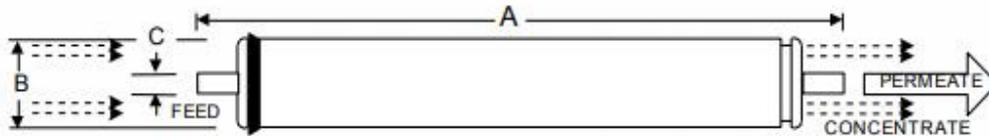
Performance:	Permeate Flow:	2000 gpd (7.57 m ³ /d)
	Salt Rejection:	99.6 % (99.4 %minimum)
Type	Configuration:	Low Fouling Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide
	Membrane Active Area:	80 ft ² (7.43m ²)
	Feed Spacer:	34mil (0.864mm) with biostatic agent
Application Data*	Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.16 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
	pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13)*
	Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
	Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
	Maximum Feed Flow:	16 GPM (3.6 m ³ /h)
	Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element:	5:1
Maximum Pressure Drop for Each Element:	10 psi	

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

Test Conditions

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

- 1500 PPM NaCl solution
- 150 psi (1.05 MPa) Applied Pressure
- 77 °F (25 °C) Operating Temperature
- 15% Permeate Recovery
- 6.5 - 7.0 pH Range



A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)	8 (3.6)

Core tube extension = 1.05" (26.7 mm)

Notice: Permeate flow for individual elements may vary +25 or - 15 percent. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box. All elements are guaranteed 99.4% minimum rejection.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 7/29/09

For information contact:

info@lenntech.com
www.lenntech.com

Tel. +31-15-26.10.900
Fax. +31-15-26.16.289

SanRO-H2S-4



SanRO-HS

SanRO-HS Heat Sanitizable, High Rejection RO Composite Membrane Elements are designed specifically for High Performance in USP and other high purity water systems. Elements with Sanitary, Full-fit outer-wraps eliminate "dead flow" areas for maximum bacteria control. SanRO-HS components conform to FDA regulation CFR Title 21.

Products:

Membrane Type	Description	Element Performance*			System Performance**	
		Permeate Flow and Rejection		% Rej	Applied Pressure psig (MPa)	Permeate TDS, PPM
		GPD (m ³ /day)				
8040	4040					
SanRO-HS	Heat Sanitizable, High Rejection Composite	8800 (33.3) SANRO HS-8	2200 (8.4) SANRO HS-4	99.7	180 (1.24)	6.6
SanRO-HS2	Heat Sanitizable, High Flux, High Rejection Composite	14,000 (53) SANRO HS2-8	3000 (11.4) SANRO HS2-4	99.6	129 (0.89)	12.5

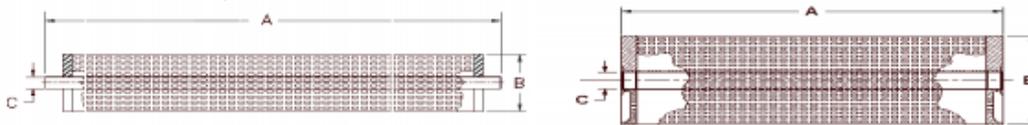
* Element Performance is at 225 psig (1.55 MPa), 1500 mg/L NaCl, 15% Recovery, 77°F (25 °C).

** Applied Pressure and Permeate TDS are projected values for a 2:2:1 array system operating at 15 GFD (26 LMH) average flux with 500 mg/L TDS feed (NaCl), 80% Recovery, pH 7, 77°F (25 °C).

Type	Configuration:	Sanitary (Full-Fit) Spiral Wound
	Membrane Polymer:	Composite Polyamide

Application Data†	Maximum Applied Pressure	600 psig (4.14 MPa)
	Maximum Chlorine Concentration	< 0.1 PPM
	Maximum Operating Temperature	131 °F (55 °C)
	Sanitizing Temperature/Pressure Max.	185/25 °F/psig (85/0.17 °C/MPa)
	Operating pH Range:	2.0 - 10.0
	Cleaning pH Range:	1.0 - 12.0
	Maximum Pressure Drop for a vessel	60 psig (0.41 MPa)

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



Size	A in (cm)	B in (cm)	C in (cm)	Area ft ² (m ²)
4040	40.0 (102)	3.98 (10.1)	0.750 (1.9) O.D.	90 (8.3)
8040	40.0 (102)	7.90 (20.1)	1.125 (2.9) I.D.	380 (35.2)

