Resumen

Actualmente la tecnología de ósmosis inversa es uno de los recursos más utilizados para la desalación de agua marina o salobre. Pero esta tecnología aún presenta inconvenientes debido al vertido de salmuera, por lo que revalorizarla y reutilizarla es necesario para crear un ciclo de desalación sostenible. Una posible reutilización está en la industria cloro – álcali para obtener cloro y sosa, pero para ello precisa de una salmuera con una baja concentración de iones divalentes perjudiciales para el proceso.

Con este proyecto se ha diseñado y simulado una planta piloto de nanofiltración con la finalidad de obtener una instalación económica, fiable y que sirva para el estudio de las posibilidades de esta tecnología como purificación. De forma que el proyecto se divide en:

- Diseño de la instalación, elección y justificación de los componentes.
- Simulación de la instalación, lay-out de la planta piloto.
- Manual de operación, procedimiento y alarmas.

El diseño de la instalación se ha realizado entorno a las membranas y sus límites de funcionamiento. Para ello se ha utilizado un software para optimizar el número de membranas necesarias y que consideraba aspectos como la composición de la salmuera, la temperatura o la recuperación del sistema.

A continuación se ha completado el diseño de la instalación añadiendo los equipos, la instrumentación y los accesorios necesarios para el control de la planta piloto. En los equipos más sensibles, como la bomba de alta presión, se ha realizado un estudio para decidir su colocación en función de la altura total de carga disponible en la aspiración, para evitar su cavitación.

El propósito de la simulación ha sido diseñar una distribución de válvulas e instrumentación óptima para el operario y que además sirviese como guía para el instalador que realice la construcción de la planta. Para ello se ha utilizado un software de diseño en tres dimensiones.

Con el manual de operación se ha estudiado los diferentes modos de funcionamiento de la planta piloto. Se ha establecido el procedimiento en cada uno de los puntos y tiempos de funcionamiento así como los parámetros críticos y sus alarmas asociadas.

Sumario

RESUMEN 1

SUMARIO 3

1. PREFACIO 7

1.1. Origen del proyecto 7

1.2. Motivación 9

2. INTRODUCCIÓN 11

2.1. Objetivos del proyecto 11

2.2. Alcance del proyecto 11

3. CONTEXTO HIDROLÓGICO EN REGIONES SEMIÁRIDAS 13

3.1. Crisis del agua 13

3.1.1. Usos del agua 13

3.1.2. Crecimiento de la población 14

3.1.3. Contaminación 15

3.2. Desalación 15

3.2.1. Revisión y valoración de los procesos actuales 15

4. TECNOLOGÍAS DE APROVECHAMIENTO DE LAS SALMUERAS DE DESALACIÓN 17

4.1. Vertido cero de líquidos de desalación 18

4.1.1. Concentrador de salmuera 18

4.2. Vertido cero de residuos de desalación 19

4.2.1. Ósmosis inversa y electrodiálisis 19

4.2.2. Sistema para el uso integral de los componentes de la salmuera 19

4.2.3. Cristalizador de membrana 20

4.2.4. NF y OI, módulos en serie y en paralelo 20

4.2.5. Balsas solares 21

4.3. Valorización de la salmuera para la industria cloro – álcali 22

4.3.1. Descripción de la industria 22

4.3.2. Origen de la materia prima, NaCl 22

4.3.3. Producción mediante electrólisis 23

4.3.4. Pretratamientos 25

4.3.5. Nuevas tecnologías de pretratamiento 26

5. NANOFILTRACIÓN 27

5.1. Características generales de las membranas 27
5.1.1. Mecanismos de transporte 28
5.2. Parámetros técnicos de operación 28
5.2.1. Flujo transmembrana 28
5.2.2. Carga electroforética 29
5.2.3. Polarización 29
5.2.4. Rechazo 30
5.2.5. Conversión 31
5.3. Variación del rendimiento con la modificación algunos parámetros 32
5.3.1. Temperatura 32
5.3.2. Presión 33
5.3.3. Recuperación 33
5.3.4. Concentración de sales en la alimentación 33
5.3.5. Comparación entre parámetros 33
5.4. Tipos de configuraciones de las membranas 34
5.4.1. Membranas de fibra hueca 34
5.4.2. Membrana en espiral 35
5.5. Ensuciamiento de las membranas 36
5.5.1. Formación de precipitados inorgánicos (scaling) 37
5.5.2. Coloidales 37
5.5.3. Biofouling 38
5.6. Técnicas de limpieza 38
5.6.1. Limpieza con agua osmótica a presión (flushing) 39
5.6.2. Limpieza química 39
5.6.3. Deterioro de las membranas 40

6. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN 41

6.1. Introducción 41
6.2. Prediseño manual 42
6.2.1. Elección del modo de funcionamiento 42
6.2.2. Paso 1: determinación de las características del agua de alimentación 43
6.2.3. Paso 2: determinar el número de etapas 43
6.2.4. Paso 3: elección de la membrana y del flujo de diseño 44
6.2.5. Paso 4: número de membranas 44
6.2.6. Paso 5: determinar número de cajas de presión 45
6.3. Diseño final: estimación mediante ROSA 45
6.3.1. Configuración del equipo 45
6.3.2. Comparación resultados entre los tres casos 47
6.3.3. Comparación entre casos: temperaturas anormales 47

7. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN 49
7.1. Características de la instalación 49
7.2. Toma de agua 50
7.3. Pretratamientos físicos y químicos 50
7.3.1. Filtro de cartuchos 51
7.3.2. Dosificación antiincrustante 51
7.4. Proceso de nanofiltración 53
7.4.1. Bombas de alta presión (P101) 53
7.4.2. Bomba de transferencia o de limpieza (P301) 54
7.4.3. Cajas de presión 56
7.4.4. Membranas 56
7.4.5. Válvula reguladora de la recuperación 56
7.5. Definición del protocolo de limpieza 57
7.5.1. Identificación de la necesidad de limpieza de las membranas 57
7.5.2. Recomendaciones durante la limpieza de las membranas 57
7.6. Válvulas 58
7.7. Gestión de las señales de los equipos e instrumentos 59
7.7.1. PLC 59
7.8. Instrumentación 60
7.8.1. Depósito 60
7.8.2. Filtro de cartucho 60
7.8.3. Aspiración bomba alta presión 60
7.8.4. Tramo de impulsión hasta la entrada de las membranas 60
7.8.5. Tramo permeado 61
7.8.6. Tramo de concentrado 61
7.9. Tuberías 62
7.9.1. Elección del diámetro 62
7.9.2. Elección de los materiales 62
7.10. Esquema de la instalación 64

8. SIMULACIÓN DE LA INSTALACIÓN 65
8.1. Espacio disponible para ubicar la instalación 65
8.2. Simulación planta piloto en 3D 66
8.3. Resumen de los datos de la simulación 67

9. MANUAL DE OPERACIÓN 69
9.1. Modo I: nanofiltrado de salmuera 71
9.2. Modo II: flushing 73
9.3. Modo III: limpieza química 75

9.4. Modo IV: paro de la instalación 77
9.5. Alarmas 79

10. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL ____ 81
10.1. Introducción 81
10.2. Problemática medioambiental de cada factor 82
10.2.1. Consumo de energía 82
10.2.2. Vertidos de salmuera de rechazo concentrada en sal 83
10.2.3. Otros vertidos 83
10.2.4. Ruido 84
10.2.5. Desmantelamiento 84

11. FASE CONSTRUCTIVA ____ 85

12. PRESUPUESTO ____ 87
12.1. Costes inversión material y de ejecución 87
12.2. Coste total de la inversión 88
12.3. Presupuesto de diseño de la instalación 88
12.3.1. Coste del estudio y diseño de la instalación 88
12.3.2. Coste de las membranas 90
12.3.3. Presupuesto total 90
12.4. Diagrama de Gantt 91

CONCLUSIONES ____ 93

BIBLIOGRAFÍA ____ 95
Referencias bibliográficas 95
Bibliografía complementaria 98

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

El presente proyecto final de carrera se encuentra englobado en un proyecto de investigación del plan I+D+i de España. Más concretamente, el proyecto se conoce como: *SOSTAQUA, desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible*. Este es financiado por el Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) dentro del programa CENIT, en el cual se promueve la innovación y el desarrollo tecnológico de las empresas españolas.

El proyecto SOSTAQUA tiene como finalidad el desarrollo de un ciclo urbano del agua autosostenible mediante la potenciación de fuentes no convencionales. Un ciclo cerrado en cuanto a flujos de agua y que minimice las necesidades de recursos (agua, energía, etc…) y la aportación residuos al medio ambiente. El esquema del ciclo del agua a desarrollar se observa en la Figura 1.1.

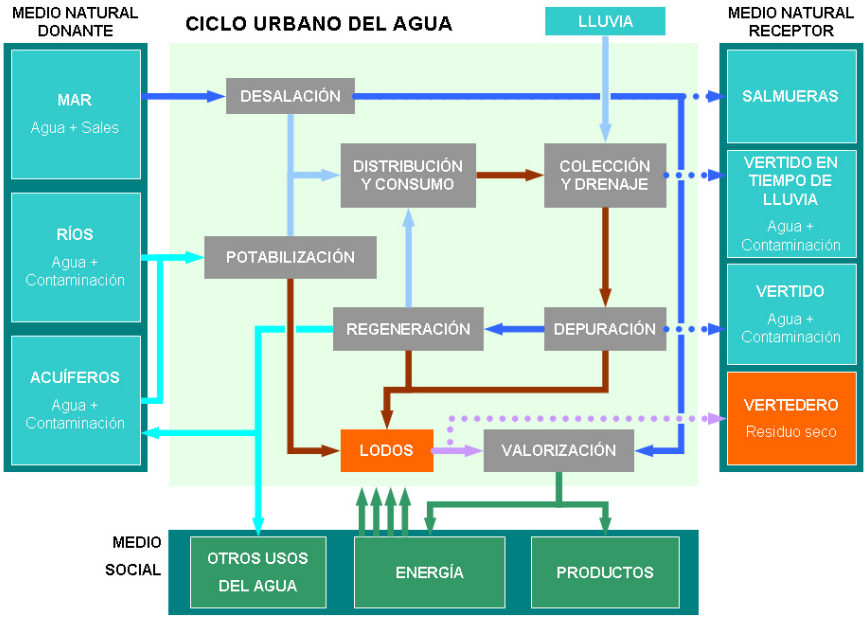


Figura 1.1. Esquema del ciclo del agua autosostenible propuesto (SOSTAQUA, 2009)

El ciclo del agua debe reutilizar y revalorizar desechos como lodos y salmueras de manera que se obtenga otros productos o energía de ellos. Otro aspecto fundamental es la regeneración de las aguas tanto pluviales como urbanas residuales sometiéndolas a un tratamiento que permita otros usos del agua o la reintroducción al sistema.

SOSTAQUA se inició en 2007 y tiene una duración de 4 años de investigación. Ha motivado la participación y colaboración de sectores públicos y privados como administraciones, universidades o empresas. Algunas de las empresas involucradas son: Agbar, Canaragia, Clabsa, Cementos Molins Industrial, Degremont, Dow Ibérica, Emuasa, Labaqua, Sener y Solvay Ibérica.

El proyecto está desarrollado sobre diez objetivos (Tabla 1.1) de mejora del ciclo del agua: el agua propiamente, valoración de los residuos obtenidos, minimización de la demanda energética del ciclo y la evaluación del riesgo sanitario – ambiental que comporta.

Actividad	**Objetivo**	**Vector**
1. Desalinización: nuevos pretratamientos, eliminación de materia orgánica, control de fouling, reutilización y/o eliminación del rechazo.	Incremento eficiencia de la desalinización.	Agua
2. Depuración: nuevos tratamientos, regeneración.	Valorización del agua residual.	
3. Valorización de aguas pluviales.	Nuevos recursos hídricos.	
4. Explotación de los recursos hídricos en tiempo real. Simulación de la evolución de recursos y demandas que permita la previsión, anticipación y diseño de estrategias.	Incremento en la eficiencia en la gestión.	
5. Maximización de la valorización energética de la materia orgánica de los lodos de depuradora.	Valorización, minimización e inertización de fangos y lodos	Residuos
6. Minimización, inertización y valoración última de fangos y lodos.	Valorización – minimización de salmueras y residuos salinos.	
7. Valorización y minimización de salmueras y otros residuos salinos.		
8. Autosuficiencia energética de depuradoras, valorización del biogás y CO_2.	Autosuficiencia energética de depuradoras.	Energía
9. Eficiencia energética, energías renovables y acumulación de energía.	Aumento de la sostenibilidad energética.	
10. Evaluación de control y riesgos y beneficios sanitario – ambientales.	Protección de la salud y el medio ambiente.	Salud y medio ambiente

Tabla 1.1. Puntos y aspectos para la mejora y desarrollo del ciclo del agua (SOSTAQUA, 2009)

1.2. Motivación

El presente proyecto de diseño y construcción de un planta piloto para la purificación de salmueras se enmarca dentro del plan de valorización y minimización de salmueras y otros residuos salinos (actividad siete). El objetivo principal de esta actividad es minimizar el rechazo de salmueras mediante la reutilización en la Industria Electroquímica.

Más concretamente se estudiará la reutilización en un proceso de producción de cloro. Este proceso produce cloro (Cl_2) y sosa cáustica (NaOH) simultáneamente mediante la electrólisis de salmueras.

Las industrias cloro – álcali más tradicionales utilizan celdas de mercurio en el que el mercurio flota y es utilizado como cátodo para la electrólisis. Aunque el mercurio se puede reutilizar en el proceso, es muy volátil y suele contaminar el medio durante el proceso de producción. También suele contaminar la sosa o el caudal de salmuera.

Los procesos más modernos de electrólisis utilizan membranas. Estos procesos tienen menos impacto medioambiental, sin embargo necesitan una pureza muy elevada de la salmuera de alimentación para no dañar las membranas.

La salmuera puede contener impurezas como: Mg^{2+}, Ca^{2+}, Fe^{2+} o SO_4^{2-}. Las impurezas tienen efectos perjudiciales en las membranas ya que se acumulan y precipitan. Esto provoca una reducción en el rendimiento del proceso y en la vida útil de las membranas.

Debido a que las impurezas dañan las caras membranas existen unos estrechos límites de concentraciones admitidos para el proceso. Para conseguirlo se han desarrollado múltiples procesos y tecnologías para separar los iones que perjudican el proceso de la salmuera. Muchos de esos métodos tienen una inversión muy elevada o bien son medioambientalmente peligrosos. Algunos de ellos son: la precipitación química, el intercambio iónico y la cristalización.

Sin embargo el desarrollo en la tecnología de membranas ha permitido que la nanofiltración se presente como una alternativa. Consigue separar las impurezas de los iones de Cl^- de la salmuera en forma de disolución concentrada. Además es un proceso simple, de fácil mantenimiento y económico.

La planta piloto del presente proyecto se sitúa en este contexto con el objetivo de probar la nanofiltración como método de la eliminación de iones polivalentes (Calcio, Magnesio y Sulfatos) para acondicionar la salmuera al proceso industrial de electrólisis con membrana.

2. Introducción

El presente proyecto nace dentro de otro más amplio llamado SOSTAQUA, uno de cuyos objetivos es la revalorización de la salmuera de desalación. Para ello se está estudiando un proceso que consiste en la concentración de salmueras de NaCl con el propósito de obtener un proceso rentable y con un rendimiento superior a la extracción del NaCl directamente de una explotación minera.

Uno de los problemas del proceso es el ensuciamiento del sistema debido a la presencia de iones divalentes (Cl, Mg, etc.). Para ello se ha incorporado una nueva etapa de purificación de la salmuera mediante un proceso de nanofiltración.

2.1. Objetivos del proyecto

El principal objetivo del proyecto es diseñar y realizar la elección de todos los sistemas necesarios para la puesta en marcha de una planta piloto de nanofiltración de salmueras. Tratando de obtener un sistema fiable, de fácil manipulación y con una inversión económica ajustada. De forma que el proyecto queda dividido en tres partes: diseño y elección de los equipos; distribución de los equipos; y manual de operación.

En el diseño y elección de equipos se determinarán los parámetros de funcionamiento de cada uno de ellos.

La distribución de los equipos tendrá como propósito establecer un lay-out de la planta piloto optimizando la distribución y facilitando su operación. El desarrollo se generará íntegramente mediante un software en tres dimensiones de forma que se obtenga una idea más real del resultado final.

Finalmente en el manual de operación se estudiará cada modo de funcionamiento. Estableciendo el estado de cada válvula, los puntos de funcionamiento de cada equipo y las alarmas asociadas a los puntos críticos de trabajo de la planta piloto.

2.2. Alcance del proyecto

El propósito del proyecto es el diseño, además del seguimiento en la recepción de las partidas y del inicio de la construcción. Queda fuera del alcance de este proyecto determinar los requisitos, reglamentación u otras necesidades relacionadas con la construcción de la misma, tanto de montaje e instalación como de la manipulación de la planta.

3. Contexto hidrológico en regiones semiáridas

3.1. Crisis del agua

El agua dulce es necesaria para el ser humano y aunque un 70 % de la superficie de la Tierra es agua, lo es mayormente de agua oceánica. El agua dulce representa un 2,53 % y tres cuartas partes están en forma de casquetes glaciares, por lo que resultan inaccesibles. Se estima que menos de un 1 % se encuentra accesible en ríos y lagos (Hinrichsen et al. 1998).

Aunque el volumen existente de agua dulce es suficiente para satisfacer las necesidades humanas, el agua no esta repartida homogéneamente en la Tierra, ni durante el año, ni de año a año. Este hecho provoca que una de cada cinco personas no tenga acceso al agua potable (Unescoprensa, 2006) y un 40 % de la población mundial no disponga de los sistemas básicos de saneamiento.

3.1.1. Usos del agua

El nivel de desarrollo económico de un país se refleja en el volumen de agua dulce que éste consume. Es un elemento esencial para la producción de energía, la que a su vez es un factor vital para el desarrollo económico. Las regiones en desarrollo utilizan mucho menos agua por cápita que las regiones desarrolladas.

En el plano mundial, los usos del agua están repartidos de la siguiente manera (Figura 3.1): el agua dulce para la agricultura representa un 69 %, en la industria un 23 % y en el uso doméstico el 8 % (Hinrichsen et al. 1998).

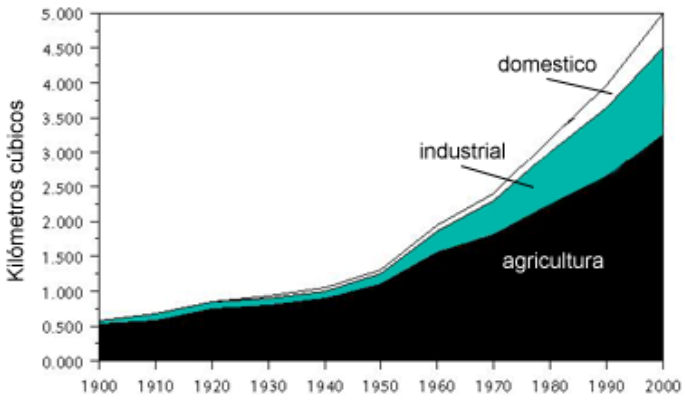


Figura 3.1. Aumento de la utilización del agua por sector, 1900 – 2000 (Hinrichsen et al. 1998)

Para abastecer de agua se necesitan caras infraestructuras y redes de transportes desde la fuente del recurso hasta la población. En las zonas en las que no hay suficiente agua para cubrir las necesidades se necesitan además caros sistemas de desalinización.

En los países menos desarrollados se encuentran con varios inconvenientes: no hay suficientes recursos y no hay inversiones para construir las infraestructuras necesarias de transporte y potabilización. El suministro de aguas contaminadas, su déficit o condiciones de vida insalubres causan el fallecimiento y las enfermedades de millones de personas por año.

3.1.2. Crecimiento de la población

La población del mundo, cerca de 6.000 millones de personas, crece a razón de 80 millones por año. A medida que crece la población, aumenta el número de países que afrontan condiciones de escasez de agua. En los últimos cuarenta años, mientras la población mundial se ha triplicado (Figura 3.2), el consumo de agua dulce se ha incrementado seis veces (Unescoprensa, 2006).

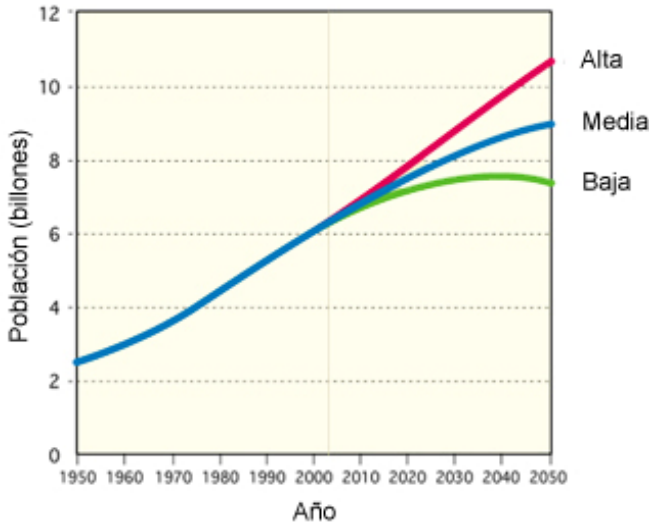


Figura 3.2. Estimaciones de la población mundial según tres escenarios (Science on Sustainability, 2006)

Se dice que un país experimenta tensión hídrica cuando el suministro de agua desciende de 1.700 m^3 por persona (Hinrichsen et al. 1998). En 1995 había 31 países que afrontaban esta problemática (un 8 % de la población) y para el 2025 se estima que la cifra ascenderá a 48 países, más de 2.800 millones de personas, aproximadamente el 35 % de la población estimada (Arellano, 2009).

3.1.3. Contaminación

La calidad del agua dulce está disminuyendo en muchas regiones, pocos países industrializados han controlado su contaminación.

La agricultura es el sector más contaminante, ya que utiliza productos tóxicos para su proceso que después pasan a las aguas subterráneas y a los acuíferos lo que dificulta su recuperación y tratamiento. La utilización de fertilizantes y plaguicidas ha dejado inservibles esta agua, si no son tratadas.

3.2. Desalación

A raíz de esta problemática, la desalación es una de las soluciones más adoptadas últimamente ya que puede contribuir a resolver problemas como la escasez de agua o la mala calidad debido a su contaminación. Este proceso permite convertir aguas salobres o de mar en aguas aprovechables para el uso humano o industrial. Si se quiere obtener agua potable a partir de agua de mar (35 g/l) se deben separar y reducir el contenido de sales hasta 0,5 g/l.

A nivel mundial hay 12.000 desaladoras con una producción de 24 millones m^3/día, con países pioneros como Oriente Próximo o Australia. España es una de las potencias mundiales en desalación fundamentalmente con tecnología de ósmosis inversa (Rubio y Zarza, 2006).

Se trata del cuarto país del mundo, con una producción media de 1,5 millones m^3/día de agua desalada. Para ello cuentan con 900 desaladoras de agua salobre y marina, de las cuales un 87 % utilizan la tecnología de ósmosis inversa. Además el programa Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua (A.G.U.A.) plantea la puesta en marcha de 36 nuevas instalaciones para cubrir la demanda de la costa mediterránea (Fernández, 2008).

3.2.1. Revisión y valoración de los procesos actuales

Aunque la desalinización es una fuente fiable y segura presenta problemas económicos y medioambientales. Los principales inconvenientes de la desalación son el consumo de energía, el vertido de salmuera y el coste del metro cúbico de agua desalada.

Desde los años 70 hasta la actualidad el proceso de ósmosis inversa ha evolucionado mucho su consumo de energía. Con un consumo inicial de 15 kWh/m^3 se fueron implementando tecnologías como la turbina Pelton o los intercambiadores de presión hasta llegar a los menos de 3 kWh/m^3 actuales (Rubio y Zarza, 2006).

