



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA REGENERADA A PARTIR DE EFLUENTES INDUSTRIALES DEPURADOS

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Sergio Cegarra Luzón

Director: Belén Elvira Rendueles

Cartagena, a 25 de Septiembre de 2014



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	4
2. ANTECEDENTES	6
2.1. LA DESALACIÓN	6
2.1.1. Los fundamentos termodinámicos de la desalación.....	6
2.1.2. Procesos actuales de desalación	7
2.1.3. Las membranas en los procesos de desalación.....	19
2.1.4. Panorama actual de desalación en el mundo	29
2.1.5. La desalación en España.....	34
2.1.6. Aspectos energéticos de la desalación.....	40
2.1.7. El uso de las energías renovables en la desalación	41
2.1.8. La desalación de agua de mar mediante el empleo de energías renovables	53
2.2. LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES REGENERADAS EN ESPAÑA	65
2.2.1. Introducción	65
2.2.2. Usos ambientales de la reutilización en España	78
2.2.3. Ejemplos de reutilización	79
2.3. ELECTRODIÁLISIS	91
2.3.1. Principio de funcionamiento	92
2.3.2. Comparativa con otros procesos.....	94
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	100
3.1. ELECTRODIÁLISIS	100
3.1.1. Principios de operación	100
3.1.2. Proceso estándar de electrodiálisis.....	100
3.1.3. Proceso de Electrodiálisis Bipolar	106
3.1.4. Proceso de Electrodiálisis Inversa (EDI) o Reversible (EDR).....	108
3.1.5. Características de la EDR	114
3.1.6. Funcionamiento de una planta de ED	118
3.2. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES REGENERADAS	142
3.2.1. El agua residual depurada	142
3.2.2. El agua residual regenerada	146
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	179

ÍNDICE

4.1.- RECOGIDA DE DATOS DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE DESALACIÓN Y DE LA ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE EN PARTICULAR	179
4.2.-EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE EDR PARA REUSO INDUSTRIAL, AGRÍCOLA O RECREATIVO	185
4.2.1.-Determinación de los parámetros del agua a tratar que determinan el diseño de la planta	185
4.2.2.- Selección de membranas	203
4.2.3.-Cálculo de las sales limitantes para control de las incrustaciones.	204
4.2.4.- Cálculo de las etapas del proceso y balance de materia	210
4.2.5.- Descripción general del proceso	216
5. CONCLUSIONES	232
6.ANEXOS	233
Anexo 1. Tablas del RD 1620/2007	233
Anexo 1A. Tabla de usos y las calidades de agua del Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007).	233
Anexo 1B. Tabla de frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro.	237
Anexo 1C. Tabla de evaluación de la calidad de las aguas regeneradas.....	238
Anexo 2. Tabla de relación de los compuestos emergentes analizados en los puntos de la red local, depósito, efluente e influente (tratamiento terciario) en el Delta del Llobregat.	240
Anexo 3. Energías renovables en la desalación	241
Anexo 4. Propiedades dadas por los fabricantes de algunas membranas intercambiadoras comercialmente representativas (Rautenbach, 1989 y Korngold, 1984)	244
Anexo 5. Diagramas de bloques del proceso de regeneración de agua de la planta de EDR para uso industrial, agrícola o recreativo.....	245
Anexo 5.A. Esquema general del proceso.....	245
Anexo 5.B. Esquema de las etapas de la pila de EDR	246
Anexo 5.C. Esquema del sistema de adición de antiincrustante	247
7. BIBLIOGRAFÍA	248

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El desarrollo económico suele implicar la necesidad de disponer de recursos adicionales para poder llevar a cabo las nuevas actividades industriales o agrícolas, o para abastecer demanda correspondiente a las actividades domésticas, turísticas y de ocio.

Las aguas residuales regeneradas constituyen un recurso no convencional de agua que se ha desarrollado en los últimos decenios. No obstante, para poder proceder a reutilizar este recurso se requieren las tecnologías adecuadas y unos estudios previos detallados. La OMS considera la reutilización del agua como un recurso estratégico y de especial valor en zonas donde existe estrés hídrico, siempre y cuando se asegure la salud pública y la protección del medio ambiente.

La desalación del agua es una aspiración del hombre que se remonta a la más remota antigüedad. El proceso de desalación se define como la separación de las sales de una disolución acuosa. Dicha definición puede ampliarse y entenderse como la disgregación total del elemento disolvente, es decir el agua, de la disolución inicial, con el fin último de separar totalmente ambos componentes para obtener agua apropiada para el uso humano.

La guía del ministerio que desarrolla el RD 1620/2007 de reutilización de aguas residuales propone la tecnología de la electrodiálisis para el reuso industrial, siempre que dicha actividad no esté sometida a criterios restrictivos microbiológicos clase A donde es obligatorio usar tecnología de osmosis inversa.

Las aplicaciones potenciales más importantes de la electrodiálisis son:

- ❖ Desalación del agua salobre y agua marina.
- ❖ Concentración de agua marina.
- ❖ Desmineralización de suero.
- ❖ Recuperación de metales y aguas de lavado de electrodeposición.
- ❖ Desalación de purga de agua de fibra y refrigeración.
- ❖ Recuperación de ácidos y bases de efluentes ácidos usados.
- ❖ Desmineralización del vino.
- ❖ Desmineralización del azúcar.
- ❖ Obtener agua ultrapura para la industria farmacéutica y electrónica

La electrodiálisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la influencia de un campo eléctrico. Los procesos de

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

separación basados en la electrodiálisis utilizan membranas donde se han incorporado grupos con cargas eléctricas, con el fin restringir el paso de los iones presentes en una solución acuosa. En estos procesos la “fuerza impulsora” responsable del flujo de los iones, a través de la membrana, es una diferencia de potencial eléctrico.

La electrodiálisis necesita energía eléctrica continua, luego la economía del proceso se basa en optimizar la energía eléctrica consumida en la separación del concentrado y el efluente desalinizado.

La desalación mediante EDR necesita un tratamiento previo para evitar problemas de funcionamiento. Para ello se recomienda la instalación de un tratamiento físico-químico con decantación lamelar y una filtración que permita limpiezas en continuo.

Aplicable para la recuperación y reutilización de concentrados aniónicos y/o catiónicos, siempre que tenga la finalidad de regeneración y reutilización del agua en los siguientes sectores industriales:

- Industria alimentaria
- Industria gráfica
- Industria química
- Industria no-metálica
- Industria de metales básicos
- Tratamiento superficial
- Industria textil

Los objetivos del presente trabajo son:

1.-Estudio comparativo de los últimos avances tecnológicos de procesos de desalación como tratamiento terciario de aguas residuales industriales para obtener agua regenerada.

- 1.1.-Idoneidad de cada proceso en base a criterios de reuso
- 1.2.-Selección en base a criterios energéticos
- 1.3.-Idoneidad en base a características del efluente

2.-Aplicación de la electrodiálisis reversible en aguas residuales según los criterios de calidad establecidos por el RD 1620/2007

- 2.1.-Criterios de Selección en base a umbrales microbiológicos
- 2.2.- Criterios de selección en base a características del efluente

2. ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

2.1. LA DESALACIÓN

¿Es la desalación de agua de mar un recurso hídrico alternativo?. Según Miguel Torres Corral (1998) hay que contestar a esta pregunta de una forma doble, fruto a su vez de una doble formulación:

¿Es la desalación un recurso hídrico técnicamente alternativo?. ¿Es la desalación un recurso hídrico económicamente alternativo?.

A la primera pregunta hay que contestar de forma clara y tajante que sí. La desalación de agua de mar es una tecnología absolutamente dominada, sobre la que no existen dudas para poder encomendar a ella la satisfacción de cualquier déficit hidráulico.

A la segunda hay que contestar depende. Lo que se puede y pretende es mejorar esta tecnología para rebajar al máximo los costes de la desalación, pero una vez realizada esta labor serán otros agentes de la actividad económica los que podrán evaluar si su actividad (agricultura, industria, abastecimiento urbano, turismo, usos hídricos, etc.) es rentable, aplicando el coste real del agua desalada a su actividad. Es imprescindible que antes de acometer una operación de desalación como forma de enjugar un déficit hídrico, debe acometerse de forma rigurosa el estudio de viabilidad técnica y económica, para, a partir de él, tomar la decisión.

2.1.1. Los fundamentos termodinámicos de la desalación

El agua pura es muy difícil de encontrar en la tierra. Lo que denominamos agua habitualmente es en realidad una disolución de diversas sales en agua. La concentración de sales mayor o menor es la que dará origen a que denominemos a la disolución de forma distinta: agua dulce, agua salobre, agua salada, salmuera, etc.

Según Miguel Torres Corral (1998) desde el punto de vista termodinámico el efecto físico de la desalación de agua se obtiene aportando a la disolución la energía suficiente para separar las sales que contiene. La cantidad mínima de energía necesaria se puede evaluar siguiendo un camino opuesto al de la desalación, es decir, midiendo la energía desprendida al disolver en agua pura las sales que contiene la disolución. Matemáticamente este desprendimiento energético viene representado por la fórmula:

$$W = R T \ln aA$$

W = Energía desprendida; R = Constante; T = Temperatura absoluta; $\ln aA$ = Logaritmo neperiano de la actividad de las sales en la disolución

2. ANTECEDENTES

El primer miembro representa la energía que se libera y el segundo representa la variación del potencial electroquímico del sistema agua más sales, desde el estado en que éstas se encuentran antes de la disolución y después de la misma. Para el agua de mar de 35.000 ppm, medido experimentalmente, es igual a 0,9773 y la energía mínima para la separación a 25 °C es de 13.60 cal/mol, equivalente a 0.879 kWh/m³. Para agua salobre de 15.000 ppm, la energía mínima resulta ser 0.298 kWh/m³. Puede verse la diferencia en función de la salinidad.

Todos los procesos de desalación se fundamentan en lograr la separación del agua pura, aportando al sistema la energía suficiente, que en un proceso perfectamente reversible coincidiría con la energía mínima antes citada. Cualquiera que sea el proceso a seguir se requiere la misma energía mínima. Unos procesos serán más eficientes que otros si se acercan más o menos a las condiciones límite ideales.

Al analizar la energía mínima necesaria para la desalación en un proceso ideal podría pensarse en la desalación como la panacea para resolver la escasez de agua, ya que el consumo energético teórico es bajo. En la práctica esto no es así, ya que el consumo energético es muy superior (entre 5 y 20 veces superior). Pero de todas formas esta gran diferencia entre el consumo teórico y el real abre grandes expectativas de futuro para rebajar el coste energético, que es el componente principal del coste del agua desalada.