Notice: Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box. All SanROHS elements are heat set at the factory with a one hour vacuum rinse at 85 °C. Elements include interconnector assembly, ATDs, and one brine seal. Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 5/13/14

Hydranautics Corporate: 401 Jones Road, Oceanside, CA 92058
1-800-CPA-PURE Phone: 760-901-2500 Fax: 760-901-2578 info@Hydranautics.com

ANEXO 2 CALCULOS REALIZADOS CON LOS PROGRAMAS WAVE Y IMSDESIGN

Wave

Stream Definition

Stream 1 %

Add Stream

Feed Water - Stream 1

Feed Parameters

Water Type:

Suggested Sub-type:

Water Sub-type:

Solid Content

Turbidity: NTU

Total Suspended Solids (TSS): mg/L

SDI:

Organic Content

Organics (TOC): mg/L

Temperature

Minimum: °C

Design: °C

Maximum: °C

pH @ 30.0°C: pH @ 25.0°C:

Additional Feed Water Information

Cations

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
NH ₄	0.002	0.005	0.000
K	25.017	32.020	0.640
Na	450.306	980.215	19.587
Mg	80.054	329.662	6.587
Ca	338.658	845.733	16.900
Sr	0.000	0.000	0.000
Ba	0.000	0.000	0.000
Total Cations:	894.037		43.715

Anions

Symbol	mg/L	ppm CaCO ₃	meq/L
CO ₂	0.844	1.407	0.028
HCO ₂	453.660	372.072	7.435
NO ₂	299.795	241.962	4.835
Cl	619.577	874.570	17.476
F	0.000	0.000	0.000
SO ₄	639.563	666.351	13.315
PO ₄	35.000	55.328	1.106
Br	0.000	0.000	0.000
Total Anions:	2,048.440		44.195

Neutrals

Symbol	mg/L
SiO ₂	0.000
B	0.000
CO ₂	43.009
Total Neutrals:	43.009

Total Dissolved Solids : 2,942.965 mg/L

Charge Balance: -0.000002 meq/L

Estimated Conductivity: 4,446.39 µS/cm

Figura 39. Pestaña de Análisis del software Wave donde se introduce las características del agua residual.

Home
Feed Water
Ultrafiltration
Summary Report

Design

Configuration

Backwash

CEB

CIP

Additional Settings

Less

Design

UF Feed Flow Rate

Automatic: m³/d

Filtration TMP Increase Between Processes

Backwash: mbar/h

Acid CEB: mbar/h

Alkali CEB: mbar/h

CIP: mbar/h

mini-CIP: mbar/h

Design Instantaneous (Gross) Flux and Flow Rates

Recommended Range:

Filtrate Flux (for 10 °C): 1.00 - 75.00 LMH

Backwash Flux: 80.00 - 120.00 LMH

CEB Flux: 60.00 - 120.00 LMH

Forward Flush Flow: 24.00 - 120.00 m³/d/module

Air Flow: 5.00 - 12.00 Nm³/h/module

CIP Recycle Flow Rate: 24 - 96 m³/d/module

mini-CIP Recycle Flow Rate: 24 - 96 m³/d/module

Module Selection

Only show modules approved for drinking water applications

DuPont™ UF Module

Design Cycle Intervals

Filtration Duration: min

Acid CEB: h

Alkali/Oxidant CEB: h

CIP: d

mini-CIP: d

Membrane Integrity Testing:

Offline Time per Train: min/day

UF

Module: Ultrafiltration SFP-2660

Total UF Trains: 2

UF Modules: 2 x 4 = 8

Operating Flux: 21 LMH

UF System Recovery: 85.6%

Feed Water

Average Feed Flow: 120 m³/d

Type: Waste Water

TSS: 100.0 mg/L

TOC: 25.0 mg/L

Turbidity: 22.0 NTU

Feed Pump: Max 163.1 m³/d @ 3.4 bar

Strainer: 150 µm, 99.5% Recovery

CIP Pump: 140 m³/d @ 2.5 bar

Air Scour: 20 Nm³/h @ 0.75 bar

Backwash Pump: BW 158.4 m³/d / CEB 126.7 m³/d @ 2.5 bar

Filtrate Tank: 791 L

Waste: 17.2 m³/d

Diseño de un proceso de tratamiento de 120 m³/día de aguas residuales de la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas.