Sin embargo son necesarias más investigaciones para reducir aun más el consumo energético del proceso, como por ejemplo, la implementación de energías renovables, nuevas membranas o la optimización de los recuperadores de presión actuales.

Los vertidos de salmuera es otro tema que necesita más investigación y estudios sobre los efectos y posibles soluciones. Las medidas adoptadas actualmente son: ubicación de la desaladora en función de la presencia de fauna y flora sensible (por ejemplo la poseidonia), vertido mediante emisario en zonas de fuertes corrientes, inyección, dilución previa con agua de mar, etc.

Las nuevas propuestas son las de valorizar los vertidos de salmuera y permitir su reutilización para la producción de sales o de productos químicos.

4. Tecnologías de aprovechamiento de las salmueras de desalación

En el proceso de OI la disolución concentrada o salmuera siempre se ha asociado al rechazo del proceso y se eliminaba realizando un vertido. Hoy en día, debido a los problemas medioambientales que puede causar su vertido, se deben estudiar las alternativas que permitan su revalorización y reutilización.

De esta manera se conseguirá integrar las salmueras en el ciclo de desalación haciendo medioambientalmente sostenible el proceso, además de cubrir las necesidades de agua dulce, energía u otras en función de su revalorización.

Algunas de las utilizaciones de las salmueras pueden ser:

- Utilización de balsas para la industria agropecuaria (Ahmed et al. 2000; Svensson, 2005). Se ha demostrado que hay especies que se pueden desarrollar y crecer bien en ambientes de gran salinidad (algas, peces, etc…).

- Balsas solares. El gradiente de salinidad que aparece en las balsas en las que se almacena la salmuera permite acumular calor a través de la radiación solar, lo que las convierte en una fuente atractiva de energía renovable.

- Recuperación de productos químicos. La industria cementera, de la construcción, cloro – álcali, del metal o la industria alimentaria son algunas de las industrias que utilizan como materia prima alguno de los componentes químicos que son presentes en la salmuera.

En general, las nuevas líneas para la gestión de las salmueras se pueden agrupar en: descarga cero de líquidos de desalación (ZLD) y en descarga de desalación cero (ZDD). Ambos métodos tienen como finalidad reducir el volumen de salmuera y sus vertidos. En el caso del ZLD únicamente tiene como finalidad evitar el vertido de residuos líquidos y para ello genera productos sólidos salinos. En cambio, el ZDD suele reintroducir los residuos líquidos al proceso o los convierte en sólidos salinos para materia prima. La tecnología utilizada en el ZDD permite revalorizar y reutilizar la salmuera de manera que no se produzcan residuos líquidos o sólidos y pasen a ser la materia prima de algún proceso.

4.1. Vertido cero de líquidos de desalación

El ZLD es una técnica ampliamente utilizada cuando los fluidos de procesos industriales no se pueden eliminar directamente sin realizar algún tratamiento. Estos sistemas suelen incorporar un evaporador – concentrador de salmuera seguido de un cristalizador para obtener y recuperar los residuos sólidos salinos.

A partir de la salmuera de rechazo se obtiene un caudal de agua con baja concentración TDS y las sales en forma sólida. Es una tecnología con un coste de inversión y de explotación muy elevados por lo que las aplicaciones son en casos concretos.

4.1.1. Concentrador de salmuera

Cerca de California se localizó una fuente de agua salobre por lo que se diseñó una instalación para aprovecharla y convertirla en agua dulce. Se diseñó una instalación de ósmosis inversa para el tratamiento y un concentrador de salmueras (Figura 4.1) para evitar realizar vertidos de líquidos en la zona (Water Desalination Report, 2009).

Figura 4.1. Torre para el concentrado de salmuera (Water Desalination Report, 2009)

La torre concentra la salmuera hasta un 25 % y reduce el volumen del 97 % al 98 %. Un compresor se encarga de evaporar la salmuera y el destilado producido se mezcla con el permeado de OI, obteniendo un agua muy blanda lista para su utilización. Los sólidos salinos se depositan en una explanada para su estabilización. En este caso la ubicación de la planta cuenta con una ventaja y es que el terreno árido proporciona unas excelentes condiciones de evaporación.

4.2. Vertido cero de residuos de desalación

El concepto de ZDD agrupa nuevas tecnologías del proceso de desalación que permiten alcanzar recuperaciones de hasta el 98 %. Es un sistema más económico y sostenible que otras opciones para reducir el impacto del vertido de salmueras.

4.2.1. Ósmosis inversa y electrodiálisis

El proceso suele ser una combinación de ósmosis inversa (OI) y electrodiálisis (EDM). La electrodiálisis consiste en la concentración de salmueras mediante el uso de membranas de intercambio iónico. Ésta se le alimenta con el rechazo de OI y durante el proceso se separan los aniones y cationes de las sales en dos caudales, uno rico en cloruro cálcico y otro rico en sulfato sódico. A continuación, se mezclan los caudales en un reactor para precipitar las sales insolubles, como el sulfato cálcico, para separarlas y procesarlas (Veolia, 2009).

El proceso también produce un diluido de agua con pocas sales que se suele reintroducir en a la alimentación del proceso de OI para elevar la recuperación global del sistema. Mientras que las sales sólidas son reutilizadas en otros procesos.

4.2.2. Sistema para el uso integral de los componentes de la salmuera

El factor que limita la recuperación en el proceso de OI es la aparición de precipitados. Algunas investigaciones (Ohyga et al. 2001) se propusieron eliminar los componentes del agua que provocaban la formación de precipitados (scaling), de manera que se pudiese elevar la recuperación del proceso hasta el 80 – 90 % sin problemas de funcionamiento.

Además de eliminar los componentes también diseñaron procesos para poder aprovechar los iones multivalentes eliminados y posteriormente revalorizarlos en la industria adecuada, es lo que llamaron ISCUCSW (Integrated System for Complete Usage of Components in Sea Water).

Previamente al proceso de ósmosis se añadían dos etapas más: una etapa de adsorción con columnas de intercambio iónico y una de nanofiltración. La adsorción tiene como finalidad eliminar los iones monovalentes, mientras que la etapa de nanofiltración elimina los iones divalentes.

A continuación mediante cristalizadores o mediante un proceso de electrodiálisis se concentran los iones separados en las etapas anteriores. En la cristalización, además de reducir el contenido en agua, se precipita el NaCl y puede ser utilizado en la industria del cloro – álcali.

Del rechazo de la etapa de nanofiltración se obtiene: $CaCO_3$ (en un precipitador) y $MgSO_4$ (en un cristalizador) que pueden ser reutilizados en la industria del cemento y de la cerámica respectivamente.

Finalmente, la etapa de electrodiálisis concentra el rechazo que se obtiene de las columnas de intercambio iónico para obtener elementos como Li o K que pueden ser revalorizados para la industria del metal o del fertilizante.

4.2.3. Cristalizador de membrana

Otras investigaciones (Drioli et al. 2002) consiguieron concentrar el rechazo de OI en cristales mediante la utilización de un cristalizador de membrana (MC). Ésta es una tecnología muy reciente que produce cristales a partir de una disolución supersaturada.

La combinación de una etapa de NF y el proceso de OI consigue elevar la conversión del proceso hasta el 50 %, ya que en la primera etapa se reducen los componentes del agua que provocan el scaling en el proceso de OI. Si además se añade una etapa final de MC se eleva la recuperación hasta el 90 %.

Sin embargo el cristalizador de membrana tiene una demanda de energía térmica muy elevada para calentar el rechazo de OI y prepararlo para el proceso. De manera que si no se dispone de esta energía en forma residual de otros procesos se eleva el coste final del proceso.

4.2.4. NF y OI, módulos en serie y en paralelo

Algunas investigaciones (M'nif et al. 2007) se han centrado en el estudio del efecto de diferentes configuraciones mediante un planta piloto que incorporaba unos módulos de OI y de NF. Para las pruebas se montaron los módulos en serie (el rechazo de OI pasa a ser la alimentación de NF) y en paralelo (la alimentación de OI era agua salobre y el permeado de NF).

En el primer caso se consiguió mejorar la recuperación global del sistema pasando del 35 % al 85 %. Además permitía recuperar gran parte del rechazo de OI ya que se introducía en la NF, esta configuración también permitía incrementar la cantidad de agua producida y reducir el consumo de energía.

En el segundo caso, la configuración en paralelo mejora sustancialmente el flujo de permeado de OI ya que la recirculación de NF lo permite. En cambio no aprovecha los rechazos de ambos procesos.

4.2.5. Balsas solares

La acumulación de la salmuera en grandes balsas puede ser aprovechada gracias a que el gradiente que se forma en ellas permite acumular calor. Éste calor puede transformarse en energía mecánica y finalmente en eléctrica, de manera que puede ser reintroducida en el proceso de desalación haciéndolo autosostenible o enviarla a la red eléctrica.

La salmuera en la balsa se distribuye en tres capas (Figura 4.2): Upper Convective Zone (UCZ), Non – Convective Zone (NCZ) y Lower Convective Zone (LCZ). La zona UCZ tiene una salinidad del 1 – 4 % en peso y disminuyendo su espesor se incrementa la capacidad de almacenar calor. En la zona intermedia se genera un gradiente de salinidad que aumenta a medida que aumenta la profundidad. Finalmente, la última capa contiene salmuera saturada al 26 % (Ahmed et al. 2000).

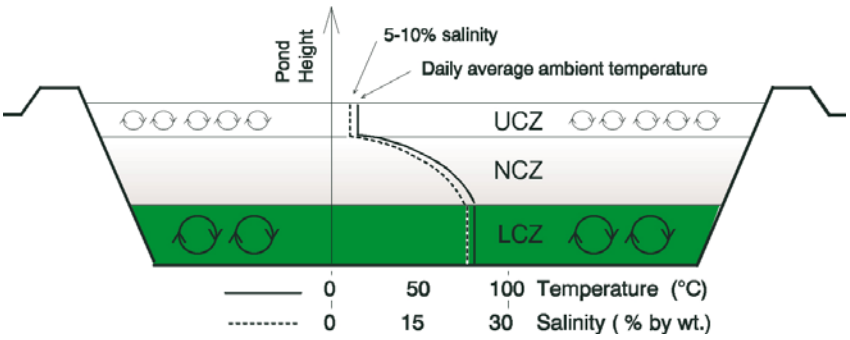


Figura 4.2. Diferentes zonas de la balsa de salmuera (Ahmed et al. 2000)

La radiación solar que alcanza la LCZ sólo puede transmitirse por conducción, ya que se encuentra aislada por la zona NCZ, por lo que la emisión de calor al exterior será lenta (Svensson, 2005).

Condiciones necesarias para el correcto funcionamiento:

- Radiación solar constante durante todo el año.
- Grandes volúmenes de salmuera.
- Terreno adecuado (económico, poco permeable, alejado de acuíferos, …).
- Poco viento.

4.3. Valorización de la salmuera para la industria cloro – álcali

4.3.1. Descripción de la industria

La industria del cloro – álcali produce cloro (Cl_2) e hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) mediante la electrólisis de una disolución salina. Las principales tecnologías (Chlorine Online, 2010) utilizadas en este sector, tal como muestra la Figura 4.3, son: la electrólisis en celdas de mercurio (representaba en 2007 un 37,7 % de la capacidad instalada en Europa), electrólisis en celdas de diafragma (13,6 %) o electrólisis en celdas de membrana (45,6 %).

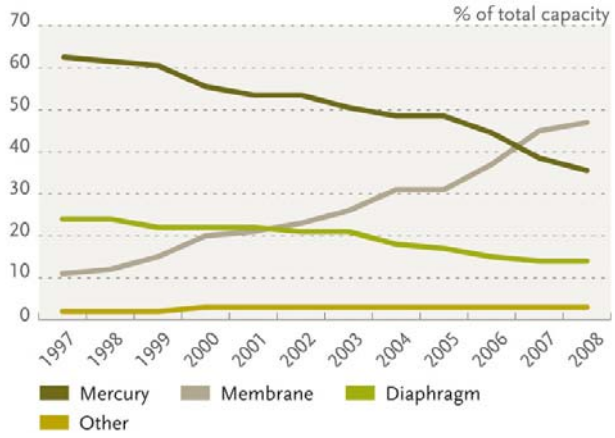


Figura 4.3. Capacidades de las diferentes tecnologías (Chlorine Online, 2010)

El proceso de electrólisis consiste en aplicar una corriente eléctrica a una determinada sustancia iónica, permitiendo separar sus iones. La electrólisis se produce en una celda de la que se distinguen dos compartimientos o electrodos: el polo positivo (o ánodo) y el polo negativo (o cátodo). De forma que al aplicar corriente los iones positivos se sienten atraídos hacia el polo contrario, y los iones negativos hacia el ánodo (Solvay Ibérica, 2010).

El proceso utiliza principalmente como materia prima el cloruro de sodio (NaCl). Además del cloro en estado gaseoso, se obtiene hidrógeno y una disolución de hidróxido sódico (sosa cáustica). De entre los múltiples usos del cloro, destaca la fabricación de cloruro de vinilo para la fabricación de PVC. La sosa cáustica tiene aplicaciones en la industria metalúrgica, textil y alimentaria, entre otros sectores (Chlorine Online, 2010).

4.3.2. Origen de la materia prima, NaCl

En la mayoría de casos la sal procede de explotaciones mineras. Éstas producen una gran cantidad de residuos salinos que son depositados en escombreras. Posteriormente, como en

el caso de la localidad de Suria en Cataluña, son aprovechados y revalorizados por la industria del cloro – álcali.

4.3.2.1. Fuentes alternativas

Sin embargo, hay otras fuentes para obtener la materia prima, además de las explotaciones mineras. Algunas de estas alternativas son el agua de mar o los residuos salinos procedentes de la desalación.

El *agua de mar* es un recurso abundante en el que, de entre las sales presentes, predomina el cloruro sódico. Sin embargo la presencia de ciertos componentes y la baja concentración supone un inconveniente para su uso directo.

Los *residuos salinos procedentes de la desalación*, salmuera principalmente, representan una alternativa al uso de agua marina como fuente de materia prima. Además suponen una solución al problema medioambiental del vertido de salmuera.

La salmuera tiene un mayor contenido en sales que las aguas de origen lo que las hace más susceptibles para su uso. Sin embargo sufren variaciones de temperatura, de pH y contienen sustancias químicas utilizadas durante el proceso de desalación lo que obliga a realizar pretratamientos.

4.3.3. Producción mediante electrólisis

Las tecnologías utilizadas por la industria cloro – álcali son tres: las celdas de mercurio, las celdas de diafragma y las celdas de membranas.

4.3.3.1. Celdas de mercurio

Fue el primer método empleado para producir cloro a escala industrial. La celda se alimenta con cloruro de sodio y, con la diferencia de potencial adecuada, se da lugar a la electrólisis (Figura 4.4).

Se emplea un ánodo de titanio recubierto de platino u óxido de platino, mientras que el mercurio actúa como cátodo atrapando el sodio elemental. Cuando éste se pone en contacto con agua, libera el sodio desprendiendo hidrógeno y formando hidróxido de sodio en disolución.

Con este proceso se consiguen productos muy puros pero que necesitan de unos estrictos controles y medidas de seguridad para el medio ambiente y para los operarios. Este hecho, junto con la mayor eficiencia energética de las nuevas tecnologías está favoreciendo la sustitución de las celdas de mercurio.

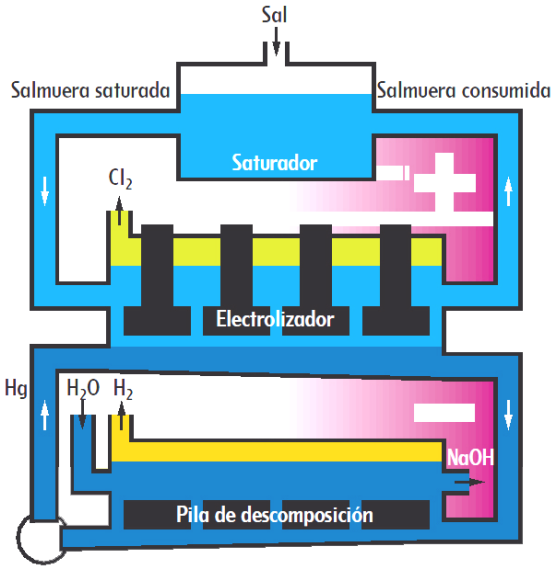


Figura 4.4. Electrólisis de mercurio (Solvay Ibérica, 2010)

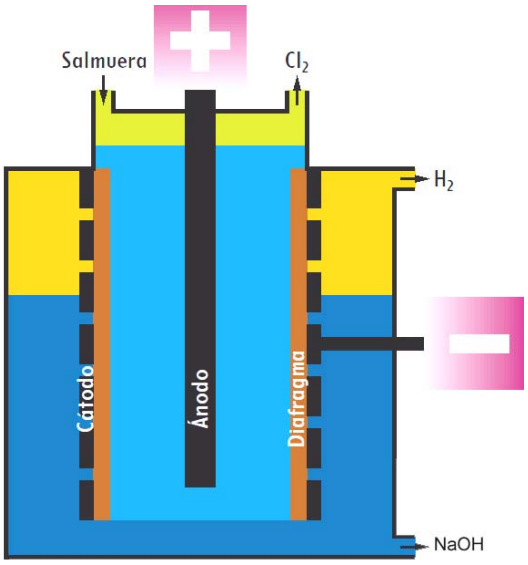


Figura 4.5. Electrólisis de diafragma (Solvay Ibérica, 2010)

4.3.3.2. Celdas de diafragma

Esta tecnología se implantó en los Estados Unidos. Necesita menos energía que el proceso de celda de mercurio. Sin embargo, para obtener una sosa cáustica comercial es preciso otro procedimiento adicional que encarece el proceso.

El sistema es alimentado continuamente con salmuera que circula desde al ánodo hasta el cátodo. Éstos se encuentran separados por un diafragma poroso de amianto (Figura 4.5). La salmuera se alimenta por el ánodo en el cual se produce el cloro. Parte de la salmuera migra hacia el cátodo por difusión, dónde se reduce el agua dando lugar al hidrógeno y a la sosa cáustica.

Los inconvenientes que presentan son los siguientes: la contaminación de la sosa cáustica con cloruro sódico (el diafragma no es una barrera selectiva de iones); la concentración máxima de la sosa está limitada para evitar la migración hacia el anolito; el amianto es un material cancerígeno.

4.3.3.3. Celdas de membrana

Esta tecnología se empezó a desarrollar en los años 70. El proceso es similar a las celdas de diafragma y la diferencia fundamental está en que el material que separa el ánodo del cátodo es una membrana de intercambio catiónico selectiva a los iones de sodio (Figura 4.6). De esta manera, se obtiene una disolución de sosa sin iones de sodio y una pureza del cloro superior al resto de tecnologías (ICCP, 2001).

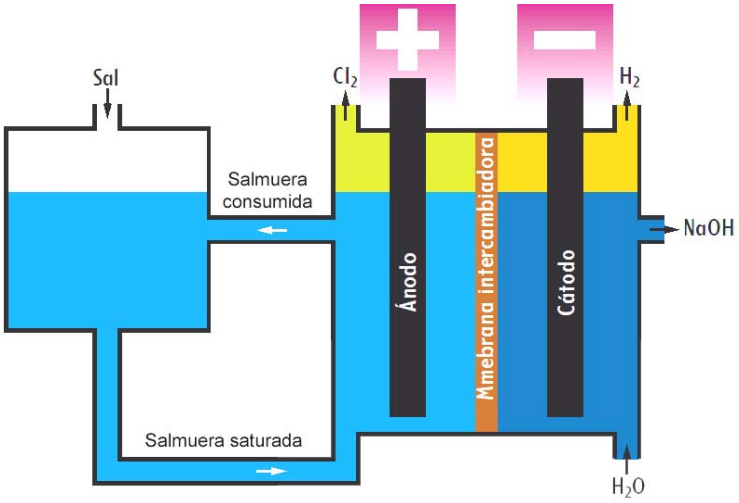


Figura 4.6. Electrólisis de membrana (Solvay Ibérica, 2010)

El consumo de energía es similar a las celdas de diafragma y la sosa producida es de gran pureza. El principal inconveniente es que el proceso precisa de una salmuera con un alto grado de pureza para evitar que la presencia de ciertos elementos provoque la disminución de la vida de los ánodos y de las membranas.

4.3.4. Pretratamientos

La introducción de la tecnología de membrana en la industria del cloro – álcali ha incrementado notablemente la exigencia de pureza de las salmueras. Con ello también ha crecido el número y complejidad de pretratamientos necesarios.

El pretratamiento consiste en una purificación de la salmuera mediante un proceso primario (para todo tipo de electrólisis, sea de mercurio, celda o membrana) y uno secundario (exclusivamente para los procesos de celdas de membrana).

Sin embargo no son los únicos procesos que existen para purificar la salmuera. Hace algunos años, se realizaron estudios para concentrar salmueras mediante electrodiálisis (Blancke, 2007; Turek, 2003; Turek et al. 2008). En ellos, además, se demostró que esta tecnología también es útil para purificar las salmueras de elementos divalentes.

4.3.4.1. Sistema primario

El principal objetivo del tratamiento primario es eliminar los contaminantes que afectan a los electrodos, al rendimiento del proceso o a la calidad del producto. Los elementos a eliminar son Mg^{2+}, Ca^{2+}, SO_4^{2-} y Ba^{2+} (ICCP, 2001).

El sistema primario esta formado por dos etapas, un primer proceso de precipitado seguido de un filtrado. Con la primera etapa se *precipitan* los iones de calcio y magnesio en forma de carbonato de calcio ($CaCO_3$) y de hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$). Mediante la *filtración* se eliminan las impurezas resultantes de la precipitación mediante la sedimentación, filtración o una combinación de ambas.

4.3.4.2. Sistema secundario

Para conservar el grado de eficacia de las membranas, la salmuera de entrada tiene que estar purificada en un grado más alto que en los procesos tradicionales. Para ello, con esta segunda etapa de purificación se reducen aún más las cantidades de calcio y magnesio.

Esta etapa consiste en un proceso de filtrado seguido de una depuración en una unidad de intercambio iónico. La filtración secundaria pretende reducir la materia en suspensión y proteger la resina de la unidad de depuración.

El tratamiento mediante resinas de intercambio iónico tiene como objetivo llevar hasta el nivel de partes por billón la proporción de los metales alcalinotérreos.

4.3.5. Nuevas tecnologías de pretratamiento

La eliminación del sulfato, calcio y magnesio es principal para el buen funcionamiento de una celda de electrolisis de membranas. En los últimos años, se ha iniciado el estudio experimental de la nanofiltración como tecnología de eliminación de sulfatos para la industria cloro – álcali (Barr, 2001; Madaeni, 2007).

La nanofiltración es un sistema de membrana utilizado habitualmente en el tratamiento de aguas. Sin embargo, puede utilizarse con este objetivo ya que es eficaz eliminando los iones polivalentes. Además de tener mejoras ambientales y económicas respecto a los sistemas actuales de precipitación.

5. Nanofiltración

La nanofiltración es una técnica de separación por flujo cruzado que ha ido evolucionando durante los últimos 30 años. La evolución se debe a los avances y nuevos conocimientos en los polímeros lo que ha permitido el desarrollo de nuevas membranas. Comenzó en los años 70 como alternativa a métodos más tradicionales y caros, como la evaporación o la destilación.

Es un proceso a presión que se caracteriza porque sus membranas tienen un tamaño de poro equivalente a un peso molecular de 200 dalton a 1.000 dalton. Debido a esto, son útiles para concentrar compuestos orgánicos y desmineralizar. Su presión de trabajo está comprendida entre los 10 bar y los 34 bar y se caracterizan por separar moléculas orgánicas poco pesadas y sales multivalentes del agua (Yacubowicz, 2005).

Los materiales de las membranas suelen ser de acetato de celulosa y de polisulfona. La superficie está cargada eléctricamente y juega un papel fundamental en el fenómeno de transporte y separación.