2.1.2. Procesos actuales de desalación

Según Miguel Torres Corral (1998) los distintos procesos existentes, se pueden agrupar en dos grandes tipos: procesos que separan el agua de la disolución y procesos que separan los iones salinos. Dentro de estos dos grandes grupos se puede hacer la siguiente clasificación:

2.1.2.A) Procesos que separan agua

a) Destilación:

- Destilación solar
- Destilación súbita de simple etapa
- Destilación en tubos sumergidos
- Destilación súbita multietapa
- Destilación multiefecto por tubos horizontales
- Destilación multiefecto por tubos verticales
- Comprensión mecánica de vapor

2. ANTECEDENTES

➤ Termocompresión de vapor

b) Cristalización: Congelación, y Formación de hidratos

c) Filtración: Osmosis inversa, Ultrafiltración, Microfiltración, Nanofiltración.

2.1.2.B) Procesos que separan sales

a) Filtración selectiva: Electrodiálisis

b) Intercambio: Cambio iónico. Adsorción

a) Procesos de destilación

Todos ellos se basan en la separación del agua mediante evaporación y la condensación posterior de dicho vapor. Es el procedimiento seguido en el alambique, con más o menos complejidad.

La forma de aportar al ciclo la energía necesaria para lograr el cambio de estado y los sistemas de recuperación del calor latente del vapor al condensarse, diferenciarán unos procesos de otros. En la destilación abierta no se recuperaba este calor. Eran simples alambiques. Posteriormente se fue complicando el proceso hasta llegar a los evaporadores con varias etapas y recirculación de salmuera, que son los utilizados en la actualidad. Los procesos de evaporación en este momento se encuentran casi en su techo de desarrollo tecnológico. En el esfuerzo por disminuir el consumo se ha intentado superar el límite de 120 °C, marcado actualmente por la precipitación de ciertas sales, pero no se ha logrado de forma económica. Por otro lado se está intentando disponer los evaporadores en vertical para mejorar la transferencia de calor y otros parámetros de diseño, pero tampoco se han superado por el momento las dificultades que comporta.

b) Procesos de cristalización

El proceso de cristalización consiste en separar los cristales de hielo, teóricamente de agua pura, que se forman cuando se rebasa el punto de congelación de las soluciones salinas. Por fusión posterior de los cristales se obtiene el agua dulce. Otro método basado en el mismo principio de la cristalización, consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. El rendimiento energético de estos procesos de cristalización es mayor que en

2. ANTECEDENTES

los de destilación, pero las dificultades tecnológicas de separación y lavado de los cristales han hecho que no se apliquen industrialmente.

c1) Procesos de filtración: Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es el proceso que separa el agua de la disolución salina mediante filtración realizada a través de membranas semipermeables. Estas membranas tienen un comportamiento distinto frente al transporte a su través de las moléculas de agua y de los iones de la disolución.

Si en un recipiente separamos mediante una membrana semipermeable dos disoluciones de concentraciones distintas y sometidas ambas a la presión atmosférica, se establece un flujo a través de la membrana desde la disolución más diluida a la más concentrada. Este flujo permanecerá hasta que el desnivel de la solución más concentrada iguale a la presión osmótica de la misma. Si sometemos ahora esta disolución más concentrada a una presión superior a su presión osmótica, se producirá un flujo de agua desde ésta hacia la solución más diluida.

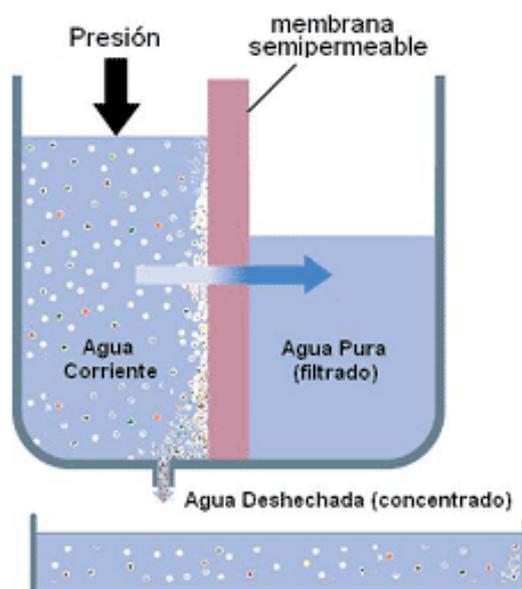


Figura 1. Ósmosis Inversa. Fuente: SINIA (2014)

La presión necesaria para el proceso depende de la presión osmótica de la disolución y ésta a su vez depende de la concentración de la misma. En el caso del agua de mar hay que trabajar a presiones del orden de 70 kg/cm^2 , dependiendo de la concentración de la salmuera y de otros factores.

2. ANTECEDENTES

Generalmente se emplea un gran depósito o balsa que se llena por gravedad al nivel del mar, previo un filtrado grosero. Se transporta el agua de la balsa mediante las bombas de alimentación al sistema de desalación. A la entrada de las bombas de alimentación llega un suplemento de productos químicos mediante bombas dosificadoras. Así se prepara el agua para pasar cuatro tipos de filtros que retienen partículas mayores de cuatro micras. El paso principal de la producción de agua es la separación del H₂O de la mezcla de sales y minerales presente en el agua del mar. Este paso se realiza en la etapa de ósmosis inversa consiguiendo que las sales no atraviesen las membranas de los módulos de OI. Previamente ha de conseguirse que las partículas de diatomeas y microalgas no lleguen a las membranas y para eso existen tres pasos previos de filtración por arena antes del último paso de microfiltración usando cartuchos de fibra sintética. El éxito de filtración también depende de la apropiada introducción de coagulantes. De acuerdo a la calidad de filtración se genera el ciclo de cambio de las membranas entre 2 y 5 años. Los dispersantes químicos introducidos antes de la microfiltración previenen la precipitación de minerales dentro de las membranas. Como todos los aspectos del proceso están automatizados, el trabajo de los operadores es la supervisión y el mantenimiento.

Según Anónimo (2014) las características de la OI son:

- ❖ Regulación de alta presión y recuperación de energía: la salmuera rechazada es un 55% del agua bruta (aunque depende de la tecnología de desalación empleada). Mientras que el 45% del agua obtenida sale a presión atmosférica, debe asegurarse una contrapresión regulada en el flujo de rechazo. Este flujo de rechazo siempre contiene algo así como el 55% (100% - % ganada) de la energía de presión proporcionada por las bombas. Y es muy conveniente la recuperación de esta energía para obtener un rendimiento mayor. Una parte de la energía recuperada puede volver al mismo ciclo de desalación y recuperación más de una vez.

Mientras que la planta está en el modo de producción se controla la presión de salida por una válvula de regulación. Se usan convertidores 'Pressure Exchanger' y con ellos en el intercambio de presión se puede recuperar hasta el 95% de la energía del flujo de rechazo directamente por medio de bombeo usando desplazamiento positivo. Esa bomba de recuperación de energía aumenta el flujo de más agua bruta a la entrada de las membranas. La planta usa las unidades 'Pressure Exchanger' cerca de cada grupo de tubos de elementos de ósmosis inversa.

- ❖ Calidad del agua producida: El agua osmotizada o el permeado de los módulos de ósmosis inversa debe ser acondicionada para cumplir con ciertas características de alta calidad, ya que, el agua producida tiene un pH ácido y un bajo contenido de carbonatos, lo que la convierte en un producto altamente corrosivo. Esto exige

2. ANTECEDENTES

su preparación antes de su distribución y consumo. El pH se ajusta con carbonato de calcio a un valor de 7,7. Adicionalmente, si así lo requieren las normas municipales para uso del agua potable, se agrega también fluoruro de sodio e hipoclorito. La calidad del agua es media (300-500 ppm).

- ❖ Coste económico: Según David Martínez Vicente (2002) el estudio de la tecnología de ósmosis inversa para la desalación de agua de mar se realiza mediante la descomposición y descripción una planta desaladora "tipo", donde se indica tanto el estado actual de la tecnología, como las mejoras más novedosas y sus posibilidades de aplicación en un futuro próximo. Las diferentes partes de las plantas desaladoras definidas son: captación de agua de mar, pretratamientos, bombeo de alta presión y recuperación de energía, tratamiento del agua por ósmosis inversa, postratamientos, almacenamiento e impulsión del permeado, evacuación de salmuera e instalaciones accesorias. Se ha tenido en cuenta, para la definición de estos componentes, la procedencia del agua de mar: captación mediante pozos costeros o toma directa del mar, debido a la importante influencia que tiene este aspecto en el funcionamiento y el diseño de las plantas desaladoras por ósmosis inversa. Además de la descripción propiamente dicha, se han establecido parámetros y métodos de diseño de los diferentes equipos, haciendo especial hincapié en el diseño de bastidores de membranas mediante la utilización de programas informáticos.
- ❖ En cuanto al estudio económico del coste de la desalación de agua de mar por ósmosis inversa, se ha establecido una metodología de cálculo, que distingue dos tipos de costes: coste de capital y costes de operación. Los primeros corresponden a la amortización del total de la inversión inicial necesaria; estableciéndose un coste medio de inversión (para plantas de 60.000 m³/día) de 600€/m³/día instalado, cuyo coste de amortización asciende a 16,52 cent€/m³. Los costes de operación se han dividido en costes de: personal, mantenimiento, reposición de membranas, reposición de cartuchos de filtro, reactivos químicos y energía eléctrica, suponiendo éste último alrededor del 50% de los costes de operación. Sumando estos conceptos, se obtiene un coste total para plantas de 10.000 m³/día de entre 55,76-62,76 cent€/m³, y para plantas de 140.000 m³/día entre 40,95-46,78 cent€/m³ por cada 100m de elevación y 10 km de distancia.

Indicando que el coste actual de la desalación de agua de mar tan solo es viable para abastecimiento humano, industrial y turístico, en zonas no muy alejadas de la costa. No se considera viable este coste para usos agrícolas, salvo en casos muy específicos de cultivos intensivos de muy alta rentabilidad, y que tengan la posibilidad de mezclar aguas desaladas con aguas de peor calidad más baratas. En las conclusiones también se indican los aspectos favorables y desfavorables que

2. ANTECEDENTES

pueden afectar al desarrollo futuro de la desalación de agua de mar por ósmosis inversa en España. Como aspectos favorables se tiene: existencia de demandas insatisfechas en el arco mediterráneo español, tendencia a la baja del coste por el desarrollo tecnológico y tendencia a la baja del coste energético (ahorro energético y liberalización del mercado eléctrico). Los aspectos desfavorables se resumen en: competencia de mercados agrícolas exteriores, excesiva dependencia energética del petróleo y problemas medioambientales.