Figura 40. Pestaña de Diseño del software Wave donde se introducen los flujos, la membrana seleccionada y la duración de los intervalos.

Configuration

Design Options

Standby Option: Constant operating flux, variable system output

Storage Tank Option: Backwash + filtrate

Module Selection

Only show modules approved for drinking water applications

DuPont™ UF Module: Ultrafiltration SFP-2660

Selected Configuration

Number of Trains

Online Trains:

Standby Trains:

Redundant Trains:

Total Trains:

Modules/Train:

Total Modules:

Operating Flux: LMH

Show UF System Diagram

Recommended Configurations									
Option	Online Trains	Standby Trains	Total Trains	Max Offline BW/CEB	Modules/Skid	Skids/Train	Modules/Train	Online Modules	Total Modules
1	1	0	1	1	-	-	6	6	6
2	2	0	2	1	-	-	4	8	8

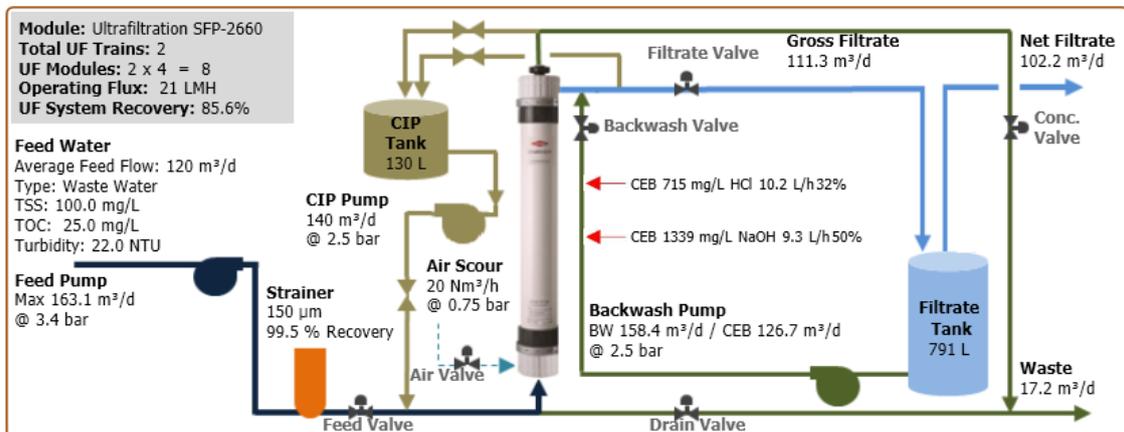


Figura 41. Configuraciones propuestas por el software y esquema del proceso.

Diseño de un proceso de tratamiento de 120 m³/día de aguas residuales de la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas.

UF Water Quality

Stream Name		Stream 1	
Water Type		Waste Water (10.0 - 40.0 °C)	
		Feed	Expected UF Product Water Quality
Temperature	(°C)	30.0	30.0
Turbidity	(NTU)	22.0	≤ 0.1
TSS	(mg/L)	100.0	-
Organics (TOC)	(mg/L TOC)	25.0	22.5
SDI ₁₅		4.0	≤ 2.5
TDS	(mg/L)	3004	3004
pH		7.0	7.0

Figura 42. Resultados proporcionados por el software Wave.

IMSDesign

Proyecto: OI Calculado por: - Temperatura: 25.0 °C Tipo de agua: Agua residual MF/UF

pH: 7,00 CO3: 0,481 mg/l CO2: 59,075 mg/l NH3: 0,00 mg/l Conductividad E: 4667 µs/cm

Cationes			Aniones		
	mg/l	mg/l CaCO3		mg/l	mg/l CaCO3
Calcio	326,06	815,16	HC03	450,00	368,85
Mg	80,00	327,87	S04	640,00	666,67
Na	450,00	978,26	Cl	620,00	874,47
K	25,00	31,97	F	0,00	0,00
NH4	0,00	0,00	N03	300,00	241,94
Ba	0,000	0,00	P04	0,35	0,55
Sr	0,000	0,00	Si02	0,00	
			B	0,00	
Total, meq/l		43,07	Total, meq/l		43,07

Saturaciones	
TDS Calculado	2892 mg/l
Presión osmótica	1,6 bar
Ca3(PO4)2 SI	-0,25
CCPP	104,19 mg/l
Langelier SI	0,4
CaSO4	24,5 %
BaSO4	0,0 %
SrSO4	0,0 %
CaF2	0,0 %
Silica	0,0 %

Figura 43. Pestaña de Análisis del software IMSDesign.