La principal característica de las membranas de nanofiltración es su capacidad de retener iones monovalentes. En cambio rechaza los iones divalentes (calcio, magnesio, sulfatos, bicarbonatos, etc.) permitiendo suavizar o ablandar el agua.

5.1. Características generales de las membranas

El agua es una disolución de diversas sales, que le proporcionan las características, y las membranas no se comportan del mismo modo ante cada uno de los componentes. Hay varios aspectos que cabe mencionar:

- No todas las membranas tienen el mismo rechazo de sales.
- Una misma membrana rechaza los distintos iones de diferentes modos.
- Existen iones específicos que tienen limitaciones para su separación.
- El pH óptimo de funcionamiento de las membranas está definido por el fabricante.

Las sales se encuentran disociadas en el agua en forma de iones positivos y negativos. Los principales cationes que se encuentran en el agua son: el calcio (Ca^{2+}), el magnesio (Mg^{2+}),

el sodio (Na^+) y el potasio (K^+). Mientras que los aniones más abundantes son el cloruro (Cl^-), el sulfato ($SO4^{2-}$) y el carbonato (CO_3^{2-}).

Las propiedades químicas de un agua salada dependen de la concentración total de sales. Pero en el proceso de nanofiltración también influye la proporción relativa de unos iones sobre los otros por su incidencia en el precipitado de sales en la membrana.

5.1.1. Mecanismos de transporte

La ósmosis inversa y la nanofiltración comparten muchos aspectos, sin embargo las diferencias entre ambas son apreciables. La membrana de ósmosis inversa ideal debería tener una alta permeabilidad al agua y un paso nulo de sales. En cambio la membrana ideal de nanofiltración debería tener una alta permeabilidad al agua pero el paso de algunos solutos podría ser nulo u otro valor positivo según las necesidades (Dow, 2009).

Los mecanismos de transporte y eliminación en las membranas son muy complejos y, aún hoy en día, continúan siendo una fuente de estudio (Hilal, 2004). Hay dos teorías que intentan modelizar el mecanismo: la teoría de flujo convectivo de Sourirajan y la teoría de difusión de Merten (Medina, 1999).

En primer lugar, Sourirajan establece que hay un flujo convectivo de agua a través de los poros de la membrana. En una primera etapa se absorbe superficialmente el agua para finalmente ser drenada a través de los poros. Según este modelo el tamaño molecular de los componentes del agua tienen un papel fundamental en el rechazo.

En cambio, el modelo de Merten propone una teoría alternativa en donde la membrana no tiene poros y no existe flujo convectivo. El mecanismo de transporte y eliminación se basa en la disolución del agua en la capa superficial de la membrana y en su posterior difusión a través de ella. En este modelo el rechazo depende de la solubilidad relativa del solvente y soluto.

5.2. Parámetros técnicos de operación

5.2.1. Flujo transmembrana

El flujo a través de la membrana es un parámetro característico de ella. Se mide en función del volumen que la atraviesa por unidad de área de la membrana en un periodo y presión determinado. Sus unidades son l/m^2h y es una magnitud importante a la hora de hacer el diseño ya que influye en el número de membranas a utilizar.

Una alimentación de buena calidad permite proyectar valores de flujo elevados ya que los únicos efectos que tendríamos serían la compactación de la membrana debido a la presión y la precipitación de sales.

A medida que el agua empeora su calidad (sólidos, contaminantes, etc) es necesario reducir el flujo o bien incrementar el número de membranas. Al aumentar el número de membranas aseguramos que no se reduzca la capacidad de producción a pesar de las obstrucciones.

5.2.2. Carga electroforética

La superficie de las membranas esta cargada eléctricamente o electroforéticamente y es consecuencia de los elementos químicos que intervienen en la fabricación de las mismas. Éstos confieren unas propiedades apropiadas a la superficie para disponer de una carga eléctrica. Es importante elegir correctamente el producto de limpieza para no deteriorar las cualidades de permeabilidad de la membrana.

5.2.3. Polarización

Cada membrana tiene un porcentaje de eliminación de sales por lo que la calidad del permeado depende de la concentración de entrada. A medida que el permeado atraviesa las membranas las sales se depositan en la superficie (Figura 5.1) y deben ser arrastradas por el rechazo.

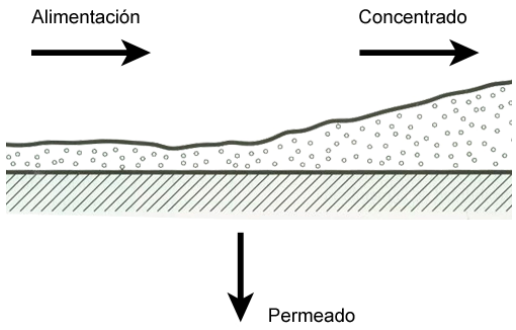


Figura 5.1. Concentración por polarización sobre la membrana (Medina, 1999)

Sin embargo la velocidad del concentrado cerca de la membrana es prácticamente nula (capa límite) y las sales sólo se pueden desplazar por difusión. Este hecho provoca que aumente la concentración en unas zonas más que en el resto (concentración por polarización) dando lugar al fenómeno conocido como polarización.

Sus efectos son los siguientes:

- Reduce el caudal de permeado ya que disminuye la presión efectiva a través de la membrana.
- Aumenta la concentración del permeado al incrementarse el gradiente de concentración
- Aumenta el riesgo de scaling.

La polarización es un factor complejo que depende de muchos factores: la permeabilidad de la membrana, el tipo de régimen del fluido, la geometría de la membrana, la composición y las sales a rechazar del caudal de alimentación, etc. Es difícil predecir su aparición y se debe prevenir con la limpieza de las membranas.

5.2.4. Rechazo

El rechazo es la característica principal de la membrana. De ésta se deducen otros dos conceptos que son: el paso de sales y el rechazo de sales.

El paso de sales es el porcentaje de sales que pasan por la membrana.

$$P_s = \frac{C_p}{C_a} \cdot 100 \qquad \textbf{(Ec. 5.1)}$$

Mientras que el rechazo de sales es el concepto contrario, es el porcentaje de sales que rechaza la membrana.

$$R_s = \frac{C_a - C_p}{C_a} \cdot 100 = \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) \cdot 100 \qquad \textbf{(Ec. 5.2)}$$

Relacionando la concentración del rechazo y de la alimentación obtenemos lo que se conoce como factor de concentración. Este factor es el número de veces que se concentran las sales en el rechazo y se puede obtener con la siguiente expresión (Medina, 1999):

$$F_c = \frac{C_r}{C_a} \qquad \textbf{(Ec. 5.3)}$$

5.2.5. Conversión

La conversión o recuperación (recovery) es el porcentaje de producto que se obtiene a partir de un volumen de alimentación. Es una relación que puede variarse a voluntad según las necesidades de producción, costes y necesidades de mantenimiento. A medida que aumenta la conversión podemos aprovechar más el agua a tratar ya que reducimos el caudal de concentrado y aumentamos la producción de permeado. Se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100 \qquad \textbf{(Ec. 5.4)}$$

La membrana continúa rechazando el mismo porcentaje de sales independientemente de la conversión por lo que cuanto menos caudal de rechazo más concentrado estará (más conversión).

Sin embargo la conversión no es un parámetro que se pueda modificar sin restricciones ya que el coeficiente de solubilidad de las sales y su precipitación nos limita. Una vez se sobrepasa este coeficiente las sales empiezan a precipitar y al precipitar superficialmente obstruye los poros de la membrana. El resultado es una pérdida de las propiedades y características de la membrana (caudal, flujo y rechazo de sales).

Cuanto menor es la conversión menor es el riesgo de precipitación de sales por lo que una de las formas para alargar la vida de las membranas es reduciendo la conversión. Sin embargo esto tiene inconvenientes económicos y se puede evitar el precipitado sin reducir la conversión con los siguientes métodos:

- Regulando el pH. Dado que la solubilidad de las sales varía con el pH podemos ajustar su valor hasta que las sales tengan menor tendencia a precipitar.

- Ajustando la temperatura. Ya que también influye en la solubilidad de las sales, incrementado o reduciendo la temperatura podemos controlar la precipitación.

- Añadiendo antiincrustantes. Éstos mantienen las sales de la salmuera en un estado de supersaturación varias veces superior al límite de la solubilidad habitual evitando así su precipitado.

5.3. Variación del rendimiento con la modificación algunos parámetros

5.3.1. Temperatura

La temperatura del agua varía bastante en función de la época del año y debido a otros factores. Los fabricantes suelen establecer límites de temperatura donde el límite inferior es de 0 ºC mientras que el superior suele estar entre 35 ºC y 45 ºC. El límite superior tiene como finalidad asegurar la adherencia de las membranas evitando grietas y una compactación excesiva.

La temperatura influye en el funcionamiento de las membranas y mientras sea constante, la productividad también lo será. Sin embargo se deben considerar tres aspectos: la solubilidad de las sales, la viscosidad del agua y la actividad biológica.

La *solubilidad de algunas sales* se incrementa con la temperatura (Figura 5.2) por lo que se reduce el riesgo de precipitados. Sin embargo al incrementar la temperatura disminuye el rechazo de sales debido a varios factores: dilatación del agua en la membrana, un incremento de la solubilidad de la sal en la membrana, etc.

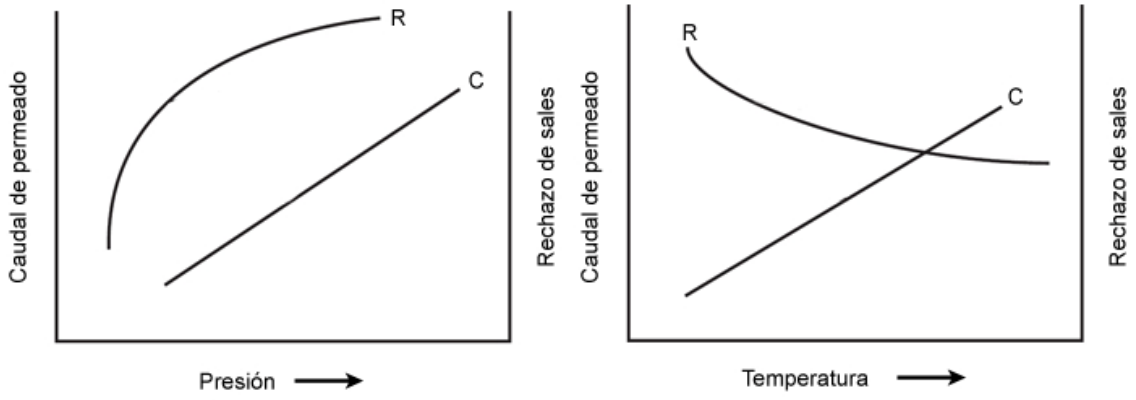


Figura 5.2. Efectos de la presión y de la temperatura (DOW, 2009)

La temperatura influye en *la viscosidad del agua* por lo que si se incrementa la temperatura el caudal también lo hace (Figura 5.2). Además tiene efectos en la dilatación de las membranas, en las tuberías, en el funcionamiento de las bombas, etc.

El incremento de temperatura favorece la *actividad biológica* de microorganismos que ocasionan el ensuciamiento biológico (biofouling). Se debe de tener en cuenta el ensuciamiento que provoca.

5.3.2. Presión

Incrementando la presión de alimentación, la salinidad (TDS) del permeado y el flujo de permeado se incrementan, es decir, se incrementa la productividad como podemos ver en la Figura 5.2. Sin embargo, a largo plazo, el aumento de presión produce una compactación en las capas de la membrana que reduce el caudal.

5.3.3. Recuperación

La recuperación es el ratio de caudal de permeado entre el de alimentación. En el caso de aumentar la recuperación, el flujo de permeado caerá y se parará si la concentración de sales alcanza un valor en el que la presión osmótica del concentrado es tan alta como la aplicada en la alimentación. La alimentación de sales cae cuando se incrementa la recuperación como podemos ver en la Figura 5.3.

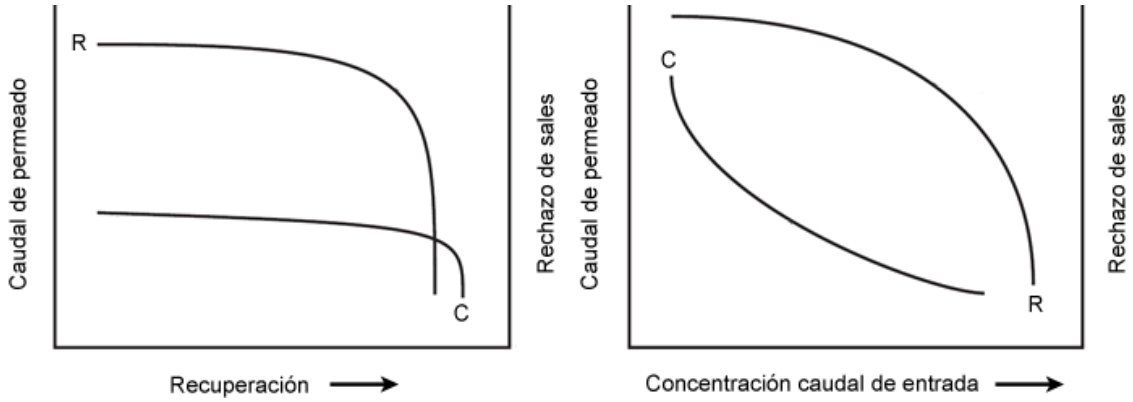


Figura 5.3. Efectos de la recuperación y de la concentración (DOW, 2009)

5.3.4. Concentración de sales en la alimentación

El radio efectivo del poro cargado eléctricamente se incrementa si hay más fuerza iónica en el líquido que lo envuelve. Este hecho provoca que la eliminación de sales y el flujo de permeado caigan si la concentración de la alimentación se incrementa (Figura 5.3).

5.3.5. Comparación entre parámetros

La Tabla 5.1, representa de forma resumida el efecto de determinados parámetros (presión, temperatura, recuperación y concentración de sales) en incrementar o disminuir el flujo de permeado o el paso de sales.

Incremento	Flujo de permeado	Paso de sales
Presión	↑	↓
Temperatura	↑	↑
Recuperación	↓	↑
Salinidad	↓	↑

Tabla 5.1. Resumen de los diferentes efectos

5.4. Tipos de configuraciones de las membranas

La membrana semipermeable es una lámina delgada con cierta fragilidad. Debido al poco caudal unitario de la lámina se necesita mucha superficie para tratar caudales importantes.

Por estas razones se necesita integrar la membrana semipermeable en una estructura que le permita soportar los esfuerzos del proceso de separación y que ocupe el menor espacio. Las principales configuraciones de membranas son:

- Tipo plano
- Tubular
- Fibra hueca
- Arrollamiento en espiral

Los objetivos que persiguen los fabricantes de membranas son diversos: obtener el máximo rendimiento de las membranas, conseguir un sistema compacto, minimizar la polarización, facilitar la sustitución de las membranas, mejorar la limpieza del sistema, etc.

5.4.1. Membranas de fibra hueca

También conocidas como membranas capilares están formadas por millones de tubos capilares (del tamaño de un cabello) y huecos interiormente. Suelen estar fabricadas en poliamida aromática o bien con una mezcla de acetato y triacetato de celulosa.

Las primeras fibras que se implantaron eran fibras de acetato de celulosa con un gran espesor. Este primer sistema era barato pero con un caudal pequeño. Sin embargo se descubrió que la resistencia de la fibra no dependía tanto del espesor como de la relación entre los diámetros interior y exterior. Este hecho permitió la construcción de fibras muy delgadas, como podemos observa en la Figura 5.4 (diámetro interior desde 43 micras hasta

65 micras; diámetro exterior desde 85 micras hasta 165 micras) lo que incrementaba su caudal.

Las fibras están montadas en un tubo cilíndrico resistente a la corrosión y que le da la resistencia necesaria para el proceso. El agua entra por un extremo de la carcasa y se distribuye por un tubo central que va por el interior de la carcasa. El tubo central tiene perforaciones para alimentar las fibras.

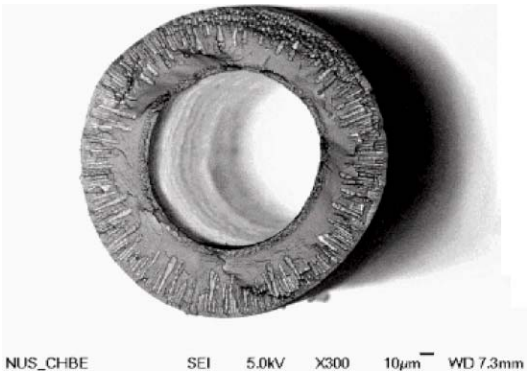


Figura 5.4. Fibra hueca (Kai Yu Wang, 2007)

Las fibras se colocan paralelas al tubo y se doblan en un extremo volviendo al origen (formando una U). Las fibras se sujetan a la carcasa mediante un material epoxi por los dos extremos de la misma. A la vez la fibra se corta por el lado que no esta doblada permitiendo la salida del perneado.

La salmuera se desplaza de una manera radial desde el interior del tubo central hasta la carcasa. Una parte de la salmuera es absorbida por las membranas y sale por las fibras en forma de permeado, mientras que la otra parte es recogida en el extremo de la carcasa en forma de concentrado.

El caudal unitario de cada fibra es pequeño, pero debido a la gran cantidad de fibras provoca que tanto la superficie como el caudal de la membrana sean importantes.

5.4.2. Membrana en espiral

Estas membranas están constituidas por varias láminas rectangulares y planas enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto con perforaciones que permiten recoger el permeado. Con esta configuración se logra una gran superficie en un espacio reducido.

Las láminas semipermeables están alternadas con un separador impermeable y con una malla, por lo que hay tantas mallas y separadores como láminas. La capa activa de la membrana queda en la parte exterior y suele ser de polisulfona.

La malla se coloca encima de la capa activa y determina los canales hidráulicos por los que circula el agua de alimentación. Su forma establece el régimen turbulento necesario para evitar la obstrucción de las membranas y distribuye uniformemente la disolución a tratar. La malla es una capa ultra fina de poliamida.

Por el contrario el separador lo que permite es separar el perneado de concentrado y evitar su contaminación. El material del separador suele ser habitualmente poliéster.

El conjunto de los tres elementos se sellan por tres de sus lados mientras que el cuarto lado es la única salida para el permeado hacia el canal central (Figura 5.5). Además se cierra el conjunto de láminas con una capa exterior de poliéster con fibra de vidrio para garantizar la estanqueidad.

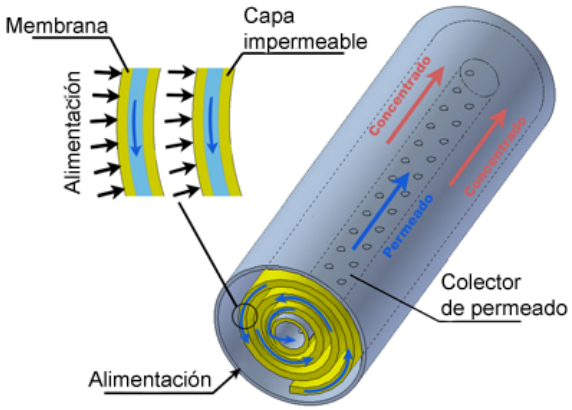


Figura 5.5. Representación de una membrana en espiral

Para finalizar el montaje, la membrana se aloja en un tubo o caja de presión realizada también en poliéster reforzado con fibra de vidrio. Tienen capacidad para seis o siete elementos. Los tubos de presión están cerrados en sus extremos por tapas con orificios roscados para permitir la salida y entrada de los diferentes caudales.

Las membranas se colocan en su interior y se conectan unas con otras mediante interconectores de plástico de alta resistencia. De esta manera el conjunto es estanco y la salmuera no entra en contacto con el permeado.

5.5. Ensuciamiento de las membranas

Las membranas son muy sensibles y si el caudal de alimentación no está adecuadamente tratado pueden modificarse sus características de flujo o de eliminación de sales. Las sustancias que trae el agua se pueden depositar sobre las membranas, mallas y cajas de presión aumentando la polarización.

Es un hecho inevitable incluso con elevados pretratamientos ya que la suciedad depende de muchos factores: tipo de agua de alimentación, membrana, diseño de la instalación (flujo y rendimiento de recuperación), controles, etc.

Por fouling (ensuciamiento) se entiende la acumulación de materiales extraños en la capa activa de la membrana causando problemas operacionales. El término fouling es muy general e incluye diferentes problemas que podemos encontrarnos: scaling, coloidales y biofouling.

5.5.1. Formación de precipitados inorgánicos (scaling)

El scaling o precipitado y deposición puede ser debido a sales minerales o a óxidos metálicos (Figura 5.6). Las sales minerales más susceptibles de precipitar son: el carbonato cálcico ($CaCO_3$), el sulfato cálcico ($CaSO_4$), el sulfato de bario ($BaSO_4$), el sulfato de estroncio ($SrSO_4$), el fluoruro cálcico (CaF_2) o el sílice (SiO_2).

Figura 5.6. Scaling sobre la superficie de la membrana (DOW, 2009)

Los óxidos metálicos más comunes pueden ser: el hierro, el manganeso o el aluminio. El hierro puede estar presente debido a una gran concentración en el caudal de alimentación o a la corrosión de la instalación. Tiene un alto grado de rechazo por parte de las membranas lo que provocará que se concentre y precipite en el rechazo. El manganeso tiene un comportamiento similar al hierro y suelen precipitar ambos.

5.5.2. Coloidales

En el caudal de alimentación puede haber partículas en suspensión de gran tamaño o coloidales. Las grandes partículas no suelen suponer un gran problema ya que son eliminadas en el pretratamiento. Sin embrago las partículas coloidales pueden superar los pretratamientos taponando los poros de la membrana y formando depósitos.

Las partículas coloidales tienen un tamaño comprendido entre 0,01 µm a 10 µm. Estas partículas están cargadas eléctricamente y atraen a los iones positivos formando una capa.

Cuando la concentración de sales aumenta, las partículas coloidales pierden la carga eléctrica y se desagrupan de los iones positivos (coagulación). A continuación pueden aglomerarse los iones y los coloides (floculación), formando partículas más grandes que ensucian la membrana.

5.5.3. Biofouling

Puede producirse debido a que el caudal a tratar contiene suficientes elementos nutritivos para favorecer el desarrollo microbiológico.

Los desarrollos biológicos pueden digerir la capa activa de la membrana (acetato de celulosa) degradándola y reduciendo sus propiedades. También pueden producir un biofilm que ensucia las membranas (Figura 5.7) y causa los mismos efectos que el ensuciamiento coloidal.

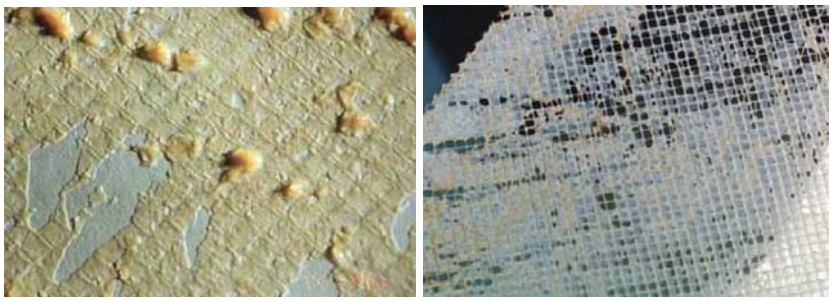


Figura 5.7. Biofilm sobre la superficie y la malla de la membrana (DOW, 2009)

5.6. Técnicas de limpieza

Las posibilidades de recuperar las propiedades de la membrana dependen de la rapidez con la que se detecte el problema y se actúe. Si la membrana trabaja sucia durante mucho tiempo, el atascamiento produce caminos preferenciales provocando que la limpieza posterior no actúe correctamente, entre otros problemas. A la vez se debe considerar que al aumentar la frecuencia de limpieza también lo hace su deterioro y se reduce su vida útil.