- ❖ Los requerimientos energéticos de la desalación varían en función de la tecnología empleada, aunque hay una tendencia hacia su reducción, gracias a los avances tecnológicos. Empleando sistemas de ósmosis inversa y contando que el líquido producto debe ser bombeado a los lugares de destino, el gasto energético es de entre 3 y 4 kWh/m³. Se prevé que, con una mejora de la tecnología, pueda obtenerse agua desalada con un gasto energético de unos 2,9 kWh/m³ hacia el año 2010. El consumo energético primario es habitualmente menor de 80 kJ/kg.
- ❖ Almacenamiento y distribución del agua producida: El agua desalada pasará por bombeo al depósito de almacenamiento de agua potable que puede estar encima de un cerro natural o a nivel del terreno, en cuyo caso se le dará la necesaria presión con bombas de caudal variable. Luego se reparte por la red de distribución local.

Según Miguel Torres Corral (1995) las membranas en la OI se fabrican en dos tipos de materiales distintos: acetatos de celulosa y poliamidas aromáticas. Posteriormente se conforman en dos tipos de estructura distinta: arrollamiento espiral o fibra hueca. La ósmosis inversa es actualmente el proceso más eficiente de desalación por su menor consumo energético. El desarrollo experimentado en los últimos diez años ha sido muy notable, tanto en las propiedades de las membranas, el aumento del rechazo de sales, disminución del precio de las mismas, incremento de productividad, etc. Cabe esperar desarrollos importantes en el futuro ya que hay varias líneas abiertas de investigación.

Este proceso no ha llegado aún a su techo tecnológico, y en él hay basadas fundadas esperanzas de mejoras significativas, que redundarán, sin duda, en la rebaja del coste del agua desalada.

c2) Procesos de filtración: Ultrafiltración

Ultrafiltración (UF) según Anónimo (2014) es un tipo de filtración por membranas en la cual la presión hidrostática fuerza un líquido contra una membrana semipermeable.

2. ANTECEDENTES

Los sólidos suspendidos y los solutos de alto peso molecular son retenidos, mientras que el agua y los solutos de bajo peso molecular atraviesan la membrana. Este proceso de separación es usado en industria e investigación para purificar y concentrar soluciones macromoleculares (10^3 - 10^6 Da). Ultrafiltración no es fundamentalmente diferente a otros procesos como microfiltración, nanofiltración o separación de gases, excepto en los tamaños de las moléculas que retienen. Ultrafiltración es aplicada en casos de flujo cruzado o flujo sin salida.

La calidad de agua que se consigue mediante la UF según Unitek (2014) mediante el proceso es:

- ✓ turbidez < 0,1 NTU
- ✓ Remoción efectiva de agentes patógenos.
- ✓ 4-Log (99,99%) de remoción virus.
- ✓ 6-Log (99,9999%) de remoción bacterias.
- ✓ Remoción de arsénico mediante inyección de coagulante.
- ✓ Reducción de materia orgánica entre 50 y 90%.

Los sistemas de ultrafiltración eliminan la necesidad de clarificadores. Utilizan membranas que pueden ser sumergidas, reutilizables y limpiables por aire ofrecen mejores características para la clarificación de las aguas potables y residuales.

Según Totagua (2014) las ventajas más relevantes que se consiguen utilizando la tecnología de ultrafiltración son:

- Calidad de agua tratada.
- Desinfección. Efluente desinfectado tras atravesar una membrana de ultrafiltración.
- Compacidad. Mínimo requerimiento de espacio.
- Modularidad. Sistemas fácilmente ampliables sin necesidad de reformas ni ampliación de reactor biológico.
- Mantenimiento. Sistemas muy automatizados, mantenimiento mínimo.
- Eliminación de bulking y espumas de origen filamentoso.

Los tipos de UF son (Totagua, 2014):

c2.1) Ultrafiltración Tubular

Este sistema permite potabilizar aguas procedentes de pozos, lagos o ríos, donde encontramos un agua sin mucha carga y que con este tratamiento de ultrafiltración se convierte en apta para el consumo humano.

2. ANTECEDENTES

Del mismo modo, esta tecnología permite también ampliar depuradoras ya existentes, tanto de origen urbano como industrial; con un coste relativamente bajo y sin necesidad de reformas, mejorando así el nivel de depuración y permitiendo la reutilización del agua.

El proceso de Ultrafiltración tubular se utiliza principalmente para dos actividades. En primer lugar podemos encontrarnos con instalaciones depuradoras en donde no existe un reactor biológico, pero si un sistema secundario de tratamiento, por otro lado también se puede aplicar en aguas superficiales, como lagos, ríos o pozos.

Para las aguas de origen urbano o industrial, la aplicación de la ultrafiltración tubular nos permite disponer de un efluente con una calidad apta para la reutilización. Mientras que para las aguas superficiales, el tratamiento con ultrafiltración posibilita el uso potable del agua tratada como se puede ver en la figura 2.

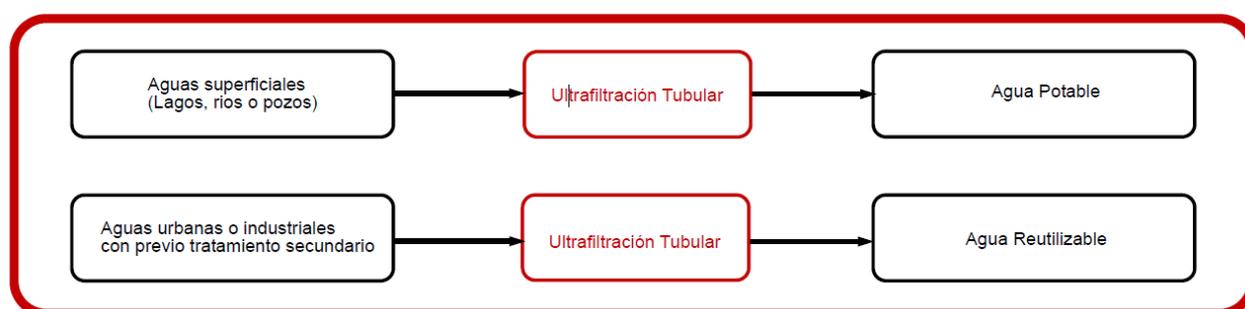


Figura 2. Fuente: Totagua (2014)

c.2.2) MBR (Biorreactores de membrana)

La depuración mediante MBR (Biorreactor de membrana) es un proceso de fangos activados en el cual el agua depurada no se extrae por sedimentación en un decantador secundario, sino por filtración a través de membranas. Así pues, se trata de un conjunto de reactor biológico juntamente con una ultrafiltración posterior. Esta tecnología permite un efluente de mayor calidad que una depuración tradicional, así pues permite ser desechado cumpliendo las normativas más exigentes, o incluso se puede reutilizar el agua para diferentes usos según los criterios contemplados en el RD 1620/2007.

En caso que ya exista una estación depuradora, ésta puede ser convertida a una estación MBR con algunas modificaciones en el reactor biológico (MBR de membranas sumergidas) o con una recirculación permanente (MBR membranas externas).

El balance económico es favorable a los MBRs si se tienen en cuenta una serie de ventajas importantes, al margen de la excelente calidad de agua tratada que se

2. ANTECEDENTES

consigue. De este modo, la tecnología MBR es especialmente competitiva cuando aparece alguno de los siguientes condicionantes:

- Necesidad de disminuir la producción de fangos biológicos (hasta un 80%)
- Necesidad de un grado de depuración elevado: vertido a cauce público, zonas sensibles o pago de un canon de vertido elevado.
- Reutilización: la reutilización puede venir impuesta por la escasez de agua de la zona o puede suponer un valor añadido importante a considerar. Las variables aquí van a ser el precio del metro cúbico de agua o las subvenciones por reutilización.
- Poco espacio disponible
- Ampliación de la capacidad de tratamiento de plantas convencionales ya existentes.
- Efluentes industriales con componentes de difícil o lenta biodegradabilidad. La tecnología MBR permite llegar a depurar materia orgánica considerada poco biodegradable para otro tipo de tecnologías más convencionales.

c.2.3) UFTC (Ultrafiltración tangencial cerámica)

El proceso de ultrafiltración tangencial nos permite reducir la carga de las aguas muy complejas industriales para posteriormente ser tratadas con una depuración tradicional o MBR.

El proceso de ultrafiltración tangencial cerámica (UFTC) se aplica en procesos donde encontramos un influente industrial con un alto nivel de carga. En estos casos, donde los reactores biológicos tradicionales necesitan un tiempo considerable para degradar la materia, es preferible realizar una separación previa de los residuos, para facilitar posteriormente una degradación biológica rápida y de calidad.

El equipo de UFTC se compone principalmente de dos depósitos de acumulación, un sistema de bombeo de presión y los filtros cerámicos (figura 3). Existe un sistema hidráulico secundario que se encarga de limpiar las membranas a contracorriente para mantener el rendimiento del sistema. Se compone de:

- ❖ **RETENIDO:** es donde se realiza la entrada de aguas mediante una sonda de nivel y se van aportando a medida que el circuito cerrado se va vaciando debido a la salida de aguas filtradas.
- ❖ **BOMBA:** que realiza la recirculación de aguas a la velocidad tangencial requerida por el fabricante de las membranas
- ❖ **FILTRO UFTC:** donde se realizan los dos flujos separativos, por un lado el filtrado y por otro el retenido.

2. ANTECEDENTES

- ❖ FILTRADO: depósito de agua filtrada donde realizamos el almacenamiento de las mismas para lavado a contra corriente o bien para limpiezas químicas cuando se requieran.