Diseño de un proceso de tratamiento de 120 m³/día de aguas residuales de la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas.

Proyecto: OI Calculado por: Temperatura: 25,0 °C Tipo de agua:

Trenes		Paso1	Paso2	Paso1		Paso2	
pH alimentación		7,00	6,00	Producto químico	None	NaOH	
Conversión	%	60,00	80,00	Concentración de la solución,%	100	100	
Flujo/tren de permeado,	m ³ /d	61,2	24,0	Tasa de dosificación de productos químico	mg/l	0,000	0,000
Flujo promedio	lmh	19,0	8,50	Edad membrana	años	3,0	3,0
Caudal de alimentación,	m ³ /d	102,0	30,0	Disminución Fluj por año		5,00	3,00
Caudal de rechazo	m ³ /d	40,8	6,0	Pérdida de flujo, %		14,3	8,73
				Incremento de paso de sales/año, %		7,0	5,0
Rec. flow to Pass 1	m ³ /d		6,0				

Especificación del Sistema

Etapas

Etapas Paso1 1

Tipo de elemento: ESPA2-LD-4040
 Elementos / tubo de presión: 6
 N° de tubos de presión: 3

Etapas Paso2 1

Tipo de elemento: SanRO-HS2-4
 Elementos / tubo de presión: 7
 N° de tubos de presión: 2

Figura 40. Pestaña de Diseño del software IMSDesign.

Concentración de permeado

Calcio	0,215	K	1,101	Sr	0,000	Cl	6,415	P04	0,001	CO2	53,455
Mg	0,053	NH4	0,000	HC03	9,163	NO3	27,233	Si02	0,000	CO3	0,000
Na	17,500	Ba	0,000	S04	1,617	F	0,000	B	0,000	pH	5,4
NH3	0,000									TDS	63,30 mg/l