Para determinar el ensuciamiento y momento de la limpieza de las membranas hay varios factores que se pueden considerar, algunos de ellos son: reducción del caudal de permeado sobre un 15 %; incremento de la conductividad del permeado alrededor de un 10 %; y el incremento de presión de alimentación sobre un 15 % para poder mantener los valores de recuperación.

5.6.1. Limpieza con agua osmótica a presión (flushing)

Este tipo de limpieza consiste en cambiar el caudal de alimentación por agua osmótica y hacerla circular en el sentido habitual. La finalidad de esta limpieza es doble: por una lado pretende desplazar los restos de agua salada y evitar el fenómeno de ósmosis natural; por otro lado, al desplazar el agua salada evitamos que permanezca estancada en la instalación aumentando el riesgo de precipitados y corrosión.

5.6.2. Limpieza química

Consiste en hacer circular una disolución química capaz de disolver los precipitados y el resto de depósitos en las membranas. El producto químico a utilizar no puede ser uno cualquiera y depende del tipo de fouling. Si no es el adecuado la limpieza es contraproducente y se producen más precipitados, por lo que el primer paso es determinar de qué tipo de fouling se trata.

Cada tipo de fouling tiene sus efectos y unos productos óptimos para tratarlos (Fariñas, 1999; Dow, 2006). Sin embargo hay dos tipos principales de lavado:

- Lavado ácido para eliminar los precipitados inorgánicos.

- Lavado alcalino para eliminar el ensuciamiento debido a la materia orgánica.

En muchos casos se desconoce la causa del fouling o bien es una combinación de varios tipos. En estos casos se realiza una combinación de ambos tipos de limpieza. El procedimiento siempre es el mismo y se inicia con una limpieza alcalina. Si el resultado no es satisfactorio o hay precipitados de carbonato cálcico o óxido de hierro se procede a la limpieza ácida. La limpieza ácida es más agresiva y se deja como último recurso ya que reacciona con los materiales de la superficie de la membrana disminuyendo el rendimiento de ésta.

5.6.2.1. Lavado ácido

Su finalidad es eliminar los precipitados salinos, carbonatos y sulfatos. El procedimiento consiste realizar una disolución con ácido hasta conseguir una pH bajo (entre 3 y 4). Una vez se consigue un pH estable en toda la instalación se deja reposar la disolución en las membranas durante 2 o 4 horas. Finalmente se aclara la instalación con un flushing para eliminar la disolución.

5.6.2.2. Lavado alcalino

Este tipo de limpieza se realiza para combatir el ensuciamiento biológico y se realiza con una disolución con un pH elevado (mínimo 11). El proceso es similar al anterior en este caso las membranas permanecen un período de tiempo más largo con la disolución. La duración depende del grado de ensuciamiento y puede ir desde las 8 hasta las 24 horas.

5.6.3. Deterioro de las membranas

La membrana puede perder sus propiedades debido a múltiples factores, entre ellos: compactación, fouling, telescoping, rotura de la cubierta externa o rotura de la membrana.

La *compactación* se debe a un exceso de presión de alimentación que provoca que la capa activa se comprima contra la capa de soporte. Como consecuencia se sellan poros y se disminuye el caudal de permeado.

El *telescoping* aparece debido a un exceso de prolongación de funcionamiento con las membranas sucias (Figura 5.8). Los precipitados crean caminos preferenciales y un incremento de la pérdida de carga. Esto provoca que se desplacen unas láminas más que otras provocando grietas, fugas y la mezcla del concentrado con el permeado.

Figura 5.8. Telescoping y rotura de la membrana (DOW, 2009)

Las *roturas de la cubierta externa* o la *rotura de la membrana* pueden producirse por defectos de fabricación, movimientos internos o rotura de algún elemento de la instalación que llegue a las membranas (Figura 5.8).

6. Diseño de la instalación

6.1. Introducción

El diseño de una instalación se hace a partir del conocimiento de dos aspectos fundamentales: el análisis del agua que se va a tratar (Tabla 6.1) y de la calidad del agua que se quiere obtener. En nuestro caso la concentración de entrada sí que es conocida, en cambio, la concentración objetivo de salida no es un valor fijado.

Elemento	Concentración de la salmuera (mg/l)
Potasio (K^+)	558
Sodio (Na^+)	21.680
Magnesio (Mg^{2+})	2.462
Calcio (Ca^{2+})	669
Estroncio (Sr^{2+})	0,16
Nitratos (NO_3^-)	2
Cloruros (Cl^-)	37.470
Sulfatos (SO_4^{2-})	6.540
pH	7,6

Tabla 6.1. Concentración de la salmuera de alimentación

El objetivo es ver la capacidad y viabilidad de la tecnología, evaluando el rechazo de determinados componentes que es capaz de alcanzar en diferentes escenarios. También se estudiará la variación de rendimiento modificando la posición de la etapa de nanofiltración (NF) dentro del proceso global (Figura 6.1). El proceso general consta de: una etapa de ósmosis inversa (OI); una etapa de electrodiálisis (ED) para la concentración de la salmuera; y una etapa final de electrólisis mediante celdas de membrana (EU_M).

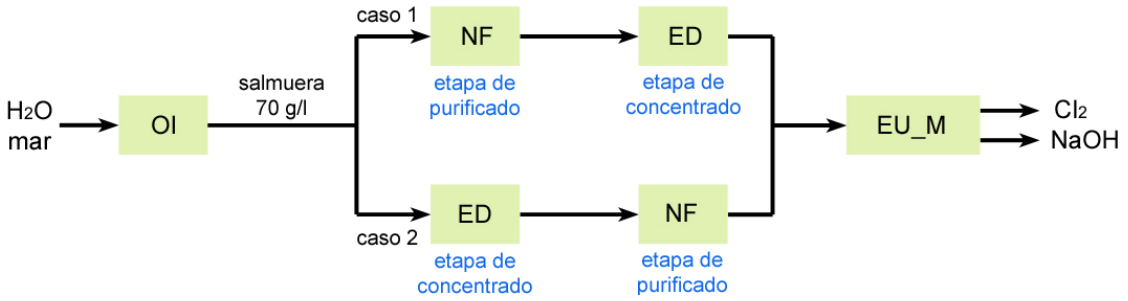


Figura 6.1. Diagrama del proceso global y situación del proceso de nanofiltración

6.2. Prediseño manual

A continuación se describe el prediseño manual que consta de los siguientes pasos:

- Elección del modo de funcionamiento.
- Determinación de las características del agua de alimentación.
- Determinar el modo de funcionamiento y número de módulos.
- Elección de la membrana y del flujo de diseño.
- Definición del número de membranas.
- Definición del número de cajas a presión.

6.2.1. Elección del modo de funcionamiento

El proceso de filtrado con una membrana puede ser de tres tipos: batch mode, semi-batch mode o funcionamiento continuo.

El *batch mode* se utiliza en aplicaciones con pequeños volúmenes para procesar y en los que ocurren alternativamente en el tiempo (aguas residuales o de procesos industriales, etc.). Por lo que el agua se almacena en un depósito para acumular el volumen suficiente para ser tratado.

La característica de este proceso es que el concentrado se recircula de manera que el nivel del depósito va disminuyendo lentamente a la vez que aumenta la concentración. Una variante del método anterior es el *semi-batch mode*, en el que la diferencia consiste en ir rellenando el depósito con agua de alimentación.

Las ventajas de estos procesos está en la mayor flexibilidad del agua a tratar, la calidad del permeado se puede maximizar entre cada proceso, bombas menos potentes, instalación más barata, fácil de limpiar y de automatizar.

El modo alternativo a los anteriores es el *funcionamiento continuo* en el que no hay recirculación. Este modo tiene como características un flujo y calidad continua del permeado. Esto es ideal para nuestro proceso ya que debemos asegurar una producción constante en cuanto a composición y caudal para no alterar el funcionamiento de los procesos siguientes.

6.2.2. Paso 1: determinación de las características del agua de alimentación

El fabricante de las membranas establece unos límites en la condiciones de operación para evitar la tendencia al fouling. Estos límites dependen de la máxima recuperación, máximo caudal de permeado, mínimo caudal de concentrado y el máximo caudal de alimentación por membrana.

Por ello es muy importante establecer la calidad del agua que se desea tratar y determinar el SDI (Silt Density Index). El SDI representa la tendencia del agua a ensuciar la instalación debido a la presencia de partículas coloidales o en suspensión.

En nuestro caso el agua de alimentación será el rechazo de OI por lo que se supone que habrá pasado previamente por procesos de filtrado y floculación por lo que el SDI será bajo. En la Tabla 6.2 se puede ver las recomendaciones del fabricante en cada caso:

Tipo de alimentación	**RO permeado**	**Agua de consumo suavizada**	**Agua subterránea**	**Agua de consumo**
SID	<1	<3	<3	<5
Flujo transmembrana (l/m^2h)	51	51	42	34
Máxima recuperación por elemento (%)	30	30	25	20
Máximo caudal de permeado (m^3/h)	0,49	0,49	0,41	0,33
Mínimo caudal de concentrado (m^3/h)	0,5	0,5	0,7	0,7

Tabla 6.2. Parámetros de funcionamiento según el caudal de alimentación (Dow, 2009)

En la Tabla 6.2 sólo se consideran aguas con poca salinidad por lo que aproximaremos las características de la salmuera como agua subterránea que es quien tiene un valor de SID más próximo al valor real. Éste será uno de los condicionantes que nos acompañarán en todo el diseño y es que los fabricantes no consideran la alimentación de salmuera o aguas salobres en las membranas.

6.2.3. Paso 2: determinar el número de etapas

Se define como etapa cada uno de los módulos que son alimentados desde una fuente única. Al aumentar el número de etapas de la instalación se eleva el caudal de permeado. Sin embargo al pasar la alimentación por una membrana y después por las siguientes, se eleva la salinidad. En cambio el rechazo de sales de la membrana no se modifica, por lo que aumenta el flujo de sales y se empeora la calidad del producto.

Al ser una planta piloto, el caudal a tratar será pequeño, por lo que no serán necesarias muchas membranas ni etapas. De manera que se diseña una instalación sencilla con una única etapa.

6.2.4. Paso 3: elección de la membrana y del flujo de diseño

En nuestro caso las membranas ya estaban establecidas (modelo *NF270*, con un área de trabajo de 7,6 m^2, Tabla 6.3) debido a la participación en el proyecto del fabricante *Dow Chemical*.

Tipo de membrana	Área (m^2)	Máximo caudal de alimentación (m^3/h)	Máxima caída de presión (bar)	Máxima presión de alimentación (bar)
NF270	7,6	3,6	1	41

Tabla 6.3. Características técnicas de las membranas utilizadas, FILMTEC NF270 (Dow, 2009)

Un parámetro característico de la instalación es el caudal de permeado entre el total de área de las membranas, conocido como flujo de permeado (lmh o l/m^2h). Este valor nos ayudará a estimar el número de membranas necesarias. Siguiendo las indicaciones de la Tabla 6.2 establecemos un flujo de 42 l/m^2h para el caso de agua subterránea.

6.2.5. Paso 4: número de membranas

Para obtener el número de membranas necesarias nos basamos en la siguiente expresión (Ec. 5.1):

$$N_E = \frac{Q_P}{f \cdot S_E} \qquad \textbf{(Ec. 6.1)}$$

Donde: Q_P es el caudal de permeado en [m^3/h]; f es el flujo de la membrana [l/m^2h]; y S_E es el área de la membrana [m^2]. La planta piloto deberá trabajar con un caudal de 500 l/h por lo que el número de membranas necesarias será de:

$$N_E = \frac{0{,}5\ \mathrm{m^3/h} \cdot \frac{1.000\ \mathrm{l}}{1\ \mathrm{m^3}}}{42\ \frac{\mathrm{l}}{\mathrm{m^2 \cdot h}} \cdot 7{,}6\ \mathrm{m^2}} = 1{,}567 \approx 2$$

Son necesarias dos membranas para tratar el caudal en las condiciones impuestas. Sin embargo este es un valor orientativo ya simplemente se considera aspectos muy básicos del diseño y no contempla otros como la temperatura, la variación de flujo, etc.

6.2.6. Paso 5: determinar número de cajas de presión

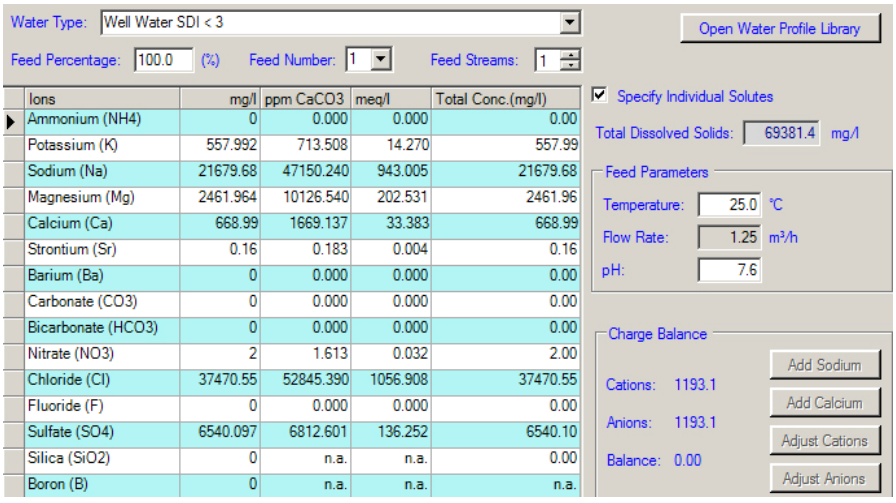
Las cajas de presión son el lugar donde se almacenarán las membranas con un máximo de 8 membranas por caja. En nuestro caso, al tener tres membranas, con una caja de presión tendríamos suficiente.

6.3. Diseño final: estimación mediante ROSA

Para precisar más el diseño de la instalación se procedió a utilizar un software diseñado por *DOW* (<http://www.dow.com/liquidseps/design/rosa.htm>). Éste es conocido como *ROSA* (Reverse Osmosis System Analysis,). El programa *ROSA* simula el rendimiento del sistema a partir de unas condiciones del agua de entrada y nos permite elegir las membranas adecuadas (en nuestro caso comprobar su correcto funcionamiento) para que tenga el flujo (l/m^2h) adecuado.

6.3.1. Configuración del equipo

Iniciamos el programa y establecemos que el análisis se realice en NaCl con unidades de m^3/h y bares. A continuación fijamos las características del agua de alimentación (Figura 6.2). Además determinamos el tipo de agua y establecemos un agua con un SDI inferior a tres (agua subterránea). Los resultados debemos tomarlos como orientativos teniendo en cuenta la aproximación del agua a la salmuera.



Ions	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc.(mg/l)
Ammonium (NH4)	0	0.000	0.000	0.00
Potassium (K)	557.992	713.508	14.270	557.99
Sodium (Na)	21679.68	47150.240	943.005	21679.68
Magnesium (Mg)	2461.964	10126.540	202.531	2461.96
Calcium (Ca)	668.99	1669.137	33.383	668.99
Strontium (Sr)	0.16	0.183	0.004	0.16
Barium (Ba)	0	0.000	0.000	0.00
Carbonate (CO3)	0	0.000	0.000	0.00
Bicarbonate (HCO3)	0	0.000	0.000	0.00
Nitrate (NO3)	2	1.613	0.032	2.00
Chloride (Cl)	37470.55	52845.390	1056.908	37470.55
Fluoride (F)	0	0.000	0.000	0.00
Sulfate (SO4)	6540.097	6812.601	136.252	6540.10
Silica (SiO2)	0	n.a.	n.a.	0.00
Boron (B)	0	n.a.	n.a.	n.a.

Figura 6.2. Datos de partida en ROSA, composición del caudal de alimentación

Una vez determinadas las características del agua pasamos a determinar los parámetros de funcionamiento de las membranas. En ella especificamos los siguientes datos: 50 %

recuperación, 1,25 m^3/h de caudal de alimentación, temperatura de entrada de 25 ºC y el tipo de membrana *NF270 – 4040*.

Para realizar el estudio con más profundidad se han simulado tres posibles escenarios. Las diferencias entre los tres casos serán en el número de membranas:

Caso	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Características	3 membranas	4 membranas	5 membranas

Tabla 6.4. Características de los tres escenarios simulados

La simulación realizada por *ROSA* nos permite definir el resultado de la instalación según la configuración establecida. También nos advertirá de posibles diseños erróneos según los límites impuestos debido a trabajar con agua subterránea y según las características de la membrana. De manera que se realiza el primer cálculo y si aparecen mensajes de alerta se modifican ciertos parámetros establecidos anteriormente para a continuación volver a proceder.

Caso 1

Las alertas notificadas por el programa son las siguientes: la recuperación por membrana es del 21 % y excede la máxima admitida (19 %); la presión de alimentación es de 50,9 bar y excede la máxima presión admitida por las membranas (41,5 bar); y, finalmente, el caudal de concentrado es de 0,62 m^3/h y es inferior a los 0,68 m^3/h recomendados.

Para ajustar las condiciones de funcionamiento de las membranas se reduce el valor de recuperación total hasta encontrar un valor que nos permita trabajar dentro de las condiciones admitidas. La recuperación mínima para lograrlo es del 40 %.

Casos 2 y 3

El comportamiento de ambos casos es muy similar y se encuentran próximos a trabajar dentro de los límites de funcionamiento. La única alarma notificada por el software en ambos casos es que el caudal de concentrado (0,63 m^3/h) no alcanza el mínimo necesario.

Como en el caso anterior se ajusta la recuperación del sistema hasta encontrar una configuración que permita trabajar dentro de las condiciones impuestas. La recuperación máxima con la que se debe trabajar es del 45 % en ambos casos.

6.3.2. Comparación resultados entre los tres casos

	Presión de alimentación (bar)	Caudal de permeado (m^3/h)	Caudal de concentrado (m^3/h)	Flujo de permeado (lmh)	Recuperación por elemento (%)	Recuperación total (%)	Potencia específica (kWh/m^3)	Potencia (kW)
Caso 1	40,9	0,50	0,75	21,9	16	40	3,58	1,79
Caso 2	37,2	0,56	0,69	18,5	14	45	2,9	1,63
Caso 3	31,8	0,56	0,69	14,8	11	45	2,48	1,4

Tabla 6.5. Comparación de los resultados entre las tres simulaciones

A medida que se reduce el número de membranas aumenta la recuperación por elemento, lo que se traduce en una mayor tendencia de fouling. También podemos observar que en el caso de instalar tres membranas será necesaria una presión de trabajo ligeramente superior al resto de casos y próxima al límite de la membrana. Este hecho implica que la potencia específica por m^3/h de permeado producido sea superior, lo que supone una potencia final más elevada y un coste por m^3 de permeado superior.

6.3.3. Comparación entre casos: temperaturas anormales

Otro aspecto interesante a considerar es qué sucedería en el caso de que el agua de alimentación estuviese fuera de la temperatura normal de trabajo. Por ello repetimos el proceso anterior cambiando la temperatura de alimentación a 10 ºC y situándonos en el caso del agua de alimentación en invierno. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 6.6.

	Presión de alimentación (bar)	Caudal de permeado (m^3/h)	Caudal de concentrado (m^3/h)	Flujo de permeado (lmh)	Recuperación por elemento (%)	Recuperación total (%)	Potencia específica (kWh/m^3)	Potencia (kW)
Caso 1	40,4	0,32	0,93	14,2	10	26	5,44	1,77
Caso 2	40,7	0,41	0,84	13,5	10	33	4,32	1,78
Caso 3	40,7	0,49	0,76	12,8	9	39	3,66	1,78

Tabla 6.6. Comparación de las tres simulaciones con un caudal de entrada a 10 ºC

Como podemos observar, los resultados obtenidos cambian notablemente. Debido al cambio de temperatura del agua cambia la densidad y la viscosidad de la misma. Estos cambios afectan a parámetros como la recuperación total o los caudales de permeado que disminuyen significativamente.

El aspecto decisivo es que, tanto en el primer caso como en el segundo, no se alcanza el caudal necesario para la siguiente etapa del proceso (electrodiálisis). Únicamente se alcanzan los 500 l/h mediante la instalación de cinco membranas.

Por esta razón, junto con la menor energía necesaria de trabajo y la menor recuperación por elemento (menor tendencia al ensuciamiento y menor mantenimiento), se decide finalmente instalar a la planta piloto cinco membranas.

7. Descripción de la instalación

7.1. Características de la instalación

Los datos considerados en el diseño de la instalación han sido los siguientes:

- Caudal de salmuera de alimentación: 1,25 m^3/h (permeado: 0,56 m^3/h; concentrado: 0,69 m^3/h).
- Presión de diseño nominal: 32 bar, máximo 41 bar.
- Conversión de la planta: 45 %.
- Salinidad de la salmuera: aproximadamente 70 g/l.
- Temperatura de diseño: 25 ºC.
- Temperatura mínima: 11 ºC.
- Configuración instalación: 1 etapa con 2 cajas de presión para un total de 5 membranas.
- Tipo de membrana: espiral, NF270 – 4040 (Dow – FILMTEC).
- Caudal y presión de la disolución de limpieza: 3 m^3/h a 4 bar.

Una vez conocidos los parámetros básicos de la instalación (presión y caudal de trabajo de las membranas) se procede a finalizar el diseño del resto de la instalación. Para ello se hace uso de las propias recomendaciones del fabricante, así como los propios requerimientos considerados oportunos.

Podemos diferenciar las siguientes partes:

- Toma de agua.
- Pretratamiento (dosificación y filtrado).
- Nanofiltración.
- Limpieza.

7.2. Toma de agua

La planta piloto estará ubicada en una planta experimental de desalación en el Prat del Llobregat, en un recinto con otras instalaciones. Algunas de estas instalaciones son: dos plantas pilotos desaladoras de OI (una corresponde a Degremont y la otra a DOW) y una planta piloto de electrodiálisis, entre otras. De las plantas pilotos desaladoras se tomará el rechazo de salmuera para alimentar la planta piloto con un caudal de 1,25 m^3/h. El esquema de la distribución de salmuera lo podemos ver en el **Anexo 6.1**.

Además, la planta piloto dispondrá de una toma de agua osmótica y una toma de agua de red. La toma de agua osmótica proviene de las plantas desaladoras. En ambos casos las tomas nos ayudarán en los procesos de limpieza y flushing.

Para almacenar tanto la salmuera como el agua de red se ha instalado un depósito (T100) el cual podrá contener hasta cuatro fluidos diferentes: salmuera, agua de red, permeado de OI o la disolución de limpieza. Tendrá un volumen de 1 m^3 y está construido en polietileno mecanizado. Al depósito se le instalarán unos accesorios para controlar ciertos parámetros de la instalación:

- Resistencia eléctrica de caldeo con sonda de temperatura y señal eléctrica. La resistencia eléctrica de caldeo (TSH100) nos permite modificar la temperatura de la disolución de limpieza. Mientras que la sonda de temperatura nos permite controlar la temperatura del depósito.

- Agitador (FA100). Para preparar correctamente las disoluciones de limpieza.

- Válvula de vaciado. Al utilizar diversos tipos de alimentaciones se debe incorporar una salida del depósito para poder cambiar de fluidos rápidamente.

- Boya con válvula. Debido a que la alimentación de salmuera no se puede desperdiciar por el rebosadero se ha instalado una boya conectada a la válvula de alimentación (SV100). Cuando se alcanza el nivel máximo del depósito la boya cierra la válvula de alimentación del mismo.

7.3. Pretratamientos físicos y químicos

Los pretratamientos físicos y químicos tienen como finalidad adecuar las condiciones con las que llega la alimentación a las membranas asegurando el correcto funcionamiento y mantenimiento de la instalación. Los pretratamientos establecidos son los siguientes: filtrado y dosificación de antiincrustante.

7.3.1. Filtro de cartuchos

La salmuera procede de un proceso de OI en el que ha pasado por todo tipo de tratamientos (floculación, coagulación, sedimentación, etc.) para adecuarla a su proceso. Lo que nos garantiza una alta calidad de salmuera. Para asegurar que se mantiene la calidad se ha instalado un filtro de cartucho justo a la salida del depósito T100.