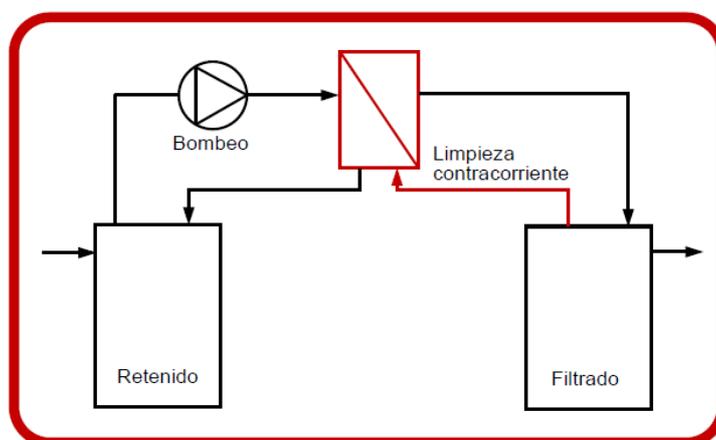


Figura 3. Esquema UFTC. Fuente: Totagua (2014)

En un filtro de membranas cerámicas, el flujo de entrada lo hace de forma axial, con lo cual las partículas inciden de forma tangencial a la membrana. Este hecho provoca una separación de las partículas de agua (azules) de las demás (rojas). Así pues, separamos el caudal de entrada en una salida de concentrado/retenido y el agua filtrada (figura 4).

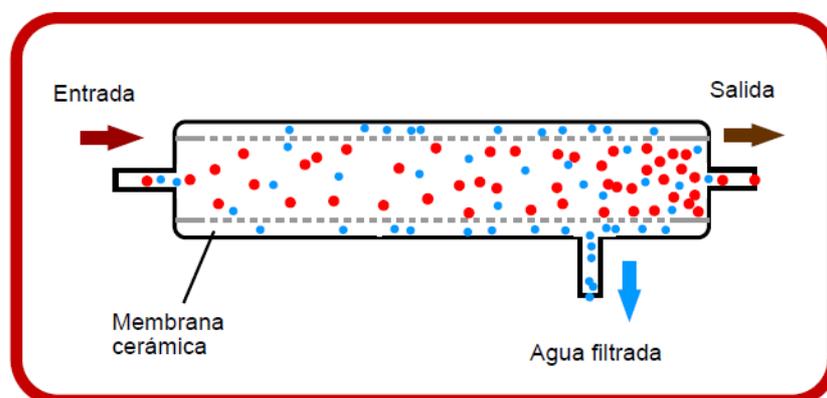


Figura 4. Fuente: Totagua (2014)

Las principales ventajas del sistema de UFTC es que permite una separación de contaminantes para aguas de origen industrial altamente cargadas, reteniendo subfracciones importantes pero pudiendo mantener la actividad biológica posterior mediante sistema tradicional de depuración por lodos activos, biológico o bien por un biorreactor con membranas (MBR).

Las membranas cerámicas tienen una alta resistencia química, mecánica y estabilidad térmica, una alta duración y pueden efectuar retrolavados con aire o productos químicos altamente corrosivos, con lo cual siempre disponemos de una óptima capacidad de filtración, lo cual se traduce en un efluente resultante de alta calidad.

2. ANTECEDENTES

C3) Procesos de filtración: Microfiltración

Según Miguel Torres Corral (1998) es un proceso de membrana muy antiguo que utiliza el gradiente de presión como fuerza impulsora. Elimina los sólidos en suspensión de tamaño superior a 0,1 – 10,0 μm . Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño como *Giardia* y *Cryptosporidium*.

La CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*) de USA ha editado una guía para la prevención de la cryptosporidiosis en aguas de bebida y recreativas en las que aconseja para su eliminación el uso de filtros absolutos que retengan partículas inferiores a 1 μm .

Usualmente se emplea como pretratamiento de sistemas con las membranas más delicadas, como la osmosis inversa o la nanofiltración. (Belén Elvira Rendueles. 2014)

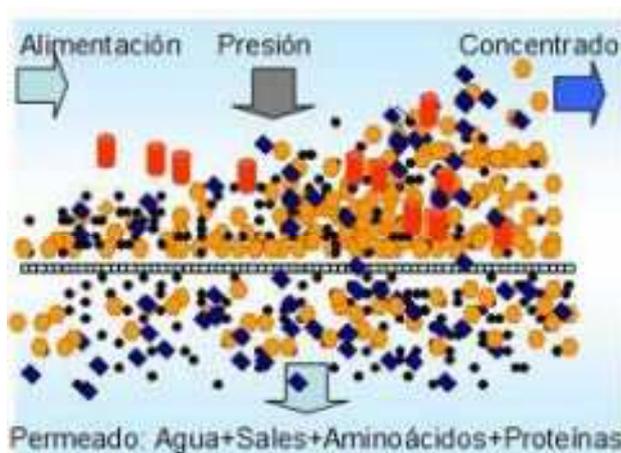


Figura 5. Microfiltración. Fuente: Belén Elvira Rendueles (2014).

C4) Procesos de filtración: Nanofiltración

Elimina los contaminantes de tamaño superior al nanómetro (0,001mm). Las membranas de NF se emplean cuando se requiere eliminar prácticamente, aunque no todos, los sólidos disueltos. La tecnología se llama también ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen 2 cargas (calcio y magnesio) mejor que los que solo tienen una (sodio, potasio, cloro) (Belén Elvira Rendueles. 2014).

2. ANTECEDENTES

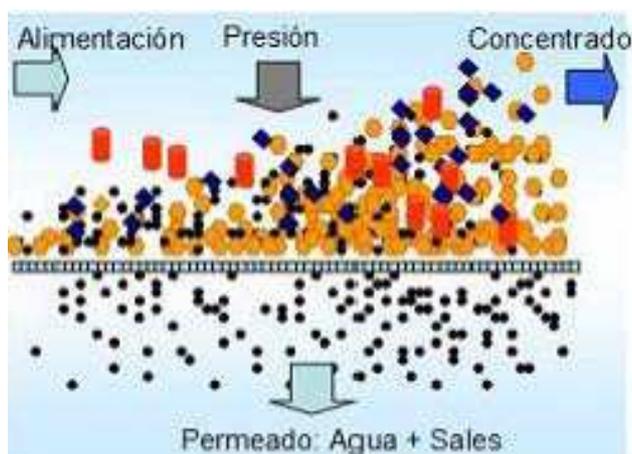


Figura 6. Nanofiltración. Fuente: Belén Elvira Rendueles (2014).

Aquí se puede ver un esquema de la diferencia de tamaño de poros entre los distintos tipos de filtración:

Tamaño de poros



Figura 7. Tamaño de los poros de las membranas en los distintos tipos de filtración.

Fuente: pagina web de la empresa "AGUA Y AIRE" (2014)

d) Procesos de filtración selectiva: Electrodialisis

Entre los procesos que separan sales, entendiendo como tal la separación de los iones de la sal se encuentra la electrodialisis. La electrodialisis utiliza también membranas semipermeables y selectivas al paso de los iones positivos o negativos. Si se crea un campo eléctrico al que se somete el agua salada, los cationes y los aniones emigran hacia sus respectivos electrodos. Si en el camino encuentran estas membranas selectivas, los iones pasarán o quedarán retenidos, dejando zonas intermedias y alternativas entre las membranas donde se concentra el agua (rechazo) y donde se obtiene el agua dulce (producto)(Miguel Torres Corral. 1998). Posteriormente se abordará este proceso a fondo.

2. ANTECEDENTES

e) Intercambio iónico

El intercambio iónico también es un proceso que separa sales y se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias sólidas insolubles que son capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Las resinas liberarán iones H⁺ y OH⁻ y fijarán los iones de electrolito. Estas resinas terminan por agotarse y hay que regenerarlas con productos químicos. Sólo es de aplicación en aguas poco concentradas y como tratamiento de afino en procesos industriales. (Miguel Torres Corral. 1998)

2.1.3. Las membranas en los procesos de desalación

Según Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006) las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado.

Según Israel Medina Roa (2007) el uso de una interfase para separar y mejorar la calidad de mezclas líquidas es muy remoto, los procesos de filtración y tamizado son usados desde hace siglos. Todos los procesos que se realizaron con el fin de separar y mejorar mezclas en la antigüedad, se hicieron de manera empírica. No es hasta el siglo XVIII que Ph. La Hire (1640 – 1718) reporta que la vejiga de cerdo es más permeable al agua que al alcohol.

En el siglo XVIII el abad A. Nollet (1700 – 1770) estudió el rol de las membranas en el proceso de la ósmosis. Él dió cuenta de la existencia de una diferencia de presión entre una solución salina y el agua pura al estar separada por una membrana constituida por una vejiga de cerdo, es decir, encontró la presión osmótica. Por esa misma época, el biólogo francés René Dutrochet (1776 – 1847) estudia la influencia de la presión osmótica sobre los procesos biológicos.

Las membranas como medio de separación son introducidas por el químico escocés Thomas Graham (1805 – 1869), cuando en 1854 las utilizó para distinguir a los cristaloides de los coloides. Las primeras membranas sintetizadas por el hombre las hace el físico J. Traube (1826 – 1894) al precipitar ferrocianuro de cobre sobre cerámica. Por la misma época, el médico A. Fick (1829 – 1929) obtiene las primeras membranas de celulosa, que utiliza para estudiar la difusión.

Los trabajos de L. Pasteur (1822 – 1895), dieron un gran impulso al desarrollo de las membranas, que se empezaron a utilizar para tratar de lograr esterilizar el agua, el aire

2. ANTECEDENTES

y algunos líquidos biológicos. En 1890, W. Nerst (1864 – 1941) define lo que es un sistema membranoso y Lhermite demuestra en 1855 que existen dos tipos de membranas; las membranas porosas, en las cuales el efecto capilar es muy importante y las membranas que deben considerarse como un tercer líquido, es decir, donde la solubilidad es muy importante.

En 1918 – 1919, R. Zsigmondy (1865 – 1929), estudia la ultrafiltración y coloca las bases de la filtración moderna. En 1911 F. Donan (1870 -1956) estudia los equilibrios y potenciales de membranas; punto de partida para todas las separaciones en los cuales el potencial eléctrico es importante (por ejemplo la Electrodialisis).

En 1923 Loeb y Sourirajan, son los primeros en sintetizar una membrana de acetato de celulosa asimétrica para la desalinización del agua de mar.