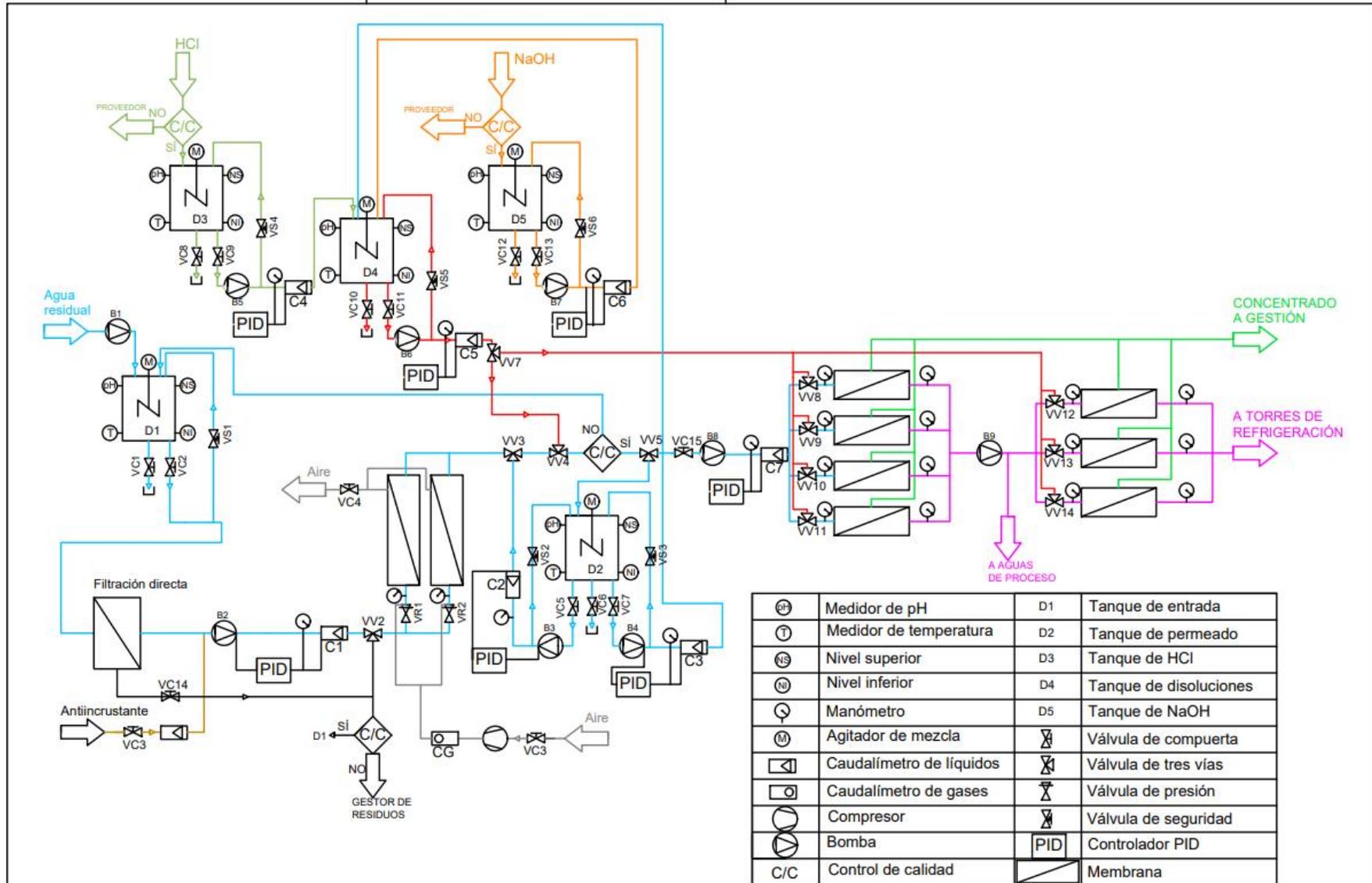
Saturaciones del rechazo y parámetros

CaS04, %	72	SrS04, %	0	Presión osmótica	3,7 bar	pH	7,3
BaS04, %	0	Si02, %	0	CCPP	549,09 mg/l	TDS	6730,6 mg/l
Ca3(P04)2 SI	0,61	CaF2, %	0	Langelier	1,49		

Figura 444. Resultados proporcionados por el software IMSDesign.

DOCUMENTO 2:

PLANOS



DOCUMENTO 3:

PRESUPUESTO

Contenido

1.PRESUPUESTO	87
1.1Bombas.....	87
1.2Válvulas	88
1.3Tuberías.....	89
1.4 Elementos principales	90
1.5 Elementos secundarios	91
2.PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCION DEL MATERIAL.....	92
3.PRESUPUESTO DE EJECUCION POR CONTRATA	92
4.PRESUPUESTO DE INVERSION	92

1. PRESUPUESTO

En este punto se va a realizar el cálculo de todos los elementos de la planta, así como la mano de obra necesaria para la instalación. Para su elaboración se ha utilizado el programa Arquímedes y la base de datos del Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Valencia (CAAT Valencia). Se ha utilizado un porcentaje del 4% para los costes directos.

1.1 Bombas

En la Tabla 24 se muestran los precios asociados a la instalación de las bombas.

Tabla 24. Coste parcial de la instalación de las bombas en la planta.

Unidad	Denominación	Rendimiento	Precio (€)	Importe(€)
h	Oficial 1º fontanería	20	19,11	382,20
h	Ayudante fontanero	20	17,50	350
Ud	Bomba SE.35.100.130.2.52S.C.N.51D.A	1	9.799,00	9.799
Ud	Bomba CRK 4- 30/ 3 A-W-A- AUUV	1	1.938,00	1.938
Ud	Bomba 0205-121	3	1.023,60	3.070,8
Ud	Bomba DP10.65.26.2.50B	4	3.031,00	12.124
%	Costes directos complementarios	0,04	27.664	1.106,56
			TOTAL	28.770,56

1.2Válvulas

En la Tabla 25 se muestran los precios asociados a la instalación de las válvulas.

Tabla 25. Coste parcial de la instalación de las válvulas.

Unidad	Denominación	Rendimiento	Precio (€)	Importe(€)
h	Oficial 1º fontanería	25	19,11	477,75
h	Ayudante fontanero	25	17,50	437,5
Ud	Válvula de seguridad	6	257,22	1.543,32
Ud	Válvula de tres vías	12	97,72	1.172,64
Ud	Válvula de compuerta	15	81,13	1.216,95
Ud	Válvula reductora de presión	2	538	1.076
%	Costes directos complementarios	0,04	5.924,16	236,97
			TOTAL	6.161,13

1.3 Tuberías

En la Tabla 26 se muestran los precios asociados a la instalación de las tuberías.