La ubicación del filtro fue un aspecto importante a la hora del diseño de la planta. Cuando el filtro es nuevo se le estima una pérdida de carga de 0,3 bar, mientras que cuando están colmatados puede incrementarse mucho la pérdida de carga (hasta 1 bar). Este hecho podría provocar la cavitación de las bombas que se instalen a continuación del filtro. Por este motivo se decidió montar la bomba de limpieza en serie con la de alta presión justo después del filtro (ver cálculos de NPSH con bombas en serie y en paralelo, **Anexos 1.1** y **1.2**).

El filtrado estará compuesto por un filtro de cartucho de 5 µm. El caudal y la presión de trabajo del filtro podrá variar desde los 1,25 m^3/h y 41 bar en funcionamiento normal, hasta los 3 m^3/h y 4 bar durante la limpieza de las membranas.

Accesorios:

- Válvulas manuales a la entrada y salida. Permiten el aislamiento del filtro para poder realizar el cambio del cartucho sin vaciar toda la instalación.

- Diferencial de presión (DPI100). Realizando la diferencia de presión entre la salida y a la entrada del filtro podemos conocer el grado de colmatación.

7.3.2. Dosificación antiincrustante

El objetivo del proceso de nanofiltración es eliminar los elementos divalentes de la salmuera (entre ellos el calcio y magnesio) lo que provocará que se concentren en el rechazo. Se puede dar la situación de que se sobrepase la solubilidad de las sales y acaben precipitando en el tramo de concentrado.

Según las concentraciones de estudio de la salmuera, la sal más susceptible de precipitar es el sulfato cálcico ($CaSO_4$). Esto es un hecho que podemos observar en las simulaciones realizadas mediante *ROSA*. Los resultados muestran que la concentración de sulfato cálcico en el caudal de concentrado es de 137 g/l (Figura 7.1).

	Feed	Adj. Feed	Concentrate
pH	7.6	7.6	7.86
LSI	-6.289	-6.289	-5.523
Stiff & Davis Index	-7.508	-7.508	-6.798
TDS (mg/l)	69,381	69,381	126,148
Ionic Strength (molal)	1.482	1.482	2.870
HCO3 (mg/l)	0.000	0.000	0.000
CO2 (mg/l)	0.000	0.000	0.000
CO3 (mg/l)	0.000	0.000	0.000
CaSO4 (% Saturation)	46.19	46.19	136.99
BaSO4 (% Saturation)	0.0	0.0	0.0
SrSO4 (% Saturation)	0.50	0.50	1.65
CaF2 (% Saturation)	0.0	0.0	0.0
SiO2 (% Saturation)	0.0	0.0	0.0
Mg(OH)2 (% Saturation)	0.13	0.13	0.80

Figura 7.1. Concentraciones de alimentación y del concentrado

Por este motivo se incorpora a la instalación un sistema de dosificación de antiincrustante. El compuesto antiincrustante (sin determinar en el momento de redacción), mantendrá en estado de supersaturación las sales evitando su precipitado.

Para la dosificación del antiincrustante se utiliza una bomba con membrana magnética. Esta bomba incorpora un imán que mueve un eje magnético alternativamente en el sentido longitudinal. Este movimiento se transmite a la membrana provocando la aspiración e impulsión del fluido. La bomba permite ajustar la frecuencia y longitud de la carrera del eje ajustando así la potencia de dosificado.

Accesorios:

- Depósito de 25 l. Contendrá la disolución antiincrustante. El depósito se irá renovando cada vez que se acabe la disolución.
- Válvula antiretorno. Evita la introducción de salmuera en el tramo de dosificación.
- Válvula de bola manual. Permite aislar la instalación de dosificación.
- Válvula multifunción.

La válvula multifunción tiene dos funciones: una de contrapresión y otra de seguridad. La función de contrapresión está tarada a 1,5 bar y evita que la bomba trabaje a una contrapresión superior al valor de tarado. Por otro lado, la función de seguridad está calibrada a 6 bar de manera que si en la impulsión se supera este valor la válvula se abrirá y descargará el fluido en el depósito.

7.4. Proceso de nanofiltración

7.4.1. Bombas de alta presión (P101)

Para la selección de la bomba nos basamos en los datos de diseño de la instalación. Debido a que el caudal de permeado estaba condicionado a 0,5 m^3/h y se estima una recuperación del 45 % hacen que el caudal de salmuera a suministrar sea de 1,25 m^3/h. Es importante que el caudal sea estable para que la producción de salmuera purificada sea constante, ya que otras plantas dependen de este producto con una demanda constante de 500 l/h.

A continuación se fijó la presión según la máxima presión de trabajo de las membranas. En el caso de las membranas NF270 es de 41 bar, por lo que se estableció esta presión como la máxima de trabajo.

Otro aspecto importante a considerar es el tipo de fluido que se deberá impulsar. La salmuera a tratar es muy corrosiva lo que podría suponer un inconveniente para las partes móviles, juntas y otras partes de la bomba.

Los motivos más importantes para la selección fueron la corrosión y el caudal de permeado estable en 0,5 m^3/h. Ellos fueron condicionantes para seleccionar una bomba de desplazamiento positivo.

Las bombas de desplazamiento positivo tienen una cavidad que se expande (aspiran el fluido) y que se contrae (impulsando el fluido). Debido a que la cavidad cambia el volumen cada ciclo, de la misma manera se conocen a este tipo de bombas como de caudal constante.

Un inconveniente de las bombas de desplazamiento positivo es que no pueden trabajar contra válvula cerrada. Ya que sino la bomba continuará impulsando caudal elevando la presión hasta que aumente tanto que se queme la bomba, se destruya la instalación o pasen ambas cosas. Como medida de seguridad se instala una válvula de seguridad en la impulsión que descarga el caudal al depósito una vez se alcanza la presión de tarado.

Bombas de desplazamiento positivo hay de muchos tipos, pero la que presenta una característica interesante para nuestras condiciones de trabajo son las bombas de membrana o diafragma. En este tipo de bomba el elemento impulsor es un diafragma flexible que se acciona mediante un elemento reciprocante (Hydra-Cell, 2009).

Debido a que no hay elementos en movimiento no hay problemas de fricción en el diafragma. Este hecho da lugar a que se puedan bombear fluidos contaminados con sólidos (lodos o aguas negras), productos tóxicos, abrasivos, inflamables, corrosivos, etc.

Finalmente, la bomba seleccionada fue la *Hydra-Cell Wanner G10* (<http://www.hydra-cell.com/>) con el cuerpo construido en acero 316. Este tipo de bomba tiene un rango de funcionamiento desde 0,4 l/min hasta 128 l/min y una presión de hasta 170 bar. Es decir, puede alcanzar elevadas presiones con unos caudales moderados – bajos.

Accesorios:

- By-pass. Es un tramo de tubería que permite saltar las membranas y descargar el caudal en el tramo de concentrado.

- Manómetro. Permite controlar la presión de entrada a las membranas.

- Válvula de aguja (HV103) en el by-pass. Permite ajustar el caudal y la presión progresivamente. De esta manera las membranas no sufren golpes de presión que las podrían destruir.

- Válvula de seguridad. Situada en el by-pass protege a la instalación y a los operarios de cualquier presión superior al valor de tarado.

- Variador de frecuencia. Permite variar las revoluciones del motor de la bomba de alta presión, ajustando así el caudal a las necesidades de cada momento.

- Caudalímetro. Tiene una indicación visual del caudal para los operarios y también una señal eléctrica para el PLC. La señal eléctrica permite controlar el variador de frecuencia, de manera que programando un caudal en el PLC este variará las revoluciones del motor hasta ajustarse a la señal del caudalímetro.

7.4.2. Bomba de transferencia o de limpieza (P301)

Como comentamos en los **Anexos 1.1** y **1.2**, la bomba de alta presión necesitaba una elevada presión de succión. Para evitar su cavitación se ha colocado en serie una bomba de transferencia. Debido a que la bomba trabajará en dos modos diferentes tendrá dos puntos de funcionamiento. Para establecer el punto de funcionamiento cuando la bomba trabaja como bomba de limpieza hacemos uso de las recomendaciones del fabricante (Tabla 7.1).

Presión de alimentación (bar)	Diámetro de la membrana (inches)	Caudal (m^3/h)
1,5 - 4	2,5	0,7 – 1,2
1,5 - 4	4	2,7 – 3,2
1,5 - 4	6	3,6 – 4,5
1,5 - 4	8	6 – 9,1

Tabla 7.1. Caudal y presión de limpieza recomendados según la membrana (DOW, 2009)

En nuestro caso establecemos un punto de funcionamiento de 3 m^3/h y 4 bar. Considerando las pérdidas de carga que hay en la tubería hasta la membrana y hasta la segunda caja de presión nos aseguramos que llegue con el caudal y presión dentro del rango recomendado.

En el caso de funcionar como bomba de transferencia, ésta deberá entregar un caudal que se ajuste al caudal de la bomba de alta presión, es decir, de 1,25 m^3/h. En cuanto la presión, ha de ser suficiente para asegurar que la bomba P101 tiene la presión de aspiración suficiente.

Debido a los dos tipos de funcionamiento de la bomba, las características demandadas son las siguientes: apta para salmueras del 10% de concentración y apta para productos ácidos de pH entre 2 y 3.

La bomba elegida para realizar estas funciones es una bomba centrífuga. Esta bomba es capaz de entregar más caudal y menos presión. El modelo en concreto de la bomba es el *Packo serie FP2/32 – 160* (<http://www.packopumps.com/en/>). Para poder soportar las exigencias del fluido, en cuanto a corrosión y erosión, se emplea acero inoxidable 316 para la voluta y rodete. Para evitar que la salmuera erosione las superficies en contacto, éstas cuentan con un pulido mediante electroerosión. Así se evita la adhesión de las partículas mejorando la resistencia y la limpieza.

Para que la bomba pueda trabajar como bomba de limpieza (3 m^3/h y 4 bar) y como bomba de transferencia (1,25 m^3/h y 4 bar) ha de variar su punto de funcionamiento. Para conseguir cambiar el punto de trabajo se incorpora una válvula de aguja y un by-pass en la salida de la bomba que descarga en la aspiración de la misma.

Se ha optado por esta regulación debido al bajo rendimiento que presenta la bomba (alrededor del 18 %) en el modo de limpieza. Si optásemos por modificar las revoluciones para entregar el caudal de 1,25 m^3/h el rendimiento sería muy pobre.

El rendimiento que presenta la bomba es muy bajo incluso en el modo de limpieza. Se ha primado la resistencia y el mantenimiento antes que el coste, ya que la bomba trabajará en condiciones de corrosión debido a la salmuera y los productos de limpieza.

Accesorios:

- By-pass en P101 con válvula de esfera. El by-pass comunica la aspiración con la impulsión de la bomba de alta presión P101. Este by-pass cuenta con una válvula de esfera que permite aislar o alimentar la bomba de alta presión según este abierto o cerrado respectivamente.

- By-pass en P301 con válvula de aguja. Este by-pass comunica la impulsión con la aspiración de la bomba de baja presión P301. Regulando la abertura de la válvula podemos ajustar el caudal que entrega. Con la válvula totalmente cerrada conseguimos el punto de funcionamiento de 3 m^3/h y 4 bar.

7.4.3. Cajas de presión

Para alojar las membranas se utilizarán cajas de presión modelo *CodeLine 40E60*. Las cajas de presión están diseñadas para trabajar a una presión de 41 bar y una presión máxima de 248 bar (seis veces superior a la nominal). Este hecho aporta a la instalación una seguridad ante algún tipo de fallo ya que estamos trabajando con una bomba de desplazamiento positivo de alta presión capaz de alcanzar cerca de 70 bar.

Los contenedores están construidos mediante un composite recubierto exteriormente con poliuretano (PU). De esta manera se consigue aislar el interior del contenedor de los rayos UV y evitar la proliferación de biofouling en las membranas.

Otro aspecto a considerar es que su interior esta pulido con acabado espejo y rugosidad 4 Ra. Esta característica permite realizar el montaje de las membranas de una manera sencilla y además evita las incrustaciones.

Las cajas a presión tienen una capacidad de hasta seis membranas. Sin embargo debido a la ubicación de la planta piloto y al espacio disponible se decide separar las membranas en dos cajas. La primera caja (CN 100) contendrá dos membranas y tendrá una longitud de 2,28 m. La siguiente caja (CN200) contendrá las tres restantes y tendrá una longitud de 3,29 m.

7.4.4. Membranas

Las cinco membranas son del fabricante *Dow-FILMTEC*, modelo *NF270 – 4040*. Estas membranas están diseñadas para permitir un elevado paso de sales y medio paso de la dureza del agua. Por ello están recomendadas para procesos de suavizado de agua.

7.4.5. Válvula reguladora de la recuperación

En el tramo del concentrado se instala una válvula de aguja que permite regular la conversión de la instalación, es decir, regular la producción de permeado. Se ha de considerar que incrementar la recuperación también supone un inconveniente ya que las membranas tendrán que trabajar a un flujo superior lo que implica acortar su vida útil, mayor frecuencia de limpieza, etc.

La presión de concentrado a la salida de las membranas es de entre 2 bares y 6 bares menor que la presión de alimentación. Por lo que la válvula de aguja también ha de introducir una pérdida de carga que reduzca la presión hasta una que permita la manipulación del concentrado con más seguridad.

7.5. Definición del protocolo de limpieza

7.5.1. Identificación de la necesidad de limpieza de las membranas

El fouling provoca una pérdida de caudal del permeado fuera del nominal y hay un incremento del paso de sales en el permeado. Por ello se han establecido los siguientes parámetros para determinar el momento de limpieza:

- La eliminación de sales se reduce más de un 10 %.
- El caudal de permeado disminuye un 10 % respecto al valor nominal.
- La diferencia entre la presión de alimentación y la presión de concentrado se incrementa un 15 %.

7.5.2. Recomendaciones durante la limpieza de las membranas

Se debe prestar especial atención a la manipulación de cualquier compuesto químico cumpliendo las instrucciones y recomendaciones del fabricante respecto a la seguridad, manipulación y dosis.

También se debe prestar especial atención a la hora de preparar la disolución. De no prepararla adecuadamente puede quedar retenida en el filtro de cartucho o bien en la propia membrana. Por este motivo es conveniente hacer uso del agitador, si es necesario. Durante la limpieza la disolución se recircula y se debe mantener constante el pH de la disolución. En función de la temperatura de disolución el fabricante recomienda unos rangos de pH, como se observa en la Tabla 7.2.

Temperatura (ºC)	25	35	45	50
Rango pH	1 – 12	1 – 11	3 – 10	2 – 10

Tabla 7.2. Rangos de pH según la temperatura recomendados para la limpieza (DOW 2009, p. 124)

Después de realizar el lavado se debe tener en cuenta que han quedado restos de compuesto químico en toda la instalación. Por ello es importante realizar el flushing y enviar el permeado y concentrado a drenaje antes de realizar el filtrado normal.

7.6. Válvulas

Además de la válvula de regulación de la recuperación se han incorporado otra serie de válvulas a la instalación. La descripción y la nomenclatura de las más habituales lo podemos ver en el **capítulo 9, manual de operación**. También hay otra serie de válvulas menos utilizadas y que describimos a continuación.

Cuando la planta piloto este funcionando en modo normal es necesario poder obtener muestras. Una vez tomadas las muestras se realiza un análisis para evaluar la composición química y establecer así el resultado del proceso. Para ello se han incorporado tres válvulas para tomar muestras y una válvula para realizar el vaciado del depósito T100 (Tabla 7.3).

Ítem	Descripción
TV100	Válvula de vaciado del deposito T100.
TV101	Válvula para tomar muestras del caudal de alimentación antes de entrar a las membranas.
TV200	Válvula para tomar muestras del concentrado.
TV300	Válvula para tomar muestras del permeado.

Tabla 7.3. Válvulas de toma de muestras de los diferentes caudales

Otro tipo de válvula necesaria son las válvulas de seguridad (Tabla 7.4). Estas válvulas se conectan en by-pass con el depósito. Mientras no se supere la presión de apertura de la válvula, ésta deja pasar el fluido en el sentido habitual. Sin embargo si se supera la presión de tarado la válvula se abre descargando el fluido en el depósito.

Ítem	Descripción
PSV100	Válvula de seguridad tarada a 41 bar. Colocada en el bypass de manera que si se excede la presión de tarado se descargue la tubería en el depósito T100. Protección de las membranas, de la instalación y del personal que la opera.
PSV200	Válvula de seguridad tarada a 6 bar y colocada en la impulsión de la bomba dosificadora. De manera que si en la línea de impulsión se excede la presión de tarado se descarga la tubería en el depósito de dosificante T200.

Tabla 7.4. Válvulas de seguridad

7.7. Gestión de las señales de los equipos e instrumentos

Para la gestión y control de los equipos e instrumentación se ha dotado a la planta piloto de una unidad de control. Así, se consigue una cierto nivel de automatización dentro de las posibilidades económicas.

La unidad de control actuará como un controlador lógico programable (PLC) en el cual se programará determinadas secuencias de proceso para poder gestionar el funcionamiento de la planta.

El PLC se ubicará en el cuadro eléctrico habilitado en la planta piloto. También se dispondrá en el cuadro de una pantalla táctil para la entrada y salida de datos. De esta manera el operario podrá modificar valores objetivos de la programación del PLC o extraer el registro de los diferentes sensores.

7.7.1. PLC

En total se trabaja con 10 señales analógicas que deben dar una señal de 4 – 20 mA al PLC, estas señales son: caudal, pH, presión y conductividad en la alimentación; caudal y conductividad en el permeado; caudal, pH, presión y conductividad en el concentrado. Además también podrá gobernar la puesta en marcha o el paro de la bomba de alta presión, de la bomba de baja presión y de la bomba dosificadora.

El PLC procesará y analizará las señales comparándolas con los valores objetivos programados (que podrán ser modificados). El resultado será una respuesta que enviará a determinados elementos para que modifiquen sus parámetros de funcionamiento de manera que se reduzca la diferencia entre la señal de entrada y su valor objetivo.

Funciones del PLC:

- Detectar funcionamientos anómalos (sobrepresión, exceso de temperatura,…) y señalizarlos con una alarma visual una vez alcanzado un valor fijado antes del valor límite. O realizar el paro de la instalación una vez alcanzado el valor límite.

- Detectar el funcionamiento de las bombas dosificadoras y de baja presión cuando la bomba de alta presión está en funcionamiento.

- Señalizar el ensuciamiento de las membranas mediante una alarma una vez alcanzados los valores prefijados.

7.8. Instrumentación

Para asegurar el correcto funcionamiento de la planta piloto en todos los modos de funcionamiento se requieren una serie de instrumentación de control. Los parámetros a controlar son los siguientes: pH, conductividad, temperatura, caudal y presión.

7.8.1. Depósito

Se ha instalado una sonda de temperatura (TIT101) para conocer la temperatura de la salmuera y de la disolución de limpieza. La sonda tiene señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA) para comunicarse con el PLC.

7.8.2. Filtro de cartucho

A la entrada y a la salida del filtro se ha instalado un manómetro diferencial para conocer la caída de presión. Con esta medida podemos saber el grado de colmatación, establecer la limpieza del filtro o la renovación del cartucho.

7.8.3. Aspiración bomba alta presión

En la aspiración de la bomba de alta presión se han colocado tres instrumentos: un conductímetros, un ph-metro y una sonda de temperatura.

El *conductímetros* (QIT102) mide la conductividad del caudal de alimentación de las membranas. Nos permite evaluar el rendimiento de la instalación. El instrumento envía una señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA) al PLC.

El ph-metro permite controlar que las membranas trabajen dentro del rango de pH durante el nanofiltrado y durante la limpieza química. También cuenta con señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA).

Finalmente la *sonda de temperatura* (TI101) nos informa de la temperatura del fluido justo a la entrada de la bomba P101. De esta manera se puede ajustar la temperatura con mucha más precisión.

7.8.4. Tramo de impulsión hasta la entrada de las membranas

En el tramo desde la salida de la bomba P101 hasta la entrada de las membranas se han instalado los siguientes instrumentos: un caudalímetro y un manómetro.

El *caudalímetro* (FIT103) tiene una función importante ya que es el encargado de comunicarse con el variador de frecuencia y ajustar las revoluciones de la bomba en función

del caudal deseado. También es útil para conocer el caudal a la salida de las bombas y realizar las regulaciones necesarias en las válvulas.

El manómetro (PIT104) nos indica la presión en la entrada de las membranas mediante una señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA) que envía al PLC.

7.8.5. Tramo permeado

En este tramo se han instalado los tres siguientes instrumentos: un conductímetro, una sonda de temperatura y un caudalímetro.

El *conductímetro* (QIT106) envía una señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA) al PLC y nos indica la conductividad del permeado. Es importante esta medida para conocer el rendimiento de la planta piloto, al comparar el valor del permeado con el de alimentación.

La *sonda de temperatura* (TI106) nos indica la temperatura del permeado a la salida de las membranas. Con esta medida podemos tener una idea más aproximada de la temperatura de las membranas.

Finalmente el *caudalímetro* (FIT106) nos indica el caudal de permeado. Este valor nos permite conocer el rendimiento de la planta. Envía una señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA) al PLC.

7.8.6. Tramo de concentrado

En el tramo de concentrado se instala la siguiente instrumentación: un caudalímetro, un pH-metro y un conductímetro.

El *caudalímetro* (FIT105) nos indica el caudal de concentrado y tiene las mismas características que su homologo instalado en el tramo de permeado.

El *pH-metro* (QIT206) nos permite conocer el pH del concentrado de manera que se puede comprobar si el pH está dentro del rango soportado por las membranas y si hay riesgo de precipitados (debido a la gran influencia del pH con la solubilidad). Envía una señal eléctrica (de 4 mA a 20 mA) al PLC.

El *conductímetro* (QIT105) envía una señal (de 4 mA a 20 mA) al PLC e indica la conductividad del concentrado. De esta manera también se puede evaluar el rendimiento del proceso.

7.9. Tuberías

7.9.1. Elección del diámetro

Debido a que las membranas ya tenían fijadas sus condiciones de trabajo, tanto en caudal como en presión, la única variable que quedaba por definir era la velocidad del fluido y a su vez el diámetro de la tubería. En un primer paso se fijó una velocidad y con el caudal establecido se obtuvo la sección.

La velocidad establecida fue de 1,5 m/s (DOW, 2009) ya que es la recomendada para evitar la formación del biofilm. Los diámetros se calcularon para cada tramo (aspiración, concentrado y permeado) según los caudales de diseño. Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 7.5.

Tramo	**Caudal (m^3/h)**	**Caudal (m^3/s)**	**Velocidad (m/s)**	**Diámetro (mm)**
Alimentación de las membranas	1,25	$3{,}47 \cdot 10^{-4}$	1,5	17,2
Concentrado	0,69	$1{,}62 \cdot 10^{-4}$		12,8
Permeado	0,56	$1{,}56 \cdot 10^{-4}$		11,5

Tabla 7.5. Diámetros de tuberías en cada sección para una velocidad fijada

Como podemos ver, los diámetros obtenidos no se alejan demasiado entre ellos y se podrían agrupar todos en un único diámetro para hacer una instalación sencilla. Sin embargo el principal inconveniente es el hecho de que son diámetros bastante reducidos debido al bajo caudal de salmuera con el que trabajará la instalación.

Además la mayoría de instrumentación está estandarizada a valores mayores. Lo que implicaría tener que utilizar muchos accesorios (reducciones y ampliaciones) y en consecuencia una mayor pérdida de carga, un sobrecoste y un incremento del tamaño de la instalación.

Por estos motivos se decidió elegir un diámetro de compromiso entre la estandarización de la instrumentación y entre la velocidad del fluido. De manera que finalmente se decidió utilizar como diámetro interno de tubería el de 1'' (DN 25).