A partir de aquí se puede hablar de cuatro generaciones de membranas, que serían las conocidas como membranas modernas; estas cuatro generaciones de membranas modernas son:

- 1) Las primeras son las desarrolladas por Loeb y Sourirajan, sintetizadas con acetato de celulosa.
- 2) Mejoras introducidas al tipo de membranas anteriores, como la resistencia química conforman la segunda generación.
- 3) En los años 80 aparece una tercera generación con las membranas compuestas inorgánicas, que poseen una gran resistencia química y mecánica.
- 4) La cuarta generación es la que sigue en desarrollo, son las membranas compuestas (orgánicas – inorgánicas). Se trata de obtener así membranas con las virtudes de los compuestos inorgánicos y orgánicos.

Según Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006) la rápida expansión, a partir de 1960, de la utilización de membranas en procesos de separación a escala industrial ha sido propiciada por dos hechos: la fabricación de membranas con capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado y la fabricación de dispositivos compactos, baratos y fácilmente intercambiables donde disponer grandes superficies de membrana.

Existe una gran variedad de membranas, desarrolladas por cada casa comercial para las aplicaciones específicas que se solicitan. Se clasifican en homogéneas y heterogéneas, atendiendo al hecho de que los grupos cargados eléctricamente estén

2. ANTECEDENTES

homogéneamente distribuidos en la matriz de la membrana o en lugares determinados. Ambos tipos de membranas pueden presentar problemas de mal funcionamiento debido al hinchamiento por absorción de agua de los grupos polares. Las membranas homogéneas se fabrican a partir de polímeros de estireno/divinilbenceno o polímeros de perfluorocarbono. Las membranas heterogéneas se fabrican a partir de polipropileno o policloruro de vinilo.

Características de los procesos de separación con membranas

- ✓ Permiten la separación de contaminantes que se encuentran disueltos o dispersos en forma coloidal.
- ✓ Eliminan contaminantes que se encuentran a baja concentración.
- ✓ Las operaciones se llevan a cabo a temperatura ambiente.
- ✓ Procesos sencillos y diseños compactos que ocupan poco espacio.
- ✓ Pueden combinarse con otros tratamientos.
- ✓ No eliminan realmente el contaminante, únicamente lo concentran en otra fase
- ✓ Pueden darse el caso de incompatibilidades entre el contaminante y la membrana.
- ✓ Problemas de ensuciamiento de la membrana: necesidad de otras sustancias para llevar a cabo la limpieza, ajustes de pH, ciclos de parada para limpieza del equipo.
- ✓ Deficiente escalado: doble flujo-doble de equipos (equipos modulares).
- ✓ Ruido generado por los equipos necesarios para conseguir altas presiones.

2.1.3.1. Tipos de membranas

Las membranas se pueden fabricar con materiales poliméricos, cerámicos o metálicos. Atendiendo a su estructura física se pueden clasificar en:

1) Membranas microporosas

Estructuras porosas con una estrecha distribución de tamaño de poros. Las membranas que se encuadran en este grupo tienen una de distribución de diámetros de poro de 0.001mm – 10mm.

Los procesos de depuración de aguas que utilizan estas membranas, microfiltración y ultrafiltración, se basan en impedir por exclusión el paso a través de la membrana de aquellos contaminantes de mayor tamaño que el mayor diámetro de poro de la membrana, siendo parcialmente rechazadas aquellas sustancias cuyo tamaño está comprendido entre el mayor y el menor de los diámetros del poro. En este tipo de membranas la *fuerza impulsora* responsable del flujo de permeado a través de la membrana es una diferencia de presión.

2. ANTECEDENTES

Los *filtros profundos* actúan reteniendo en su interior, bien por adsorción en las paredes de los poros o por su captura en los estrechamientos de los canales de los poros, las sustancias contaminantes que se quieren excluir del agua. Son membranas isotrópicas y habitualmente se utilizan en microfiltración.

Los *filtros tipo tamiz* son membranas con una estrecha distribución de tamaños de poros. Capturan y acumulan en su superficie las sustancias contaminantes de mayor tamaño que los poros. Las sustancias de menor tamaño que pasan la membrana no son retenidas en su interior, sino que salen formando parte del permeado. Suelen ser membranas anisótropas y se utilizan en ultrafiltración.

2) Membranas densas

Estructuras sin poros donde el paso de las sustancias a través de la membrana sigue un modelo de solución-difusión, en el que los componentes de la solución se disuelven en la membrana y posteriormente se difunden a través de ella. La diferente solubilidad y difusividad de los componentes de la solución en la membrana permiten la separación de sustancia del tamaño de moléculas e iones. Debido a las fuertes presiones a las que tienen lugar estos procesos las membranas son de tipo anisótropo. La ósmosis inversa y la nanofiltración son procesos que utilizan este tipo de membranas.

3) Membranas cargadas eléctricamente

Pueden ser porosas o densas, con restos aniónicos o catiónicos fijos en la estructura de la membrana. La separación es consecuencia de la carga de la membrana, siendo excluidos aquellos componentes cuya carga sea la misma que la de la membrana. La separación también depende de la carga y concentración de los iones de la solución: los iones monovalentes son excluidos menos eficazmente que los divalentes, así mismo, el proceso de separación es menos efectivo en soluciones de elevada fuerza iónica. Estas membranas se utilizan en los procesos de electrodiálisis.

Las membranas aniónicas y catiónicas tienen las siguientes propiedades:

- ✓ Elevada conductividad eléctrica.
- ✓ Esencialmente impermeables al agua e insolubles a la misma.
- ✓ Semirrígidas para facilitar su manejo durante el montaje.
- ✓ Resistentes a cambios de pH entre 1 y 10.
- ✓ Estables a temperaturas superiores a 450°C.
- ✓ Elevada permselectividad iónica.
- ✓ Resistentes al cloro.

2. ANTECEDENTES

- ✓ Resistentes a la contaminación orgánica
- ✓ Larga duración
- ✓ Resistencia al ensuciamiento y al envenenamiento

4) Membranas anisótropas

Las membranas anisótropas son estructuras laminares o tubulares donde el tamaño de poro, la porosidad o la composición de la membrana cambia a lo largo de su espesor. Están constituidas por una delgada película (densa o con poros muy finos) soportada en otra más gruesa y porosa, de tal forma que la primera es la responsable del proceso de separación y la segunda aporta al sistema la suficiente resistencia mecánica para soportar las condiciones de trabajo. La película responsable del proceso de separación y la que aporta la resistencia mecánica pueden estar fabricadas con el mismo material (membranas de Loeb-Sourirajan) o con materiales diferentes (membranas de tipo composite).

Debido a que la velocidad de paso de las sustancias a través de la membrana es inversamente proporcional a su espesor, las membranas deberán ser tan delgadas como sea posible. Mediante la fabricación de membranas anisótropas (asimétricas) es posible conseguir espesores de membranas inferiores a 20 mm, que son los espesores de las membranas convencionales (isótropas o simétricas). La mejora en los procesos de separación, debido a este tipo de membranas, ha hecho que sean las de elección en los procesos a escala industrial.

2.1.3.2. Configuraciones

Las membranas pueden fabricarse en forma de láminas planas, tubulares o del tipo denominado fibra hueca (*hollow fiber*).

Las fibras huecas son estructuras tubulares con 0.1-1.0 mm de diámetro externo y 50 mm de diámetro interno, dimensiones que son un orden de magnitud inferior a las denominadas membranas tubulares. La mayoría de ellas son de tipo anisótropo, donde la estructura responsable de la separación se dispone en la superficie externa o interna de la fibra.

Las fibras huecas se disponen en módulos compactos con mayor superficie filtrante que los módulos de láminas planas y de membranas tubulares, permitiendo separaciones más eficientes.

2. ANTECEDENTES

El desarrollo de materiales para la fabricación de membranas que permitan separaciones eficientes y su disposición en configuraciones o módulos de fácil instalación y sustitución que puedan agruparse para conseguir superficies filtrantes de centenas o millares de m^2 , ocupando volúmenes aceptables, han sido los hechos que han condicionada la utilización de membranas a escala industrial.

En la actualidad las configuraciones en las que se presentan las membranas se denominan:

- ❖ *Cartuchos de membranas*: donde las membranas, convenientemente plegadas, se enrollan alrededor del colector de permeado, empaquetándose en una carcasa de 25 cm de longitud y 6 cm de diámetro (figura 8) que se disponen en línea con el flujo que se desea tratar (alimentación), quedando los contaminantes retenidos en la membrana y generándose un efluente depurado (permeado). En estas disposiciones se consiguen desarrollos superficiales del orden de $0.3 m^2$. Los cartuchos de membranas son desechables.

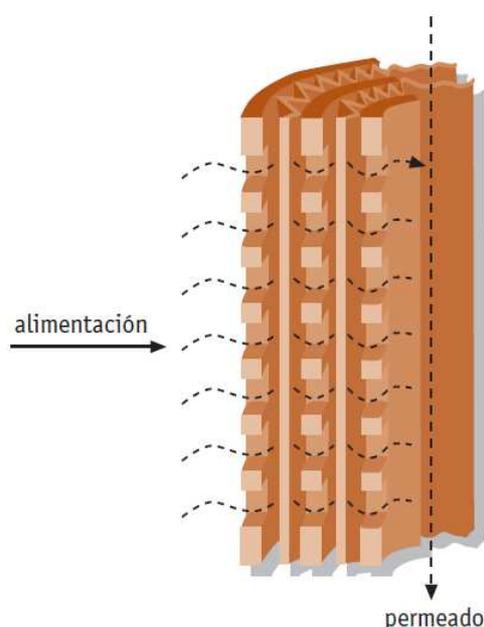


Figura 8. Fuente: Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006)

- ❖ *Módulos tipo placa-bastidor*: tiene una disposición semejante a los filtros-prensa. Las membranas se disponen en bastidores separados por placas. La alimentación, impulsada por una bomba, circula por los espacios placa-membrana, concentrándose en contaminantes conforme tiene lugar el flujo de permeado a través de las paredes de las membranas (figura 9).