Tabla 26. Coste parcial de la instalación de las tuberías.

Unidad	Denominación	Rendimiento	Precio (€)	Importe(€)
h	Oficial 1º fontanería	35	19,11	668,85
h	Ayudante fontanero	35	17,50	612,5
h	Oficial de construcción	20	18,15	363
m	Tubería DN32	180	1,22	219,6
m	Tubería DN25	5	0,89	4,45
m	Tubería DN16	60	0,38	22,8
%	Costes directos complementarios	0,04	1.891,2	75,65
			TOTAL	1.966,85

1.4 Elementos principales

En la Tabla 27 se muestran los precios asociados a la instalación de las tuberías.

Tabla 27. Coste parcial de la instalación de las tuberías.

Unidad	Denominación	Rendimiento	Precio (€)	Importe(€)
h	Oficial 1º fontanería	35	19,11	668,85
h	Ayudante de construcción	50	15,31	765,5
Ud	Depósito 6000 L	1	1.170	1.170
Ud	Depósito 3000 L	1	995	995
Ud	Depósito1000 L	2	343	686
Ud	Depósito 2000 L	1	800	800
Ud	Membrana OI SanRO HS2	21	573	12.033
Ud	Membrana OI ESPA2-LD-4040	24	189,98	4.559,52
Ud	Membrana UF SFP-2660	8	1033	8.264
%	Costes directos complementarios	0,04	29.941,87	1.197,67
			TOTAL	31.139,55

1.5 Elementos secundarios

En la Tabla 28 se muestran los precios asociados a la instalación de las tuberías.

Tabla 28. Coste parcial de la instalación de las tuberías.

Unidad	Denominación	Rendimiento	Precio (€)	Importe(€)
h	Oficial 1º fontanería	20	19,11	382,2
h	Ayudante de construcción	20	15,31	306,2
Ud	Manómetro con caja de acero inoxidable y rosca de latón.	23	10,53	242,19
Ud	Controlador PID CN32PT-220	7	218	1526
Ud	Sensor de temperatura Endress+Hauser	5	186,34	931,7
Ud	Sensor de nivel Endress+Hauser	5	252,89	1.264,45
Ud	Compresor Ca-Ab100/3M	1	455	455
Ud	Agitador de mezcla	5	304	1.520
Ud	Caudalímetro 7ME6310-3TA11-1LA1 Siemens	7	1.380	9.660
Ud	Medidor de pH	5	269,9	1349,5
%	Costes directos complementarios	0,04	17.637,24	705,49
			TOTAL	18.342,73

2.PRESUPUESTO TOTAL DE EJECUCION DEL MATERIAL

Para el cálculo del presupuesto total de ejecución del material (PEM) hay que hacer la suma de todos los costes descritos anteriormente. En la siguiente tabla (Tabla 29) se muestran los resultados.

Tabla 29. Presupuesto total de ejecución del material

Elemento	Coste (€)
Bomba	28.770,56
Válvulas	6.161,13
Tuberías	1.966,85
Elementos principales	31.139,55
Elementos secundarios	18.342,73
TOTAL	86.380,82

3.PRESUPUESTO DE EJECUCION POR CONTRATA

Para el cálculo del presupuesto de ejecución por contrata hay que sumarle al PEM los costes generales, que son un 13% del PEM, y el beneficio industrial el cual es un 6% del PEM. Los resultados se observan en la Tabla 30.

Tabla 30. Presupuesto de ejecución por contrata.

Denominación	Coste (€)
PEM	86.380,82
Gastos generales (13%)	11.229,5
Beneficio industrial (6%)	5.182,85
TOTAL	102.793,18

4.PRESUPUESTO DE INVERSION

Para el cálculo del presupuesto de inversión hay que aplicarle el IVA al presupuesto de ejecución por contrata.

Tabla 31. Presupuesto de inversión.

Denominación	Coste (€)
Presupuesto de ejecución por contrata	102.793,18
IVA (21%)	21.586,57
TOTAL	124.379,75

El coste total del proyecto asciende a CIENTO VEINTICUATRO MIL TRESCIENTOS SETENTA Y NUEVE EUROS CON SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS.

Diseño de un proceso de tratamiento de 120 m³/día de aguas residuales de la industria petroquímica de producción de metanol mediante tecnología de membranas.