7.9.2. Elección de los materiales

Para la elección de los materiales los principales factores a considerar fueron la presión de trabajo y la resistencia a la corrosión.

De esta manera, para los tramos de tubería que no van a tener una presión superior a los 16 bar se escogió como material el PVC. Este material tiene buenas propiedades mecánicas y de corrosión ante la salmuera y la disolución de limpieza. También es un material muy económico.

Los tramos de tubería, así como sus accesorios correspondientes (codos, te, etc) seleccionados con este material son los tramos de: aspiración de la bomba de baja presión; aspiración de la bomba de alta presión; tramo de permeado desde la salida de las membranas; tramo de concentrado a partir de la válvula de aguja reductora de presión; by-pass de seguridad; by-pass de regulación de la bomba P301; recirculación del concentrado y del permeado hasta el depósito.

El PVC también fue el material elegido para las tuberías de dosificación. Tanto para la aspiración de la bomba dosificadora como la impulsión hasta la instalación. El diámetro elegido en este caso es el mismo que necesita la bomba y es un tubo de diámetro interior de 5 mm y diámetro externo de 8 mm.

En el caso de los tramos de tubería con una presión superior a los 16 bar se eligió como material el acero inoxidable 316. Un acero resistente tanto a la presión como a la corrosión. Los tramos de tubería y sus accesorios seleccionados con este material fueron los siguientes: impulsión de la bomba de alta presión hasta las membranas; by-pass de la bomba de alta presión; tramo de concentrado que comunica las dos cajas de presión: tramo de concentrado de la segunda caja de presión hasta la válvula de aguja; retorno hasta el depósito desde la válvula de seguridad.

7.10. Esquema de la instalación

A partir de lo anteriormente comentado el esquema de la planta piloto es el que se muestra en la Figura 7.2.

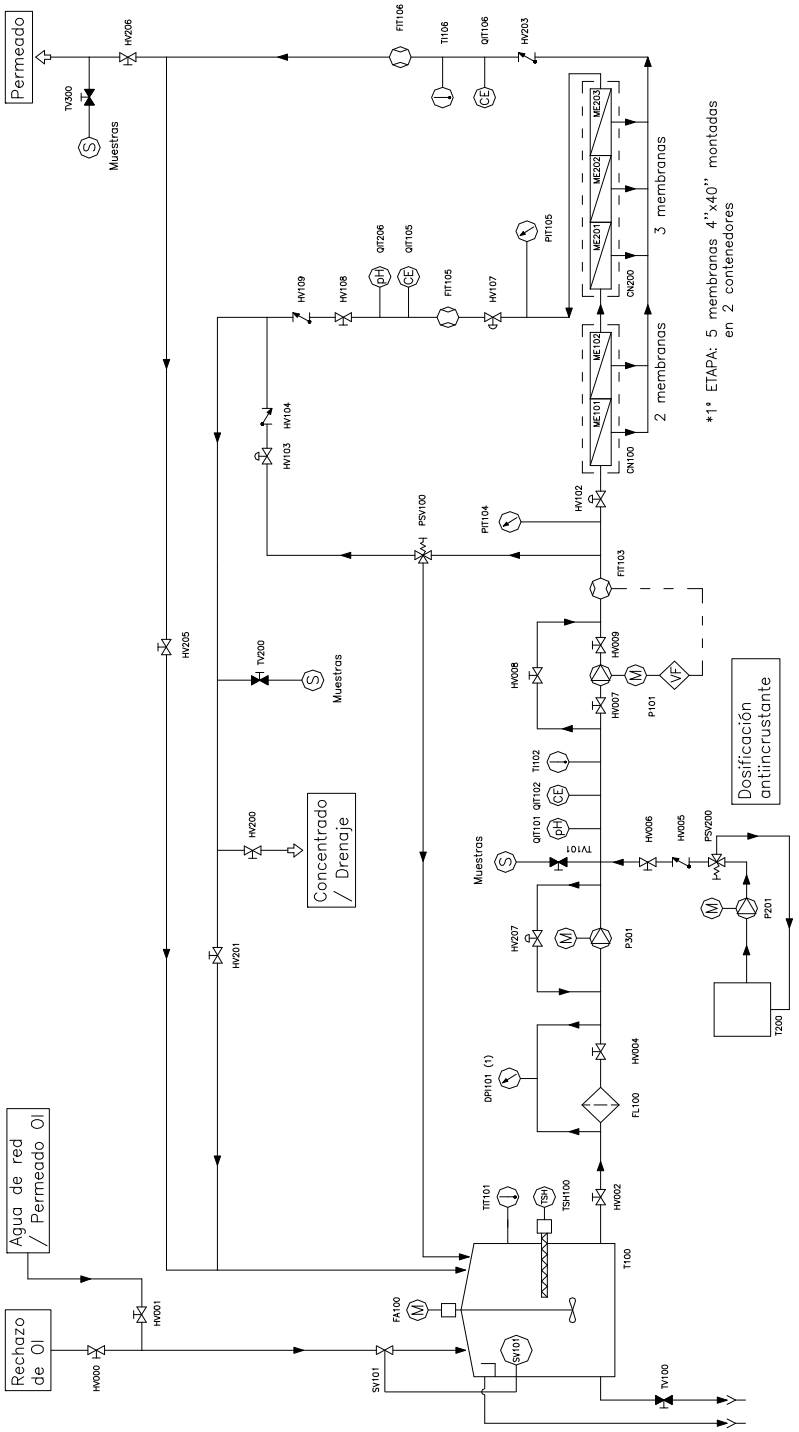


Figura 7.2. Esquema de la planta piloto

8. Simulación de la instalación

Una vez se habían establecido las características de la instalación (diámetro de las tuberías, elementos a instalar, espacio dónde ubicar la planta, etc.) se procedió a simular la instalación de la planta piloto con un software de diseño en tres dimensiones (*SolidEdge*).

Con esta simulación se pretende, en primer lugar, elegir una distribución óptima de los elementos. De manera que el operario que manipule la instalación pueda acceder fácilmente a las válvulas de mayor frecuencia de utilización, así como la correcta visualización de la instrumentación. También pretende ser una guía de cara al montaje e instalación de la planta piloto, ayudando a realizar la distribución y trazado de tuberías.

Finalmente, con esta propuesta de distribución de elementos y tuberías se pretende tener una idea aproximada de las características de la instalación. Definiendo aspectos como la longitud de cada tramo de tubería, la cantidad de accesorios necesarios (codos, tes, etc.), el diseño y medidas de la bancada, etc.

8.1. Espacio disponible para ubicar la instalación

El primer paso fue decidir el lugar para su futuro montaje. El espacio disponible es muy limitado por lo que la planta piloto se ubicará detrás del almacén (*A*). La zona a utilizar está sobre una losa de hormigón y el espacio libre son cinco metros cuadrados (Figura 8.1).

La simulación toma un papel decisivo en la construcción de la planta piloto debido al poco espacio disponible y a que se deben ubicar múltiples elementos en él.

Figura 8.1. Espacio para la ubicación de la planta piloto. *A*: almacén; *B*: depósito de rechazo

8.2. Simulación planta piloto en 3D

Finalmente la simulación realizada es la que podemos ver en la Figura 8.2. En el **Anexo 2, simulación de la instalación** se desarrolla con detalle todos los pasos y etapas realizadas, explicando tanto el diseño y distribución de elementos, como el diseño y función del bastidor. También se detalla la longitud estimada de tubería, accesorios y otras vistas en detalle de la instalación.

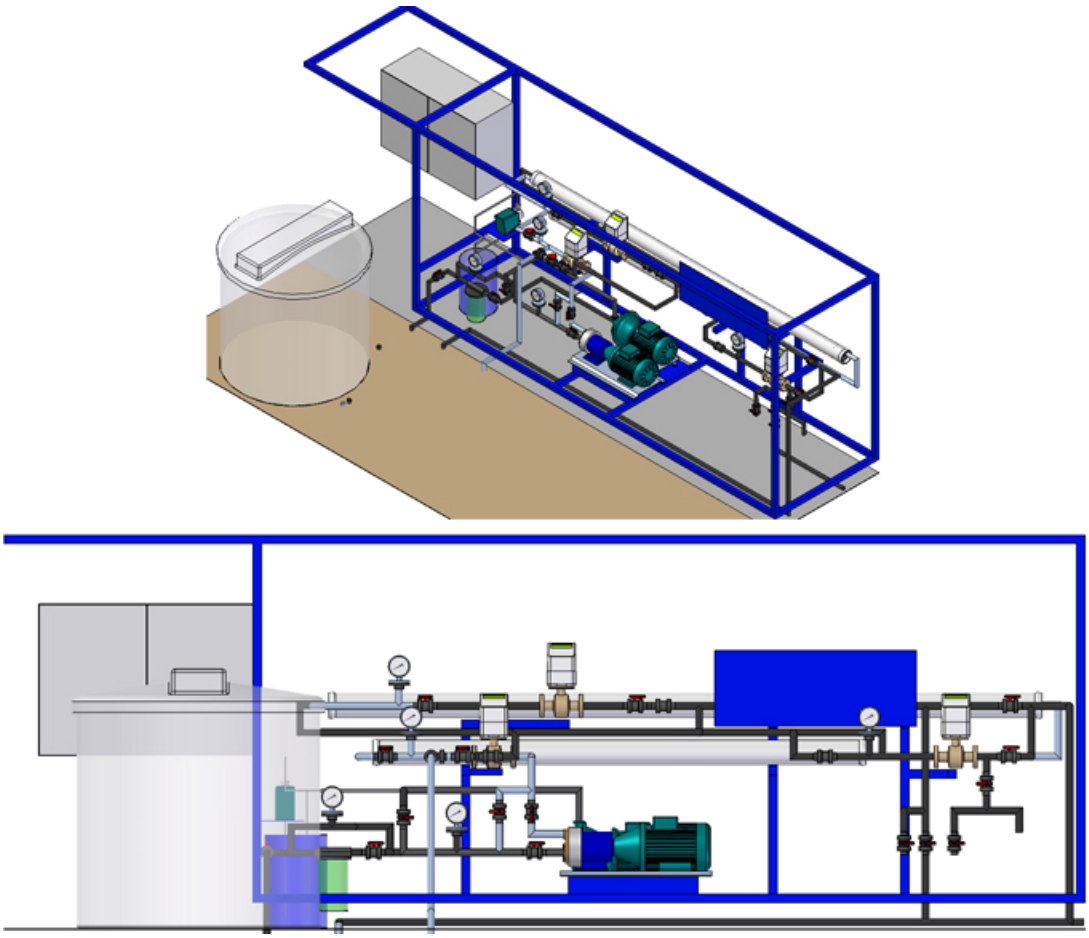


Figura 8.2. Simulación en 3D de la planta piloto

El resultado final de la simulación muestra una instalación muy compacta, que por una parte nos beneficia debido al poco espacio disponible y por otra nos ayuda a tener agrupadas las válvulas más utilizadas evitando movimientos innecesarios del operario. Las dimensiones aproximadas son de 5 m de longitud (incluyendo el armario eléctrico), 1,1 m de anchura y 1,7 m de altura.

8.3. Resumen de los datos de la simulación

A partir de la simulación pudimos concretar aspectos que nos permitirían realizar el estudio o el montaje de la instalación. Un resumen de estos valores son los recopilados en la Tabla 8.1 (se encuentran más detallados en **Anexo 2, simulación de la instalación**).

Tramo	**Características tubería**	**Longitud tubería (m)**	**Codos (ud)**	**Te (ud)**
Aspiración P301	PVC DN25	2,8	8	2
Aspiración P101	PVC DN25	2,3	4	3
Impulsión P101	Acero dúplex DN25	2,7	6	4
Retorno de seguridad	Acero dúplex DN25	3,5	6	0
Permeado	PVC DN25	5,9	10	4
Concentrado	PVC DN25	5,8	4	4
By-pass	PVC DN25	1,5	4	0
Entre cajas de presión	Acero dúplex DN25	1,2	4	1
Recirculación al depósito	PVC DN25	6,1	6	0
Dosificación antiincrustante	PVC ($Ø_i$ = 5mm, $Ø_e$=8 mm)	3,1	6	0

Tabla 8.1. Resumen de las principales características obtenidas a partir de la simulación

9. Manual de operación

Mediante este capítulo se pretende hacer un resumen del procedimiento de puesta en marcha de la instalación para cada modo de funcionamiento. Explicando las válvulas en las que se debe actuar (abrir o cerrar) y las bombas que se deben poner en marcha. Además de representar gráficamente el esquema de la planta piloto.

Este capítulo se encuentra más detallado en el **Anexo 4, manual de operación**. En el que se detalla la secuencia de apertura o cierre de válvulas, la duración de cada procedimiento, el caudal y presión de las bombas, la disolución de alimentación y las características de cada situación.

La instalación podrá trabajar en cuatro modos diferentes (Figura 9.1) según sean los requerimientos de la planta.

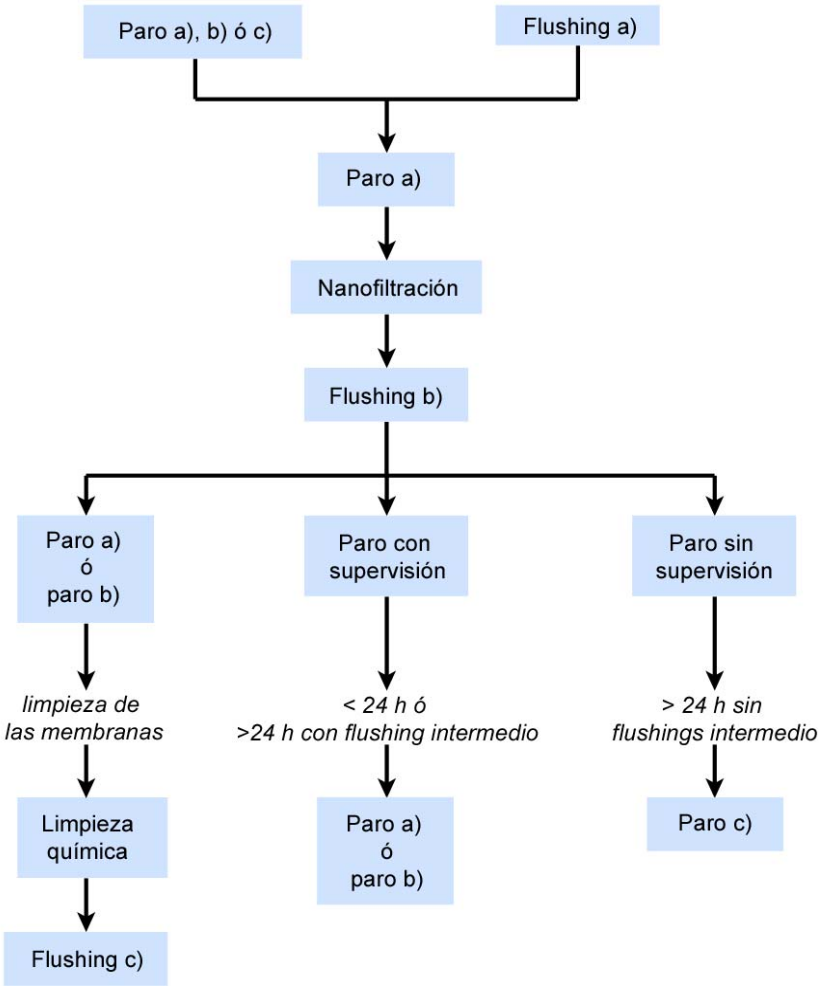


Figura 9.1. Secuencia del proceso

Los modos de funcionamiento posibles son los siguientes:

- **Modo I**: funcionamiento habitual en el que se hace pasar la salmuera por las membranas de nanofiltración.

- **Modo II**: flushing con permeado de OI o agua de red. Puede ser diferente según las necesidades:

Modo II a): Este modo se utiliza cuando se ha finalizado el montaje de la instalación y se procede a la primera puesta en marcha de la instalación. En ella se debe eliminar el aire que contienen las membranas y tuberías para no someter a esfuerzos excesivos a la instalación.

Modo II b): Este es el modo utilizado para eliminar la alta concentración de sales en las membranas preparándolas para un paro. De esta manera evitamos el riesgo de corrosión y de ósmosis natural debido a la salmuera parada en la instalación y en las membranas.

Modo II c): Al finalizar la limpieza química de la instalación quedan restos de la disolución en la misma. Por lo que aplicando este modo de funcionamiento conseguimos drenar y eliminar la disolución de limpieza. Así aseguramos que durante el siguiente proceso (modo I) la producción de permeado tenga unas concentraciones constantes.

- **Modo III**: limpieza química de la instalación y de las membranas una vez se ha detectado su ensuciamiento.

- **Modo IV**: paro de la instalación, que puede ser diferente en función de las necesidades del mismo:

Modo IV a): Es la manera de proceder en el caso de realizar paro inferior a 24 horas. En este caso la instalación puede permanecer en reposo con agua osmotizada en su interior.

Modo IV b): Cuando se tenga que realizar un paro entre 24 – 48 horas con presencia de personal en la planta piloto se debe procede según este modo. Al pasar más de 24 horas hay problemas de crecimiento biológico y se deben realizar flushings diarios para evitarlo.

Modo IV c): Es el procedimiento en el caso de un paro de 24 horas sin supervisión.

9.1. Modo I: nanofiltrado de salmuera

El estado de las válvulas durante los modos precedentes y de funcionamiento son los siguientes:

		Estado previo	Estado final
Ítem	**Descripción**	**Modo IV**	
HV000	Válvula de alimentación de salmuera.	Cerrada	Abierta
HV001	Válvula de alimentación de agua de red o permeado de OI.	Cerrada	Cerrada
HV002	Válvula de alimentación general de la planta.	Cerrada	Abierta
HV004	Válvula de aislamiento del filtro.	Abierta	Abierta
HV207	Válvula de aguja para la regulación de caudal de la bomba P301.	Cerrada	Regulada
HV006	Válvula de alimentación de antiincrustante.	Cerrada	Abierta
HV007	Válvula de aislamiento de la aspiración de la bomba P101.	Cerrada	Abierta
HV008	Válvula en el by-pass de la bomba P101.	Abierta	Cerrada
HV009	Válvula de aislamiento de la impulsión de la bomba P101.	Cerrada	Abierta
HV102	Válvula de aguja para la alimentación de las membranas. Regulación lineal.	Cerrada	Regulada
HV103	Válvula de aguja reductora de presión en el by-pass.	Cerrada	Cerrada
HV107	Válvula de aguja reguladora de la conversión. Regulación lineal y reductora de presión.	Cerrada	Regulada
HV108	Válvula de alimentación de concentrado a drenaje o recirculación.	Abierta	Abierta
HV200	Válvula de drenaje del concentrado.	Cerrada	Abierta
HV201	Válvula de recirculación del concentrado hasta el depósito.	Abierta	Cerrada
HV205	Válvula de recirculación del permeado hacia el depósito.	Cerrada	Cerrada
HV206	Válvula de salida del permeado.	Cerrada	Abierta
Bombas			
P101	Bomba de alta presión.	Off	On
P201	Bomba dosificadora de antiincrustante.	Off	On
P301	Bomba de baja presión.	Off	On

Tabla 9.1. Estado de las válvulas antes y durante el modo I

Diagrama de proceso durante el funcionamiento del modo I (ver **Anexo 6.3**):

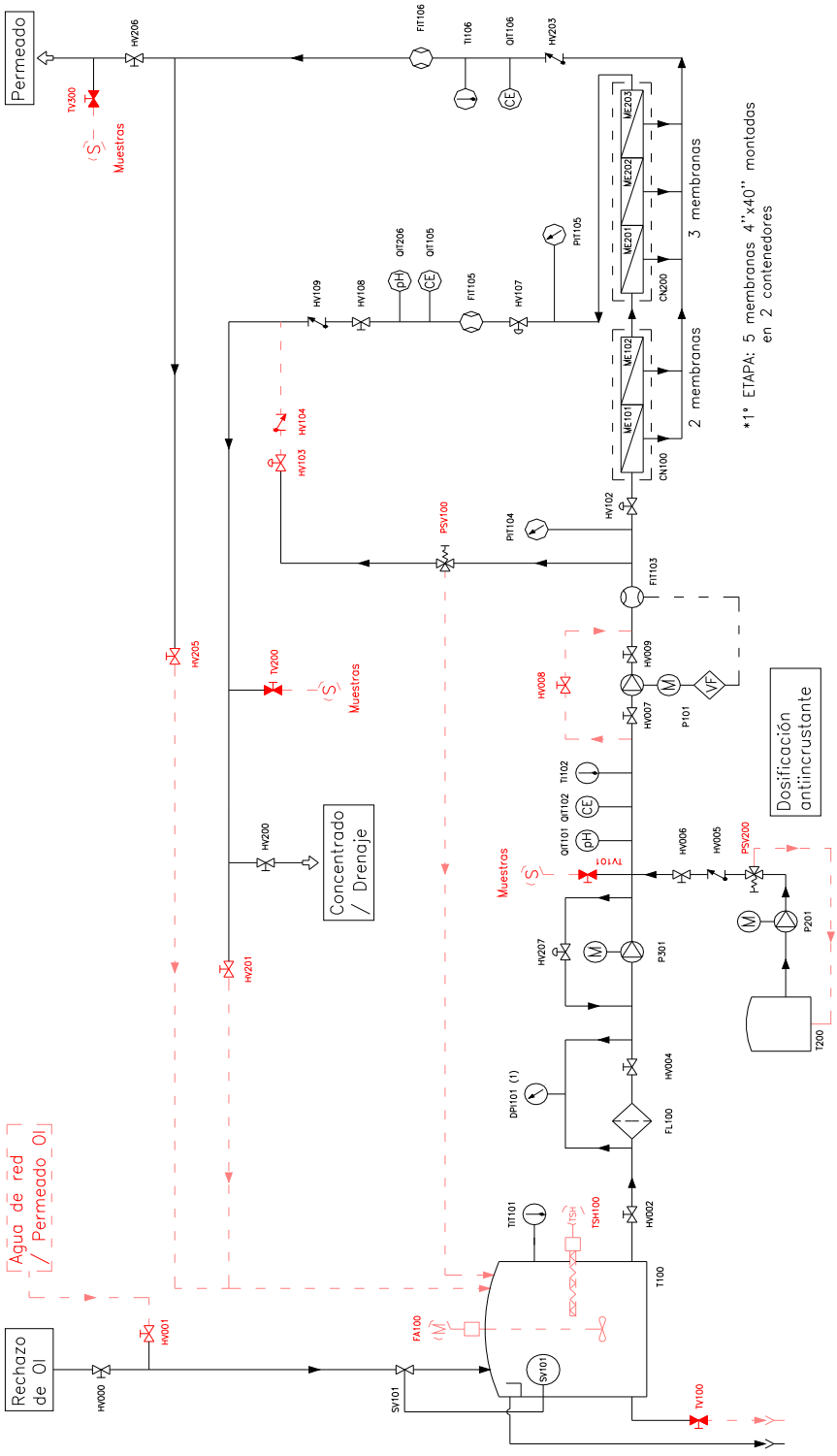


Figura 9.2. Esquema del modo I (en línea continua ON y en discontinua OFF)