2. ANTECEDENTES

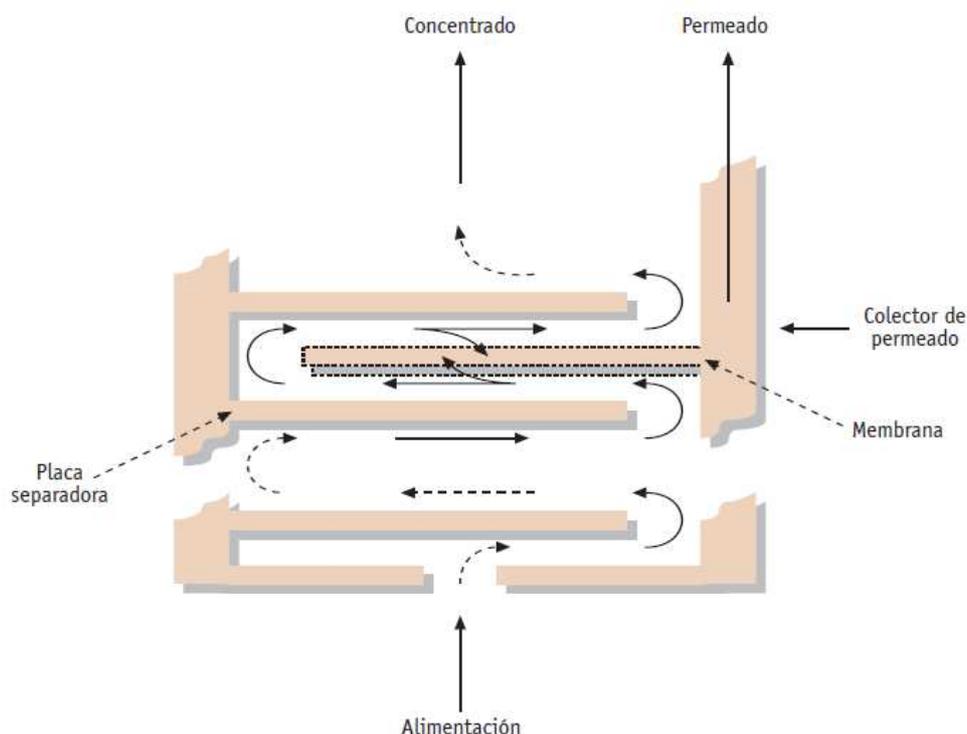


Figura 9. Fuente: Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006)

- ❖ *Módulos de membranas tubulares*, constituidos por carcassas cilíndricas que contienen un número variable de membranas tubulares. La alimentación se bombea por el interior de las membranas, produciéndose un flujo lateral de permeado a través de las paredes. La carcasa tiene los dispositivos adecuados para recoger los flujos de permeado y concentrado. Las membranas tubulares están constituidas por un soporte poroso de papel o fibra de vidrio sobre el que se deposita la superficie filtrante. También se construyen en materiales cerámicos. Los módulos tubulares suelen tener longitudes de 13 cm – 20 cm, con 4 – 6 membranas de 0.5 cm – 1 cm de diámetro, dispuestas en su interior. La velocidad de circulación de la alimentación por el interior de las membranas es de 2 m/s – 6 m/s, lo que se traduce en pérdidas de carga de 14 – 21 kPa por módulo. El consumo de energía de las plantas que utilizan este tipo de módulos es del orden de 0.8 – 2.5 kWh/100L permeado.
- ❖ *Modulo Plano*: Es el modelo más antiguo y sencillo. Se deriva de los modelos de filtro de prensa, la circulación de los líquidos se hace entre las placas, que se encuentran separadas por membranas planas. Pueden tener diversas formas como cuadradas, elipsoidales, circulares, ortogonales; estas membranas se colocan sobre un soporte de la misma forma para que les dé resistencia mecánica. Los módulos planos se pueden ensamblar de forma horizontal o vertical, estos módulos planos también se conocen como módulos de placa. Este tipo de modulo es el usado en diversos procesos entre ellos la Electrodialisis (Israel Medina Roa, 2007).

2. ANTECEDENTES

- ❖ *Módulos de membranas enrolladas en espiral*, estructura compleja donde una membrana en forma de “bolsa plana”, con un separador interno de las paredes de la membrana, se enrolla en espiral alrededor del tubo colector de permeado, con el que se une por la parte abierta de la “bolsa”. Las paredes exteriores de la membrana, que forman las espirales, se encuentran separadas por estructuras huecas que permiten que la alimentación discorra a través de ellas y que el permeado fluya, lateralmente, a través de las paredes de las membranas. Estos módulos suelen tener 20 cm de diámetro y 100 cm de largo con varias membranas enrolladas que proporcionan una superficie de membrana de 1 – 2 m² (figura 10).

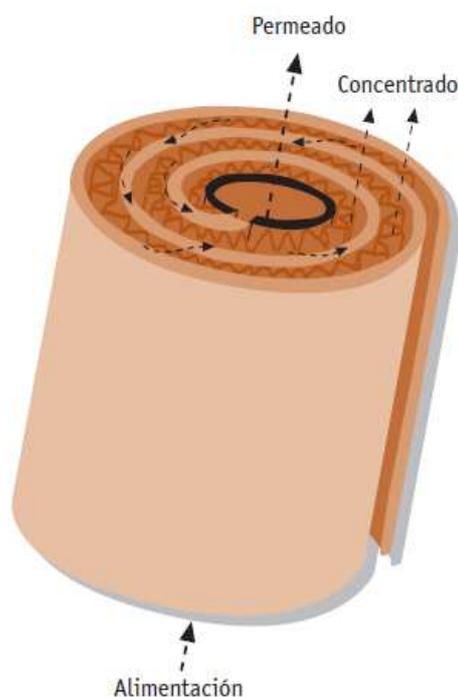


Figura 10. Fuente: Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006)

- ❖ *Módulos de membranas tipo fibra hueca*, estructuras semejantes a los intercambiadores de calor multitubulares, de 70 cm de longitud y 8 cm de diámetro donde se alojan 500 – 2000 membranas del tipo fibra hueca. Básicamente existen dos configuraciones, atendiendo a que la alimentación circule por el interior o el exterior de las fibras. La caída de presión en este tipo de módulos es de 0.7 bar – 70 bar, según el tipo de aplicación.

2. ANTECEDENTES

En la tabla 1 se recogen algunas de las características más significativas de este tipo de disposiciones.

Parámetros	Fibras huecas	Fibras capilares	Enrollado espiral	Placa-marco	Tubular
Costes de producción (US\$/m ²)	5-20	10-50	5-100	50-200	50-200
Control conc. polarización-ensuciamiento	Pobre	bueno	moderado	bueno	Muy bueno
Caída presión en zona de permeado	alta	moderada	moderada	baja	baja
Prestaciones altas - Presión de trabajo	si	no	si	si	marginal
Materiales específicos de membrana	si	si	no	no	no

Tabla 1. Características más significativas de las configuraciones de membranas.

Fuente: Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006)

2.1.3.3. Formas de operar

1) Filtración en línea

Las membranas se disponen en la línea de flujo del efluente que se desea tratar (alimentación), quedando las partículas contaminantes retenidas en el interior de las membranas y generándose una corriente depurada (permeado). Las membranas utilizadas son de tipo *filtro profundo* (figura 11).

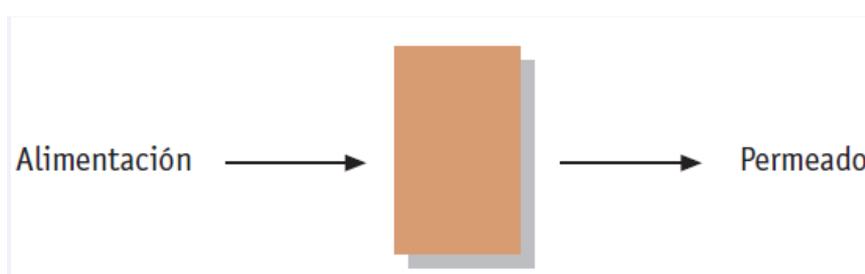


Figura 11. Fuente: Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006)

2) Filtración tangencial

El efluente que se desea tratar se hace circular tangencialmente a la membrana. Los contaminantes quedarán en la superficie de la membrana, siendo arrastrados por el flujo tangencial, evitándose el ensuciamiento de la membrana. Esta forma de operar genera a partir de la alimentación dos corrientes o flujos: *concentrado*, con una concentración de contaminantes mayor que en la alimentación, y *permeado*, con una

2. ANTECEDENTES

concentración de contaminantes que hacen posible su vertido o reutilización. Las membranas utilizadas son de tipo *tamiz* o *densas* (figura 12).

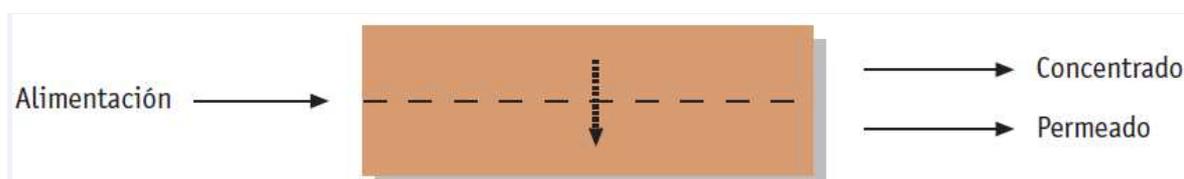


Figura 12. Fuente: Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al., (2006)

2.1.3.4. Factores que reducen las prestaciones de las membranas

El buen funcionamiento de una membrana se consigue cuando se mantiene el flujo de permeado (Jw) y el coeficiente de rechazo (R) dentro de las condiciones de diseño de la operación, o sea, sin grandes modificaciones en la diferencia de propiedad (presión, potencial eléctrico) que genera el flujo de permeado.

El *coeficiente de rechazo* (R_i), de un componente i que se desea excluir del permeado, es una forma de estimar el grado de separación conseguido por la membrana. Se define como la diferencia respecto a la unidad de la razón entre las concentraciones del componente i en el permeado (c_{ip}) y en la alimentación (c_{if}) (E1)

$$R_i = 1 - \frac{c_{ip}}{c_{if}}$$

El *flujo de permeado* (Jw) es el flujo de la solución que pasa la membrana, se expresa en la E2

$$\frac{\text{volumen permeado}}{\text{unidad superficie de membrana} * \text{unidad de tiempo}}$$

1) Polarización de la concentración

Es difícil evitar que los componentes de la alimentación rechazados por la membrana no se acumulen en su superficie. El resultado es la creación de gradientes de concentración (*polarización de la concentración*) en el lado de la alimentación, que pueden disminuir la eficiencia de separación de la membrana y el flujo de permeado.

2) Ensuciamiento

El ensuciamiento de la membrana es debido a la presencia en la alimentación de sustancias que pueden interactuar con ella, adsorbiéndose y/o precipitando en su

2. ANTECEDENTES

superficie o penetrando en su interior, en cuyo caso son adsorbidas en las paredes de los poros, reduciendo el diámetro de paso de estos. La consecuencia del ensuciamiento es una disminución del flujo de permeado, debido a una mayor resistencia de la membrana. Un aumento progresivo de la diferencia de presión transmembrana, con el fin de mantener el flujo de permeado, acelerará el proceso de ensuciamiento, pudiendo llegar a una situación irreversible de taponamiento de la membrana, lo que haría necesario su sustitución.