9.2. Modo II: flushing

		Estado previo			Estado final
Item	**Descripción**	**Modo I**	**Modo III**	**Todas cerradas**	
HV000	Válvula de alimentación de salmuera.	Abierta	Cerrada	Cerrada	Cerrada
HV001	Válvula de alimentación de agua de red o permeado de OI.	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Abierta
HV002	Válvula de alimentación general de la planta.	Abierta	Abierta	Cerrada	Abierta
HV004	Válvula de aislamiento del filtro.	Abierta	Abierta	Cerrada	Abierta
HV207	Válvula de aguja para la regulación de caudal de la bomba P301.	Regulada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
HV006	Válvula de alimentación de antiincrustante.	Abierta	Cerrada	Cerrada	Cerrada
HV007	Válvula aislamiento de aspiración de P101.	Abierta	Cerrada	Cerrada	Cerrada
HV008	Válvula en el by-pass de la bomba P101.	Cerrada	Abierta	Cerrada	Abierta
HV009	Válvula aislamiento de impulsión de P101.	Abierta	Cerrada	Cerrada	Cerrada
HV102	Válvula de aguja para la alimentación de las membranas.	Regulada	Abierta	Cerrada	Abierta
HV103	Válvula de aguja de regulación lineal y reductora de presión en el by-pass.	Cerrada	Cerrada	Cerrada	Cerrada
HV107	Válvula de aguja reguladora de la producción de concentrado.	Regulada	Regulada	Cerrada	Abierta
HV108	Válvula de alimentación de concentrado a drenaje o recirculación.	Abierta	Abierta	Cerrada	Abierta
HV200	Válvula para el drenaje del concentrado.	Abierta	Cerrada	Cerrada	Abierta
HV201	Válvula para la recirculación del concentrado hasta el depósito.	Cerrada	Abierta	Cerrada	Cerrada
HV205	Válvula para la recirculación del permeado.	Cerrada	Abierta	Cerrada	Cerrada
HV206	Válvula de salida del permeado.	Abierta	Cerrada	Cerrada	Abierta
Bombas					
P101	Bomba de alta presión.	On	Off	Off	Off
P201	Bomba dosificadora de antiincrustante.	On	Off	Off	Off
P301	Bomba de baja presión.	On	On	Off	On

Tabla 9.2. Estado de las válvulas antes y durante el modo II

Diagrama de proceso durante el funcionamiento del modo II (ver **Anexo 6.3**):

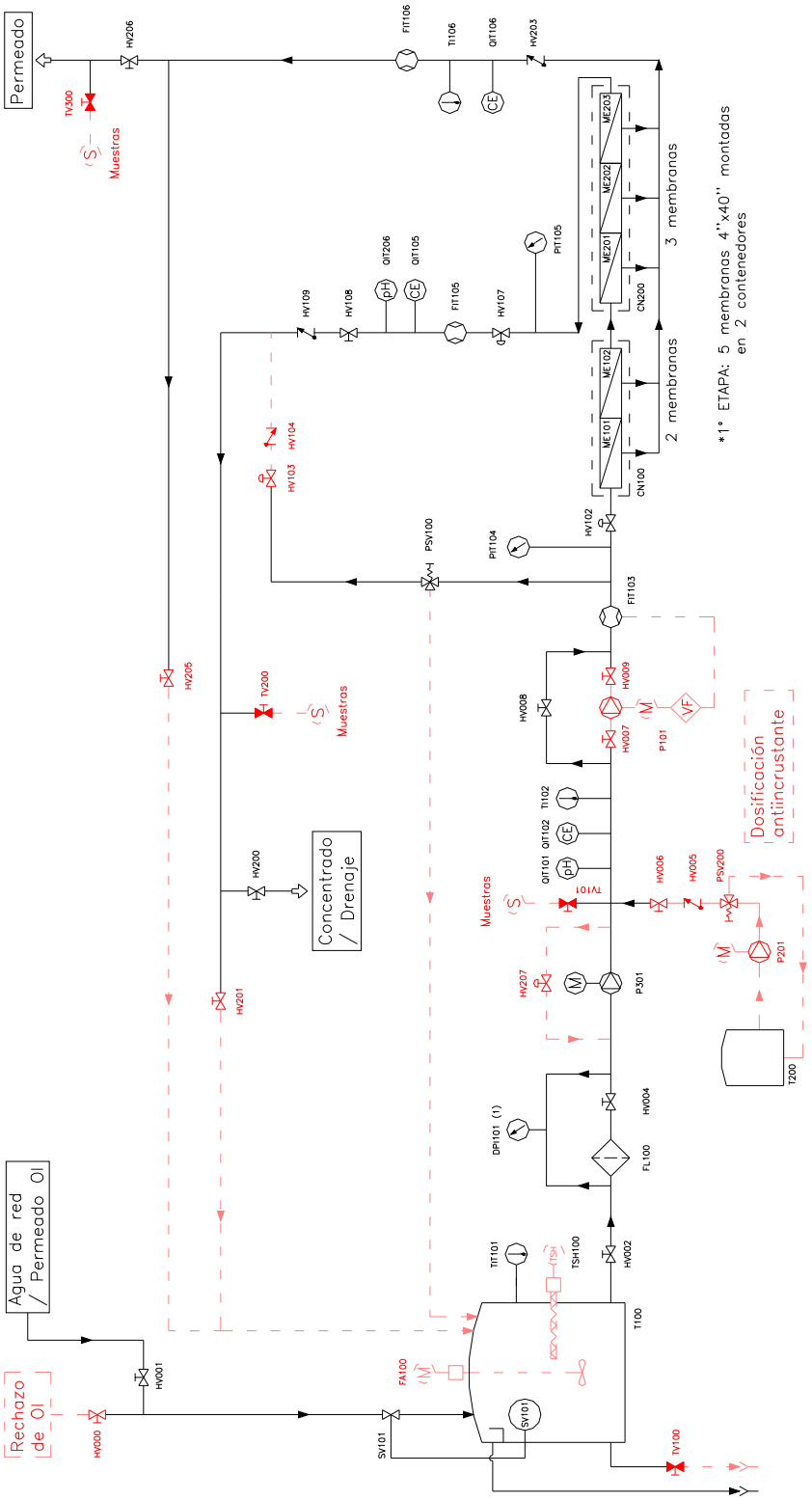


Figura 9.3. Esquema del modo II (en línea continua ON y en discontinua OFF)

9.3. Modo III: limpieza química

		Estado previo	Estado final
Ítem	**Descripción**	**Modo IV**	
HV000	Válvula de alimentación de salmuera.	Cerrada	Cerrada
HV001	Válvula de alimentación de agua de red o permeado de OI.	Cerrada	Cerrada
HV002	Válvula de alimentación general de la planta.	Cerrada	Abierta
HV004	Válvula de aislamiento del filtro.	Abierta	Abierta
HV207	Válvula de aguja para la regulación de caudal de la bomba P301.	Cerrada	Cerrada
HV006	Válvula de alimentación de antiincrustante.	Cerrada	Cerrada
HV007	Válvula de aislamiento de la aspiración de la bomba P101.	Cerrada	Cerrada
HV008	Válvula en el by-pass de la bomba P101.	Abierta	Abierta
HV009	Válvula de aislamiento de la impulsión de la bomba P101.	Cerrada	Cerrada
HV102	Válvula de aguja para la alimentación de las membranas. Regulación lineal.	Cerrada	Abierta
HV103	Válvula de aguja reductora de presión en el by-pass.	Cerrada	Cerrada
HV107	Válvula de aguja reguladora de la conversión. Regulación lineal y reductora de presión.	Cerrada	Regulada
HV108	Válvula de alimentación de concentrado a drenaje o recirculación.	Abierta	Abierta
HV200	Válvula de drenaje del concentrado.	Cerrada	Cerrada
HV201	Válvula de recirculación del concentrado hasta el depósito.	Abierta	Abierta
HV205	Válvula de recirculación del permeado hacia el depósito.	Cerrada	Abierta
HV206	Válvula de salida del permeado.	Cerrada	Cerrada
Bombas			
P101	Bomba de alta presión.	Off	Off
P201	Bomba dosificadora de antiincrustante.	Off	Off
P301	Bomba de baja presión.	Off	On

Tabla 9.3. Estado de las válvulas antes y durante el modo III

Diagrama de proceso durante el funcionamiento del modo III (ver **Anexo 6.3**):

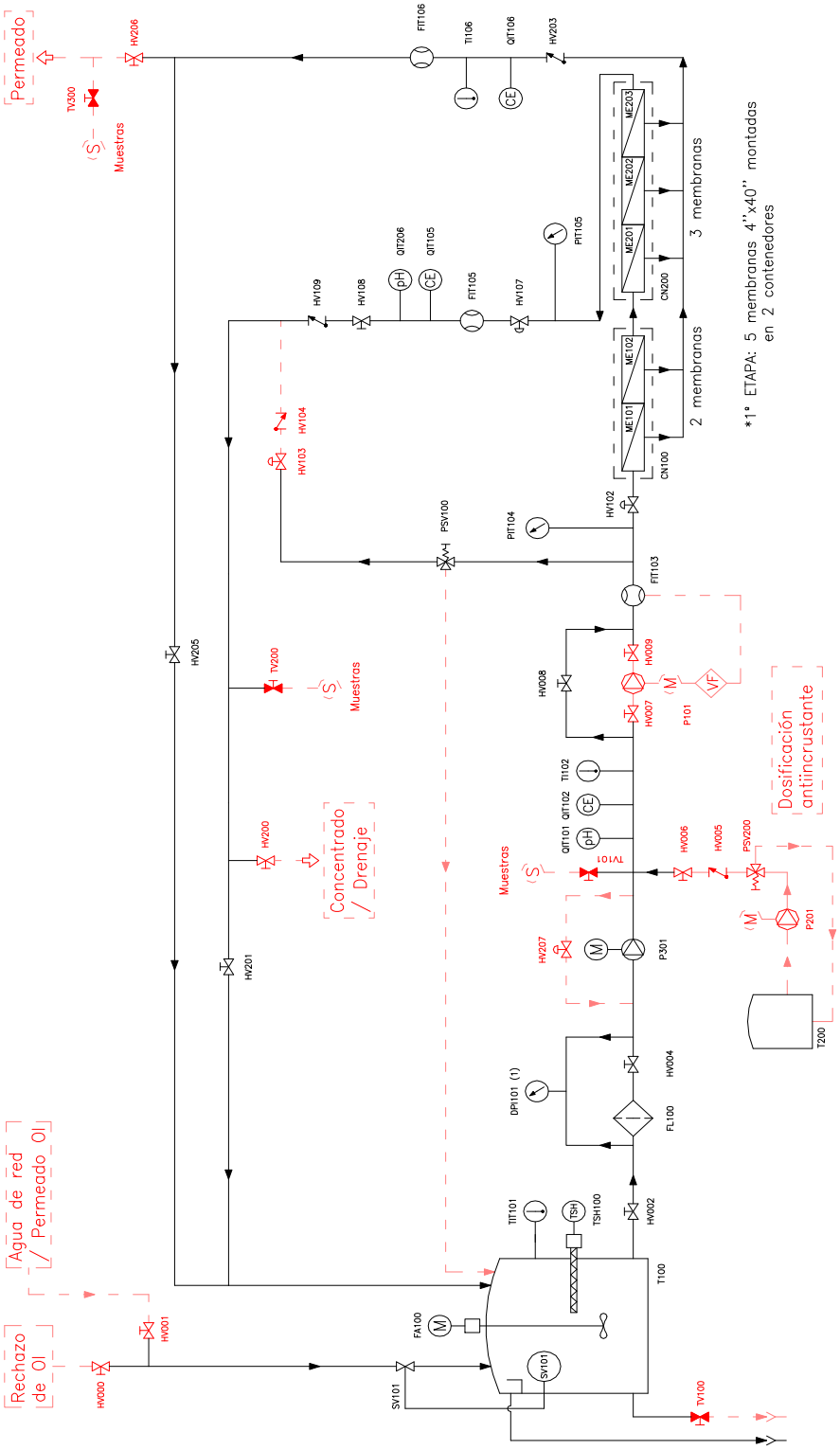


Figura 9.4. Esquema del modo III (en línea continua ON y en discontinua OFF)

9.4. Modo IV: paro de la instalación

		Estado previo	Estado final
Ítem	**Descripción**	**Modo II**	
HV000	Válvula de alimentación de salmuera.	Cerrada	Cerrada
HV001	Válvula de alimentación de agua de red o permeado de OI.	Abierta	Cerrada
HV002	Válvula de alimentación general de la planta.	Abierta	Cerrada
HV004	Válvula de aislamiento del filtro.	Abierta	Abierta
HV207	Válvula de aguja para la regulación de caudal de la bomba P301.	Cerrada	Cerrada
HV006	Válvula de alimentación de antiincrustante.	Cerrada	Cerrada
HV007	Válvula de aislamiento de la aspiración de la bomba P101.	Cerrada	Cerrada
HV008	Válvula en el by-pass de la bomba P101.	Abierta	Abierta
HV009	Válvula de aislamiento de la impulsión de la bomba P101.	Cerrada	Cerrada
HV102	Válvula de aguja para la alimentación de las membranas. Regulación lineal.	Abierta	Cerrada
HV103	Válvula de aguja reductora de presión en el by-pass.	Cerrada	Cerrada
HV107	Válvula de aguja reguladora de la conversión. Regulación lineal y reductora de presión.	Abierta	Cerrada
HV108	Válvula de alimentación de concentrado a drenaje o recirculación.	Abierta	Abierta
HV200	Válvula de drenaje del concentrado.	Abierta	Cerrada
HV201	Válvula de recirculación del concentrado hasta el depósito.	Cerrada	Abierta
HV205	Válvula de recirculación del permeado hacia el depósito.	Cerrada	Cerrada
HV206	Válvula de salida del permeado.	Abierta	Cerrada
Bombas			
P101	Bomba de alta presión.	Off	Off
P201	Bomba dosificadora de antiincrustante.	Off	Off
P301	Bomba de baja presión.	On	Off

Tabla 9.4. Estado de las válvulas antes y durante el modo IV

Diagrama de proceso durante el funcionamiento del modo IV (ver **Anexo 6.3**):

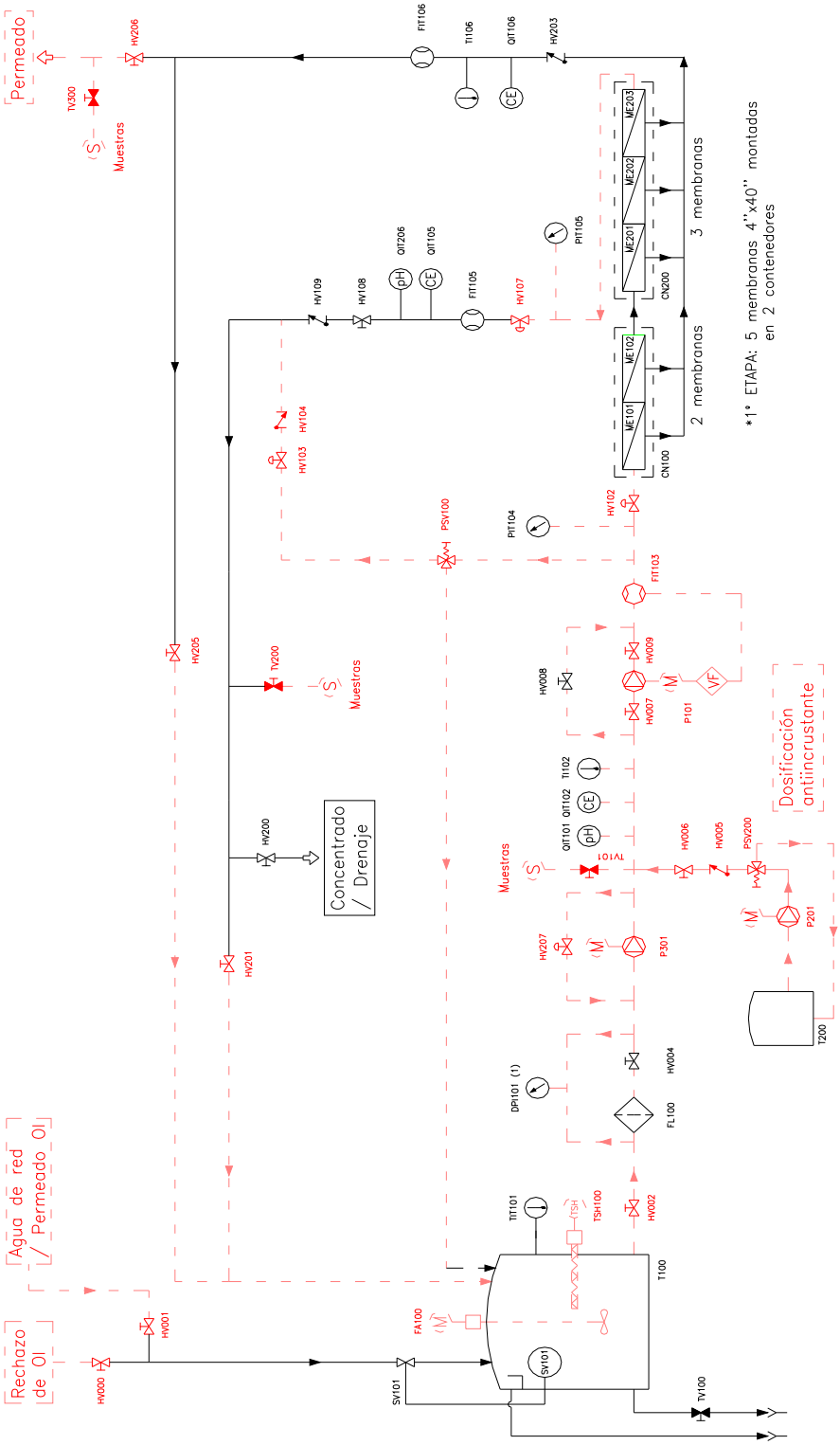


Figura 9.5. Esquema del modo IV (en línea continua ON y en discontinua OFF)

9.5. Alarmas

Para garantizar la seguridad de la instalación, detectar el ensuciamiento de las membranas o no sobrepasar ciertos parámetros se han configurado una serie de alarmas en el PLC. Aprovechando las señales de los equipos (bombas) y de la instrumentación se ha programado en el autómata, siguiendo el manual de operación, una serie de valores de alarma y de paro. Si se supera el valor de alarma, se visualizará una indicación en el PLC conforme hay algún parámetro fuera de los límites. En cambio si lo hace el valor de paro, el PLC actuará en los equipos parando la instalación. Además el operario puede introducir o modificar el valor de alarma o el de paro según sea necesario durante el proceso.

En este capítulo mostramos un resumen y la filosofía de la configuración de las alarmas (Tabla 9.5). Sin embargo en el **Anexo 4.5, alarmas** se detalla la secuencia de las alarmas según el procedimiento de cada modo detallado en **Anexo 4, manual de operación**.

Finalidad	**Característica a detectar**
Proteger a las membranas	Temperatura máxima admitida por la membrana
	Presión máxima admitida por la membrana
	Caudal máximo admitido por la membrana
Determinar la limpieza química de las membranas	Diferencia de presión entre el caudal de alimentación y el de concentrado
	Conductividad de permeado
	Caudal de permeado
Evitar el fouling	pH
	Bomba dosificadora P201 encendida cuando también lo esté la bomba de alta presión P101
Proteger a la bomba de alta presión P101	Bomba de baja presión P301 encendida cuando también lo esté la bomba de alta presión P101

Tabla 9.5. Características asociadas a una alarma y paro

Sin embargo las alarmas no pueden estar siempre activas ya que hay casos, como en los transitorios o en ciertos modos, en los que no son necesarias. Por este motivo la activación o desactivación del funcionamiento de la alarma está asociada (Tabla 9.6) a la puesta en marcha o paro de un equipo (en este caso una bomba).

Equipo	Alarma relacionada
Bomba de alta presión P101	Determinar la limpieza química de las membranas
	Bomba dosificadora P201 encendida cuando también lo este la bomba de alta presión P101
Bomba de baja presión P301	Protección de las membranas
	pH

Tabla 9.6. Asociación de alarmas con la activación o desactivación de equipos

10. Impacto medioambiental

10.1. Introducción

Según el Real Decreto – Ley 6/2011 del 8 de Mayo, modificación del RD 1302/1986 las instalaciones de desalación de agua con un volumen nuevo o adicional superior a 3.000 m^3/día deben someterse a una evaluación de impacto ambiental (Sadhwani, 2004). Sin embargo la planta piloto con un volumen de salmuera a tratar de 1,25 m^3/h y una producción de permeado de 0,5 m^3/h sólo produce 12 m^3/día de permeado. Por lo que el estudio de impacto ambiental no es necesario, sin embargo vamos a describir los efectos y transferencia de contaminantes debidos a la actividad.

En la instalación intervienen los siguientes factores susceptibles de causar un efecto negativo y perjudicial de forma directa o indirecta sobre el medio ambiente:

- La aportación de energía necesaria para el proceso.
- El vertido del rechazo concentrado en sales.
- Otros vertidos producidos durante la operación o limpieza (antiincrustante, disolución de limpieza y disolución de conservación de las membranas).
- Contaminación acústica.
- Desmantelamiento.

10.2. Problemática medioambiental de cada factor

10.2.1. Consumo de energía

Para el funcionamiento de los equipos de potencia, instrumentación y equipo de gobierno es necesaria la aportación de energía eléctrica. La relación de equipos y su potencia es la siguiente:

Elemento	Potencia (W)
Bomba de alta presión P101	3.000
Bomba dosificadora P201	17
Bomba de baja presión P301	2.200
Resistencia de caldeo	2.500
Agitador	370
Instrumentación y PLC	1.000

Tabla 10.1. Listado de equipos y su potencia eléctrica

El consumo de la planta piloto viene determinado por el consumo específico. Éste nos determina la cantidad de energía eléctrica consumida por metro cúbico de agua producida, kWh/m^3.

Una planta desaladora de gran capacidad tiene un consumo específico de alrededor de 4 kWh/m^3. Para nuestra planta piloto se estima un consumo de 3,6 kWh/m^3 obtenido en la simulación de la instalación. Es un valor orientativo y algo alto, pero se debe tener en cuenta que no incorpora elementos de recuperación de energía tal y como lo hacen las grandes instalaciones de ósmosis inversa.

Teniendo en cuenta que la producción de permeado es de 0,5 m^3/h, el consumo anual de energía es de:

$$3{,}6\ \text{kWh}/\text{m}^3 \cdot \frac{0{,}5\ \text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{365\ \text{días}}{\text{año}} \cdot \frac{24\ \text{h}}{\text{día}} = 15.768\ \text{kWh}/\text{año}$$

Considerando que la energía eléctrica producida en España proviene en la mayor parte de centrales térmicas con una emisión de CO_2 de 0,402 kg por kWh las emisiones anuales debido al consumo de la planta son de:

$$15.768\ \text{kWh/año} \cdot \frac{0{,}402\ \text{kg}\ CO_2}{\text{kWh}} = 6.338{,}7\ \text{kg}\,CO_2\,\text{/año}$$

10.2.2. Vertidos de salmuera de rechazo concentrada en sal

El rechazo producido por la planta piloto es una disolución concentrada en iones divalentes. La salinidad del vertido dependerá del rendimiento de las membranas de nanofiltración ante el filtrado de salmuera. El vertido del mismo se realiza en primer lugar en un depósito pulmón y finalmente al mar con un caudal aproximado es de 0,75 m^3/h.

El vertido de salmuera puede causar un problema medioambiental en los organismos marinos ya que su distribución está relacionada con la temperatura y salinidad. Incluso hay afecciones sobre la flora marina existente en las zonas costeras.

Sin embargo la producción de la planta piloto no alcanza los 18 m^3/día. Lo que resulta insignificante comparada con las grandes plantas desaladoras (entre 3.000 m^3/h y 10.000 m^3/h). El hecho de que el caudal de rechazo sea muy reducido hace que no sean comparables los escenarios. Por lo que la influencia de la actividad sobre el medio marino puede resultar inapreciable.

Algunas de las medidas aplicadas hoy en día para mitigar el efecto de la salmuera son: estudios ambientales para determinar la fauna y flora que se puede ver afectada; vertido con emisarios o cambio de ubicación si la zona del vertido es sensible; dilución previa con agua de mar, agua residual, etc.; inyección o vertido en zonas turbulentas para garantizar la correcta disolución.

10.2.3. Otros vertidos

La planta piloto utilizará una serie de productos químicos durante el funcionamiento habitual (antiincrustantes) y durante los períodos especiales (disolución de limpieza y disolución de conservación de las membranas). Estos vertidos constituyen un aporte muy concentrado en sólidos en suspensión y compuestos químicos.