Esta forma de mal funcionamiento es dependiente del tiempo de trabajo de la membrana. La forma de corregirlo dependerá de las características del ensuciamiento. Así, en el caso de ensuciamiento en la superficie, un cambio en la dirección del flujo, bien en intervalos de tiempo definidos o en forma de pulsos, puede ser suficiente para eliminar el problema. En otras situaciones como ensuciamiento en el interior de la membrana o deposiciones persistentes en la superficie, será necesario en empleo de productos químicos de limpieza.

2.1.4. Panorama actual de desalación en el mundo

2.1.4.1. Evolución histórica

Según Carlos de la Cruz (2006) la primera patente sobre desalación data de 1675. En el año 1717 un médico francés llamado Gauthier construyó el primer aparato de destilación destinado a la desalación de agua de mar, basado en el alambique, ya conocido en la Edad Media¹¹. La primera planta industrial data del año 1872, cuando Carlos Wilson construyó en Chile una planta de destilación solar de 22,5 m³/día sobre una superficie de 4.757 m². A comienzo del siglo XX se construyeron las primeras plantas portátiles para asegurar el abastecimiento de agua a las tropas en guerra (Zarza, 1999).

Por otra parte, los primeros procesos de implantación industrial se basaron en la tecnología de evaporación, denominada destilación súbita multietapa (MSF), que tiene su origen en 1957, y que evolucionó en los años setenta hacia los procesos de destilación multiefecto (MED) y compresión de vapor (CV). Asimismo, el proceso de electrodiálisis (ED) data de 1954, si bien fue en los años setenta cuando experimentó un gran avance con la reversibilidad del proceso (EDR).

Finalmente, con el desarrollo de una membrana artificial semipermeable, utilizando acetato de celulosa, Loeb y Sourirajan abrieron las puertas en los años setenta a los procesos de desalación por ósmosis inversa (OI), que alcanzaron su madurez tecnológica en los años ochenta para aguas salobres, y en los noventa para agua de mar.

Según Miguel Torres Corral (1998) las primeras instalaciones desaladoras se construyen al principio de los años cincuenta. Los precios bajos de los combustibles fósiles marcan la tendencia en el desarrollo de las primeras plantas desaladoras, todas ellas de evaporación.

2. ANTECEDENTES

Son instalaciones de gran consumo de energía, aunque baratas de primera instalación. El incremento de la capacidad instalada hasta 1970 es muy bajo, siendo el total instalado al final de este año 1.700.000 m³/día.

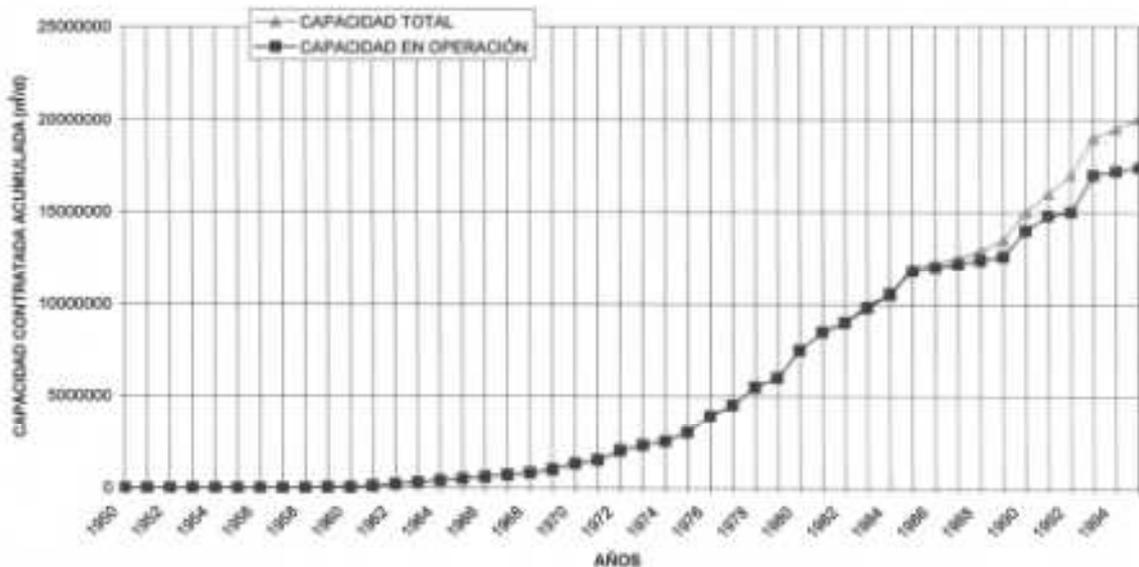


Figura 13. Capacidad total de desalación en el mundo. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

Tras la crisis del petróleo del año 1973, se produce un fenómeno muy interesante. El incremento del precio de los combustibles provoca por una parte una mejora de la economía de los países de la OPEP que les permite hacer grandes inversiones en construcción de desaladoras, y por otra, obliga a optimizar el diseño de los evaporadores para obtener mejores rendimientos y abaratar el agua. Se busca el mínimo coste que será el mínimo de la suma de inversión más explotación.

Las grandes inversiones de los países de la OPEP en el mercado de la desalación, crean un volumen de recursos hídricos muy importante que permite dar origen a diversos núcleos urbanos donde se asienta la población nómada. La disponibilidad de recursos hídricos, procedentes de la desalación del agua de mar, tanto para abastecimiento como para la industria e incluso alguna agricultura, cambió de forma apreciable la faz de estos países.

Los avances del diseño permiten contrarrestar la subida del precio de los combustibles, al rebajar el consumo específico, haciendo que pueda extenderse la desalación a otras zonas carentes de recursos energéticos. Tal es el caso de España, Italia y otros. Este proceso de avance de la capacidad instalada sigue hasta mediados de los años ochenta. Es el momento en que se produce otra nueva crisis del petróleo que en este caso opera al revés de la anterior en cuanto al crecimiento de la capacidad contratada.

2. ANTECEDENTES

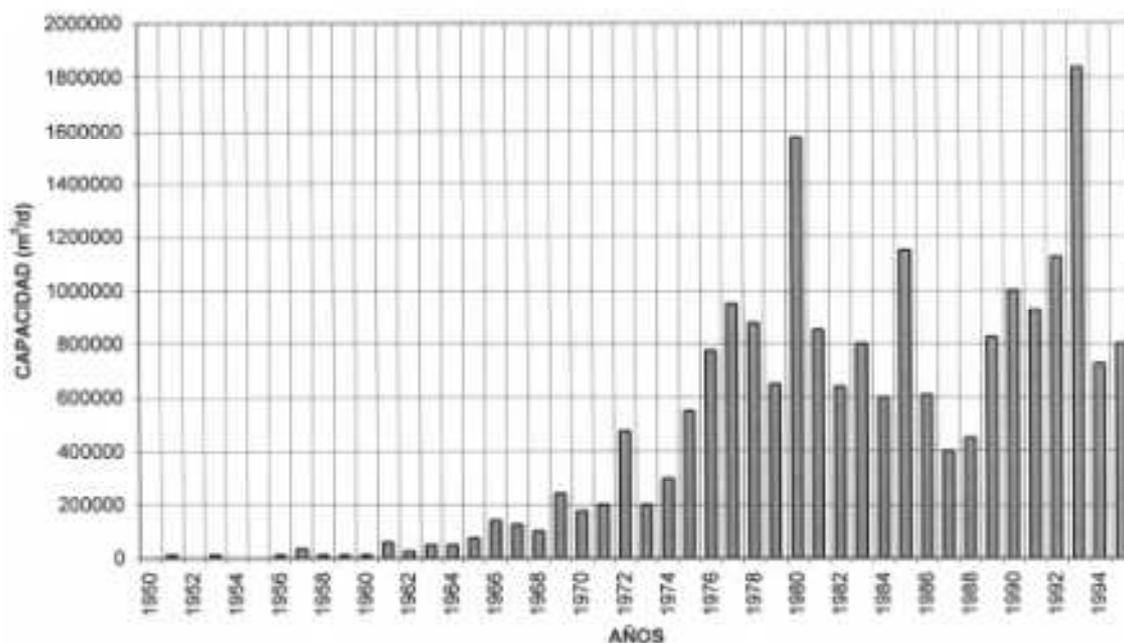


Figura 14. Capacidad anual de desalación. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

Los países más industrializados abren un camino de diversificación de fuentes energéticas (gas, carbón, nuclear) a la vez que se sigue avanzando en la rebaja de los consumos de energía.

Esto redundaba en la menor demanda de crudo, que repercute en la disminución de las inversiones en desalación durante los años 86 a 88. La crisis de estos años obligó a los países de la OPEP a establecer cuotas de producción como única forma de evitar una caída incontrolada del precio del crudo. Desde estas fechas hasta hoy la contratación ha seguido una tasa de crecimiento estable aunque más moderado, alcanzándose en la actualidad la cifra de 20 hm³/día como capacidad total instalada. La capacidad total en producción es algo inferior, alcanzando la cifra de 17 hm³/año.

Como complemento a la curva de capacidad total instalada es interesante observar estos altibajos de la capacidad anual contratada, debidos a la cambiante coyuntura económica, ligada a los precios del petróleo. Hasta principio de los años 60, la mayoría de las plantas eran del sistema de evaporación en etapas múltiples (MSF) y algunos de multiefecto en tubos verticales. Ambos procesos proceden de los rudimentarios destiladores que se instalaban en los barcos para evitar los tanques de reserva, liberando espacio para el pasaje y las mercancías.

Al principio de los años 70 empiezan a aplicarse las membranas de ósmosis inversa, pero sólo en aguas salobres. Aún no pueden producir grandes rechazos de sales ni soportar las presiones requeridas para agua de mar. Este hecho va a significar un auge importante en los años siguientes y todo debido al menor consumo energético y por

2. ANTECEDENTES

tanto el menor coste del agua desalada. Es importante contrastar el crecimiento de la capacidad anual de desalación en agua de mar (Fig. 15) y de agua salobre (Fig. 16).