Relación del impacto medioambiental de algunos componentes:

Compuesto	Origen	Impacto
Metales pesado	Corrosión de la instalación	Acumulación en el sistema
Fosfatos	Antiincrustantes	Macronutriente, eutrofización
Cl^-	Antifouling	Formación de compuestos halogenados, carcinógenos y mutágenos
Sulfuro de sodio	Anticorrosivo	Desconocido
Ácido sulfúrico	Antiincrustante / limpieza de las membranas	En grandes cantidades altera el pH del sistema
Residuos sólidos	Limpieza de las membranas	Turbidez
Salmuera	Proceso habitual	Variable
Temperatura	Limpieza de las membranas	Variable

Tabla 10.2. Listado de los posibles vertidos y sus efectos en el medioambiente (Sadhwani, 2004)

10.2.4. Ruido

La planta piloto dispone de una serie de equipos de potencia y otras fuentes de ruido. Sin embargo la planta piloto no esta situada en un recinto cerrado y no se estima que ninguna de las fuentes emisoras supere los 90 dB.

10.2.5. Desmantelamiento

En la construcción de la planta piloto se han utilizado muchos componentes de distintos materiales. Una vez llegue el periodo de desmantelación, una planta especializada en el tratamiento de residuos deberá hacerse cargo de algunos de ellos y reciclar los que se puedan.

Algunos de los elementos a reciclar pueden ser: la estructura o las tuberías y accesorios de PVC y de acero. Mientras que los elementos a tratar por un gestor de residuos y separar materiales pueden ser: la instrumentación, bombas y motores, cuadro eléctrico, autómata y cableado eléctrico.

11. Fase constructiva

La realización del presente proyecto y el desarrollo de la planta piloto han estado íntimamente ligados. La compra o el pedido de los equipos y materiales con periodos de entrega más largos, fueron algunas de las tareas que se realizaban a la vez.

La planta piloto se empezó a construir a principios de febrero del 2010. En las Figuras 11.1 y 11.2 podemos observar la estructura en acero inoxidable, los caudalímetros, las cajas de presión y las bombas de baja/alta presión. Además podemos comprobar el inicio del trazado de la tubería en PVC.

Figura 11.1. Vistas generales

Figura 11.2. Detalle unión tramo permeado y concentrado; detalle tomas de muestra

Durante la fase constructiva se realizaron cambios y modificaciones. Como la sustitución de parte de las tuberías de acero dúplex por mangueras (Figura 11.3) resistentes a la alta presión y a la corrosión.

Figura 11.3. Manguera en sustitución de la tubería de acero dúplex

En la Figura 11.4 podemos ver la bomba de baja presión sujetada a la estructura gracias a las patas de soporte. Mientras que la bomba de alta presión incorpora su propia bancada que a la vez se sujeta a la estructura.

En la Figura 11.5 se puede ver en detalle el sistema de sujeción de la caja de presión a la estructura. El sistema se basa en una brida elástica que se une en una cuña inferior impidiendo el movimiento de la caja de presión.

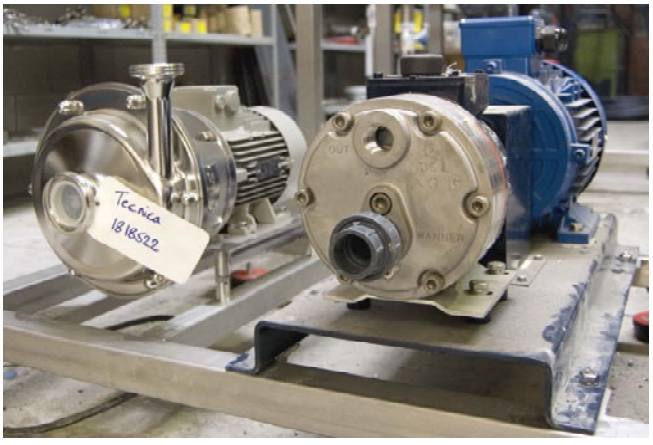


Figura 11.4. Bomba de baja y alta presión, detalle sujeción

Figura 11.5. Detalle brida sujeción

12. Presupuesto

A continuación se resume las partidas más importantes del presupuesto así como el coste total final y una simulación de un presupuesto a un cliente simulando una empresa de ingeniería (horas de ingeniería y otros costes).

El presupuesto más detallado se puede encontrar en el **Anexo 5, presupuesto**. En él se detallan los costes materiales (equipos, instrumentación, válvulas, tuberías, bastidor e instalación eléctrica), de ejecución (programar PLC, cablear equipos, trazar tuberías y montaje).

12.1. Costes inversión material y de ejecución

Coste total inversión material	
Descripción	**Precio total (€)**
Equipos de la instalación	11.703,20
Equipos de nanofiltración	663,00
Instrumentación	6.454,90
Accesorios instalación	2.314,00
Válvulas y accesorios	1.698,24
Bastidor	424,00
Instalación eléctrica	5.467,00
TOTAL	**28.724,34**
Coste total de ejecución	
Programación del PLC	2.451,00
Cableado de equipos, instrumentos y accesorios	783,00
Trazado de tuberías	1.755,00
Montaje de la estructura	1.255,50
TOTAL	**6.244,50**

Tabla 12.1. Coste inversión material y ejecución

12.2. Coste total de la inversión

Coste total de la inversión	
Descripción	**Precio total (€)**
Coste total de la inversión material	28.724,34
Coste total de la ejecución	6.244,50
TOTAL	34.968,84
IVA (16%)	5.595,01
TOTAL IVA	**40.563,86**

Tabla 12.2. Presupuesto total de la inversión

12.3. Presupuesto de diseño de la instalación

En este capítulo se trata de aproximar el coste que tendría el diseño y construcción de la planta piloto en el mercado. Para ello nos hemos planteado el problema como una empresa del sector la cual ha de realizar el diseño de la instalación, elección de los componentes, construcción, montaje y puesta en marcha. Para realizar este nuevo presupuesto además de las partidas anteriormente comentadas hay que considerar las siguientes:

- Estudio preeliminar y diseño de la instalación.
- Membranas.

12.3.1. Coste del estudio y diseño de la instalación

En la siguiente partida se ha considerado la dedicación de un ingeniero para el diseño de la instalación. De manera que se ha hecho una estimación de su sueldo, los costes de las diferentes licencias necesarias, así como de las horas dedicadas para llevar a cabo el proyecto (Tabla 12.3).

Los aspectos de diseño atribuibles al ingeniero son los siguientes: prediseño y cálculo manual de la instalación; diseño final mediante software especializado (*ROSA*); elección de las bombas; cálculo y comprobación del funcionamiento (cavitación y regulación) de las bombas; elección de la instrumentación (caudalímetro, ph-metros, etc.); diseño final del diagrama de proceso; diseño del lay-out de la planta piloto (trazado de tuberías, ubicación de componentes, etc) mediante software 3D (*SolidEdge*); diseño del bastidor; manual de operación y alarmas; y presupuesto.

Para el tiempo de dedicación se ha considerado el tiempo invertido para la redacción y creación de este PFC. En el cual, se han considerado una dedicación diaria de 5 horas durante aproximadamente 5 meses, lo que nos da aproximadamente 590 horas.

Descripción	**Unidades**	**Precio Unitario**	**Precio total (€)**
Estudio y diseño de la instalación: - Prediseño manual de la instalación - Diseño de la instalación mediante el software ROSA	590 h	21,5 €/h	12.685,00
Elección de los equipos (bombas e instrumentación) necesarios			
Comprobación del funcionamiento de los equipos: - Cavitación de las bombas - Regulación del caudal y de la presión de las bombas			
Diseño final del diagrama de proceso			
Diseño del lay-out de la planta en 2D			
Simulación de la planta piloto en 3D			
Manual de operación y alarmas			
Otros ítems:			
- Licencia del software Autocad	1 ud	2.500,00 €/ud	2.500,00
- Licencia del software SolidEdge	1 ud	12.000,00 €/ud	12.000,00
- Viaje y visita a la planta de el Prat del Llobregat	4 h	21,5 €/h	86,00
		TOTAL	27.271,00

Tabla 12.3. Presupuesto de ingeniería, estudio y diseño de la instalación

12.3.2. Coste de las membranas

En nuestro caso las membranas eran gratuitas debido al acuerdo con el fabricante de las mismas. Sin embargo para un cliente que pida presupuesto se le han de contabilizar la partida de membranas (Tabla 12.4).

Descripción	Ítem	Unidades	Precio Unitario (€/ud)	Precio total (€)
Membranas *Dow FILMTEC NF270*.	ME: 101, 102, 201, 202 y 203	5	330,93	1.654,65
			TOTAL	**1.654,65**

Tabla 12.4. Presupuesto de las membranas

12.3.3. Presupuesto total

Por lo tanto el presupuesto final es la suma del presupuesto material, del presupuesto de ejecución, del presupuesto de membranas y del presupuesto de estudio y diseño de la instalación (Tabla 12.5).

Coste total de la inversión	
Descripción	**Precio total (€)**
Coste total de la inversión material	28.724,34
Coste total de la ejecución	6.244,50
Coste del estudio y diseño de la instalación	27.271,00
Coste de las membranas	1.654,65
TOTAL	63.894,49
IVA (16%)	10.223,12
TOTAL IVA	**74.117,61**

Tabla 12.5. Presupuesto total de una consultoría hacia un cliente

Si realizamos la diferencia entre este presupuesto (74.117,16 €) y el presupuesto de la Tabla 12.2 (40.563,86 €) obtenemos un ahorro aproximado de 33.553,75 €.

12.4. Diagrama de Gantt

Aprovechando la similitud entre el PFC y el presupuesto simulado como una ingeniería se ha realizado un diagrama de Gantt (Figura 12.1). Detallando y describiendo cada una de las tareas realizadas así como su duración y su situación en el tiempo.

Entre las tareas se han tenido en cuenta tanto las que serían necesarias para llevar a cabo el proyecto externamente como las necesarias para la presentación académica (redacción, búsqueda de fuentes y de información). Podemos ver la recopilación de tareas y su duración en la Tabla 12.6.

Tarea	**Descripción**	**Duración (horas)**
Tarea A	Búsqueda de información sobre el contexto del proyecto	30
Tarea B	Búsqueda y estudio de las bases del diseño de la instalación	30
Tarea C	Búsqueda de información técnica y especifica del proyecto	35
Tarea D	Diseño manual de la instalación	25
Tarea E	Diseño informático mediante el software *ROSA*	20
Tarea F	Diseño del esquema de la instalación	85
Tarea G	Selección de equipos	40
Tarea H	Comprobación y cálculo del funcionamiento de los equipos ($NPSH_r$)	80
Tarea I	Lay-out planta piloto en dos dimensiones	50
Tarea J	Simulación de la planta piloto en tres dimensiones	60
Tarea K	Manual de operación de la planta	50
Tarea L	Planos de funcionamiento de la instalación en cada modo de funcionamiento	15
Tarea M	Planos de alimentación de salmuera de las plantas pilotos	20
Tarea N	Redacción y verificación de la memoria	50

Tabla 12.6. Relación de tareas y su correspondiente dedicación aproximada

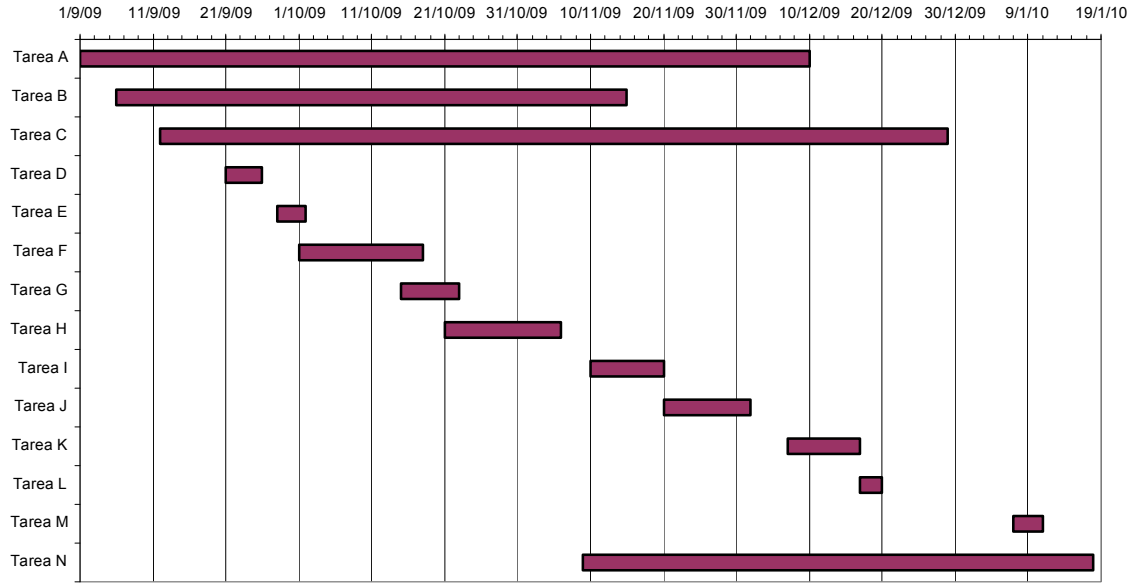


Figura 12.1. Diagrama de Gantt del PFC

Conclusiones

Partiendo del problema inicial de determinar equipos, válvulas, instrumentación y todo lo relacionado con la instalación se ha conseguido concretar, distribuir y establecer los procedimientos de manipulación de la planta piloto.

Algunos de los elementos han necesitado especial dedicación como: la elección del número de membranas, la colocación y la regulación de los equipos impulsores. Hemos podido comprobar la influencia de la temperatura de alimentación para el diseño de las membranas. En el caso de las bombas hemos podido ver la sensibilidad ante una variación de ciertos elementos de la instalación y su correcta configuración para evitar la cavitación.

Otra de las necesidades iniciales era realizar la colocación de los equipos en un espacio reducido de 5 m^2. Mediante el uso de un software de diseño en 3D hemos tratado de realizar una distribución lógica y que reduzca la fatiga del operario. Las válvulas más utilizadas próximas entre sí, fácil acceso en altura y profundidad a los equipos o una altura media adecuada para la óptima visualización de los instrumentos han sido algunos de los criterios en los que nos hemos basado.

La determinación del manual de operación de la planta también era uno de los requerimientos. El primer aspecto ha sido diferenciar y clasificar los diferentes modos en los que podrá trabajar la planta dibujando sus correspondientes planos. A continuación, se estableció el orden de apertura/cierre de las válvulas, la puesta en marcha de las bombas (concretando caudal y presión) y la duración de cada modo. Lo que permitió ver los puntos críticos de la instalación y asociarles una alarma visual y una de paro gobernada por el autómata.

Además de los objetivos y necesidades iniciales, hemos realizado un estudio presupuestario de cada partida y una simulación del coste del proyecto en el mercado. Con ello hemos podido comprobar la reducción de costes y el ahorro que ha implicado realizar el proyecto de esta manera.

La planta piloto deberá seguir creciendo y evolucionando por lo que a corto plazo se deberán tratar aspectos como concretar el producto a dosificar o la disolución más adecuada para la limpieza. Mientras que a largo plazo algunos de los posibles puntos a tratar pueden ser: la eficiencia energética, la regulación y la alimentación del grupo impulsor.

A título personal me ha servido para afrontar un nuevo reto en cuanto a temática, descubrir nuevas tecnologías y realizar un proyecto multidisciplinar en la medida de lo posible aplicando muchos de los conocimientos adquiridos a lo largo de mi educación.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

Ahmed, M; Arakel, A; Coleman, M; Hoey, A. *Integrated powr, water and salt generation: a discusión paper* [en línea]. 2000 [Consulta 23 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.enersalt.com.au/Local%20Publish/assets/integr_power_water_and_salt%20Article%202000.pdf>.

Arellano, A. *La crisis del agua que se nos avecina ¿El fin del hombre?* [en línea, consulta 23 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.zonacatastrofica.com/la-crisis-del-aguaque-se-nos-avecina.html>.

Barr, A. Chloralkali Process: Shulphate Removal by Nanofiltration. *Filtration + Separation*. Julio/Agosto 2001, p. 18 – 20.

Bessarabov, D; Twardowski, Z. *Industrial application of nanofiltration – new prespectives. Membrane Technology*. Septiembre 202, vol. 2002 num. 9, paginas 6 – 9.

Blancke, W. *Production of NaCl concentrated brine from seawater for chlor – alkali membrane electrolysis: exploitation of saturated super purified seawater in a chlor – alkali pilot cell*. Unita di Ricerca Elettrolisi. Rosignano, 2007.

Carbonell, M; Segalàs, J. *Annexes enginyeria fluidomecànica II*. Ähllens, S.L., 2003.

Chlorine Online. Information Resource [en línea, consulta: 10 de febrero de 2010]. Disponible en: <http://www.eurochlor.org/>.

Dow Water Solutions. *FILMTEC Reverse Osmosis Membranes, Technical Manual* [en línea, consulta: 25 de octubre de 2009]. Disponible en: <http://www.dow.com/PublishedLiterature/dh_0344/0901b80380344689.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-00071.pdf&fromPage=GetDoc>.

Drioli, E; Criscuoli, A; Curcio, E. Integrated membrane operation for seawater desalination. *Desalination*, 2002, vol. 147, p. 77 – 81.

Fariñas, M. Ósmosis Inversa. *Fundamentos, tecnología y aplicaciones*. País Vasco: Mc Graw-Hill, 1999. ISBN 84-481-2126-0.

Fernández, A. *Desaladoras: razones a favor y en contra* [en línea]. Fundación Eroski. Vizcaya: 12 de junio de 2008 [Consulta 23 de diciembre de 2009]. Disponible en:

<http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2008/06/12/177702.php>.

Franzini, J.B; Finnemore, E.J. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. 9ª ed. Madrid: Mc Graw-Hill, 1999. ISBN 1400-340-760.

Hilal, N; Al – Zoubi, H; Darwish, N.A; Mohammad, A.W; Abu Arabi, M. A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. *Desalination*, 2004, vol. 170, p. 281 – 308.

Hinrichsen, D; Robey, B; Upadhyay, U. D*. Soluciones para un mundo con escasez de agua* [en línea]. Population Reports. Serie M, num 14. Baltimore: Johns Hopkins School of Public Health, Population Information Program, septiembre de 1998 [Consulta 23 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://info.k4health.org/pr/prs/sm14edsum.shtml>.

Hydra-Cell Wanner Engineering, Inc. *Hydra-Cell Diaphragm Pump Products* [en línea, consulta: 16 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.hydra-cell.com/product/overview-diaphragm-pumps.html>.

IPPC Integrated Pollution Prevention and Control, *Reference Documento on Best Available Techniques in the Chlor – Alkali Manufacturing Industry* [en línea]. Comisión Europea. Diciembre de 2001 [Consulta 4 de febrero de 2010]. Disponible en: <ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/cak_bref_1201.pdf>.

Kai Yu Wang; Tai-Shung Chung; Raj Rajagopalan. Novel Polybenzimidazole (PBI) Nanofiltration membranas for the separation of sulfate and chromate from high alkalinity brine to facilitate the chlor – alkali process. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2007, vol. 46, num 5, p. 1572 – 1577.

M'nif, A; Bouguecha, S; Dhahbi, M; Hamrouni, B. Coupling of membrane processes of brakish water desalination. *Desalination*, 2007, vol. 203, p. 331 – 336.

Madaeni, S.S; Kazemi, V. Treatment of saturated brine in chlor – alkali process using membranes. *Separation and Purification Technology*, 2007, vol. 61, p. 72 – 78.

Medina, J. A. *Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa*. Madrid: Mundi – Prensa, 1999. ISBN 84-7114-849-8.

Ohy, H; Suzuki, T; Nakao, S. Integrated system for complete usage of components in seawater. A proposal of inorganic chemical combina ton seawater. *Desalination*, 2001, vol. 134, p. 29 – 36.

Rubio, M; Zarza D. *Congreso Nacional del Medio Ambiente. Cumbre del desarrollo sostenible* [en línea]. Madrid, diciembre de 2006 [Consulta: 15 de Diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/SDs/SD4/SD4_ppt_Rubio%20y%20Zarzo.pdf>.

Sadhwani, J. *Impacto ambiental en la desalación de aguas*. VII Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid, 2004 [en línea, consulta: 10 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.conama.org/documentos/2.pdf>.

Science on Sustainability 2006 [en línea]. Tokyo: *Resarch on the Basis for Sustainability* (RSBS) Secretariat, enero 2006 [Consulta 23 de diciembre de2009]. Disponible en: <http://www.sos2006.jp/english/rsbs_summary_e/ScienceOnSustainability2006.pdf>.

Solomon, I; Gopalakrishnan, V; Senthilhumar, G. *Brine solution recovery using nanofiltration* [en línea] Julio 2009 [Consulta 23 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.eco-web.com/ini/index.html>.

Solvay Ibérica. *El Cloro, cómo se fabrica el cloro* [en línea, consulta: 6 de febrero de 2010]. Disponible en: <http://www.solvayiberica.es/static/wma/pdf/1/3/9/3/Ficha03a.pdf>.

SOSTAQUA. *Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible* [en línea]. Barcelona, 2009 [Consulta: 15 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.sostaqua.com/new/legal/conditions.php>.

Svensson, M. *Desalination and the Environment. Options and considerations for brine disposal in inland and coastal locations* [en línea]. Department of Biometry and Engineering. Uppsala: 25 de septiembre de 2005 [Consulta 25 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://ex-epsilon.slu.se:8080/archive/00000805/01/exjobb_05_02.pdf>.

Turek, M; Dydo, P. Electrodialysis reversal of calcium sulphate and calcium carbonate supersaturated solution. *Desalination*, 2003, vol. 158, p. 91 – 94.

Turek, M; Dydo, P; Klimek R. Salt production from a coal – mine brine in NF – evaporation – crystallization system. *Desalination*, 2008, vol. 221, p. 238 – 243.

UNESCOPRENSA. *Crisis del agua: un problema de gobernabilidad, según el segundo Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Rescursos Hídricos en el Mundo* [en línea]. París, 9 de marzo de 2006 [Consulta 23 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=32057&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html>.

Veolia. *ZDD – a Zero Discharge Desalination Solution for brackish Water Treatment* [en línea]. Water solutions & Technologies 2009 [Consulta 27 de diciembre de 2009]. Disponible en: <http://www.nawatersystems.com/lib/naws/BAD4ATWvMsIF94GObLG9X6lW.pdf>.

Water Desalination Report: the International weekly for dealination and advanced water tratment since 1965. Tom Pankrataz. 20 de julio de 2009, vol. 45, num. 26. Houston, Texas: Media Analytics, 2009.

Yacubowicz, H; Yacubowicz, J. Nanofiltration: properties and uses*. Filtration + Separation*. Septiembre 2005, vol. 42, num 7, p. 16 – 21.

Bibliografía complementaria

AEDyR. *Asociación Española de Desalación y Reutilización* [en línea]. Disponible en: <http://www.aedyr.es/>.

Endress + Hauser. *Process automation* [en línea]. Disponible en: <http://www.us.endress.com/>.

CodeLine, Pentair Water. *Maximizing the perfomance of yout water purification system* [en línea]. Disponible en: <http://www.codeline.com>.

Hispagua. Sistema Español de Información sobre el Agua [en línea]. Disponible en: <http://hispagua.cedex.es/index.php>.

Llovera, S. Noró, M. Rolando, C. *Guía lingüística pràctica 2* [versión electrónica, formato pdf]: *convencions gràfiques per a textos docents.* Barcelona: Servei d'Informació, Imatge i Publicacions de la Universitat Politècnica de Catalunya, octubre 1998.

Packo Pumps. *Centrifugal and Lube pumps* [en línea]. Disponible en: <http://www.packopumps.com/es/empresa>.

Prominent. *Experts in Chem-Feed and Water Treatment* [en línea]. Disponible en: <http://www.prominent.es/desktopdefault.aspx>.