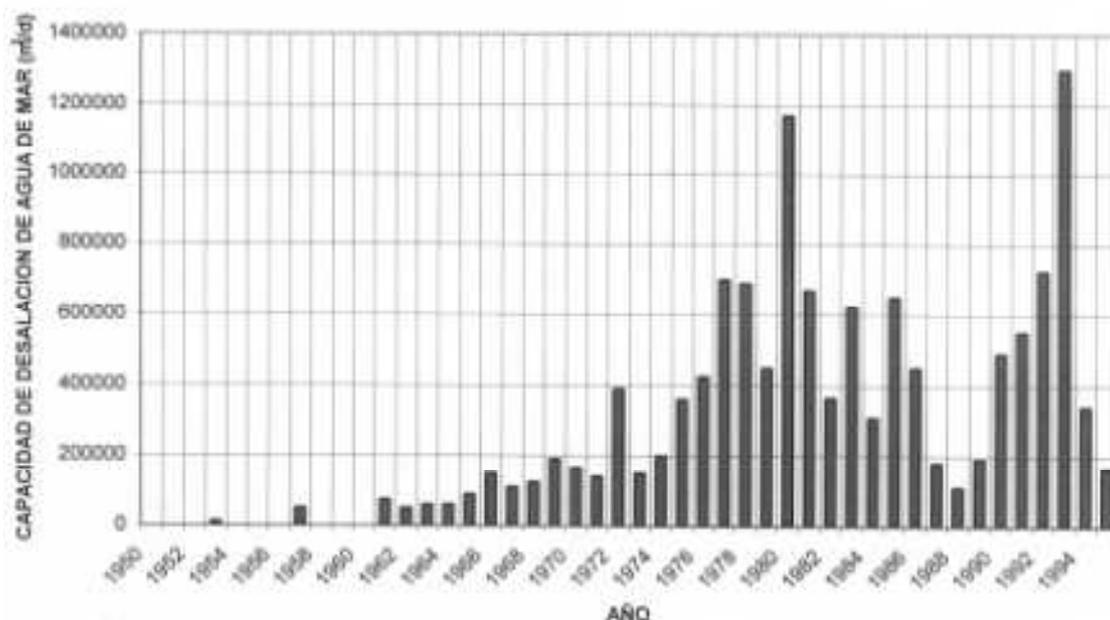


Figura 15. Capacidad anual de desalación de agua marina. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

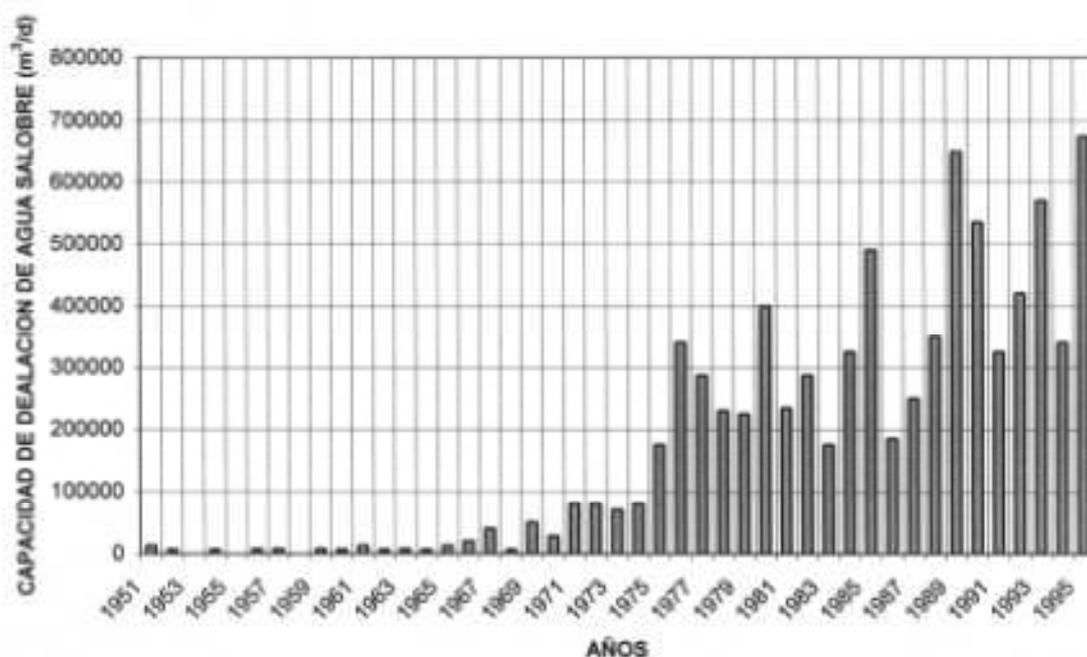


Figura 16. Capacidad anual de desalación de agua salobre. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

A partir de los años 80 se produce el gran despegue de la ósmosis inversa aplicada a agua de mar. Esto abre unas posibilidades aún no agotadas, puesto que, como ya se ha dicho anteriormente, el proceso está aún lejano de su techo tecnológico. Debido al avance tecnológico que supone esta nueva tecnología, se rebajan inicialmente a menos de la mitad los consumos específicos.

2. ANTECEDENTES

De 14 kWh/m³ de los procesos de evaporación más eficientes se baja a menos de 4 kWh/m³ en las últimas y más eficientes instalaciones españolas, sin duda alguna de los más eficientes del mundo.

Este cambio supone la extensión de la desalación a ciertas zonas que antes no habían contado con este recurso y la sustitución de las antiguas instalaciones, que han ido quedando obsoletas por su elevado consumo. Por eso se observa en la figura 13 de la curva de capacidad total instalada que a partir del año 80 se empiezan a despegar las curvas de capacidad total y la de capacidad de operación. Las antiguas instalaciones quedan como reserva pero dejan de operar en continuo.

2.1.4.2. Geografía de la desalación

En sus inicios la actividad desaladora está localizada en Europa y América del Norte. En los ochenta, los Países árabes y los japoneses dominaron el mercado, mientras que, en la actualidad, Europa ha retomado su posición aunque sin llegar a la actividad de los Países Árabes, tanto del Mediterráneo como del Oriente Medio.

Por países, Arabia Saudita ocupa el primer lugar con un 24,4% de la capacidad mundial instalada. España, ocupa el noveno lugar detrás de Países Árabes, Estados Unidos, Japón y la antigua Unión Soviética con un 2,4% de la capacidad mundial.

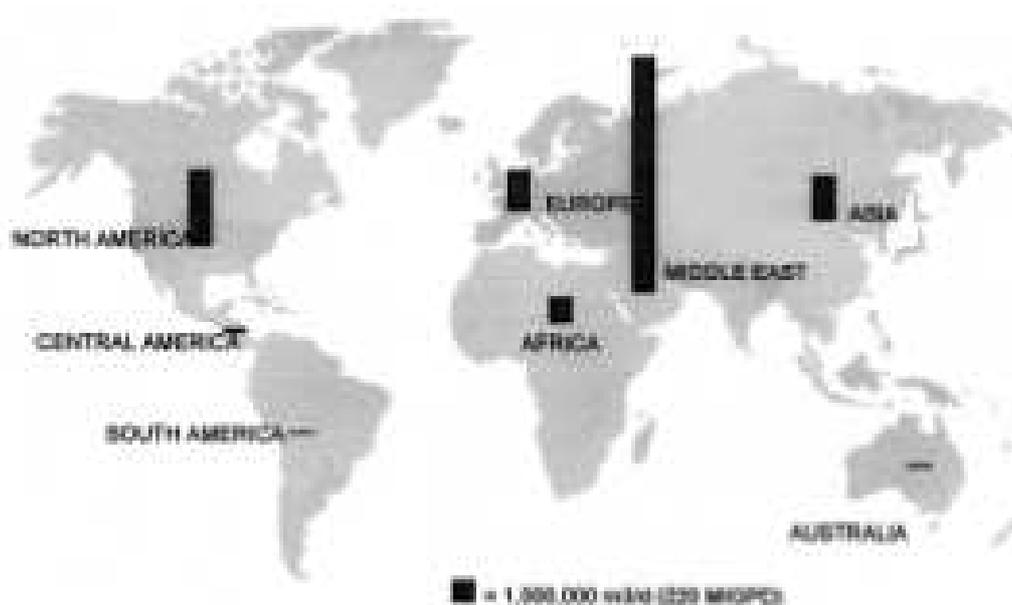


Figura 17. Capacidad de desalación por regiones. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

En cuanto al número de unidades instaladas, el primer lugar lo ocupa Estados Unidos seguido de Arabia Saudita, lo cual significa que, el tamaño medio de las unidades instaladas en Estados Unidos es pequeño. España ocupa el quinto lugar en cuanto

2. ANTECEDENTES

unidades, lo que significa que, también, nuestras plantas son de tamaño pequeño en general. No obstante, las últimas inversiones han sido en plantas de gran tamaño.



Figura 18. La desalación en el mundo. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

2.1.5. La desalación en España

2.1.5.1. Las grandes cifras de la desalación

Según Miguel Torres Corral (1998) España presenta una acusada variabilidad hidrológica. Muchos problemas derivados de la escasez de recursos hídricos tienen su origen en la distribución irregular de las precipitaciones, tanto en el espacio como en el tiempo. Siendo la precipitación media anual de 670 mm existen áreas en el norte con precipitación media de 1.500 mm, mientras que en la cuenca del Segura la media es inferior a 380 mm. En Canarias la precipitación media es de 360 mm mostrando a su vez el archipiélago una fuerte variabilidad entre las islas occidentales y orientales, alcanzando Lanzarote uno de los valores más bajos de España con una precipitación media de 140 mm.

Las necesidades totales de agua para abastecimiento urbano se evalúan en 4.500 Hm³/año, lo que representa cerca del 15% de los usos consuntivos. Esto representa una dotación de 328 litros/hab.día en municipios entre 20.000 y 50.000 habitantes y de 295 litros/hab.día en grandes áreas metropolitanas. Son datos de la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento.

La población turística se evalúa en 7 millones de habitantes equivalentes lo que representa un 20% de la demanda total urbana. Si tenemos en cuenta que la mayor población turística se localiza en las costas mediterráneas y los archipiélagos, donde son menores los recursos hídricos y además coincide su estancia con el período de

2. ANTECEDENTES

menores precipitaciones, tendremos el marco que define y justifica la ubicación de las desaladoras españolas.

La producción total actual de agua desalada llega a 153,20 hm³ /año de los cuales 74,64 hm³/año corresponden a agua salobre y 78,58 hm³/año a agua de mar.

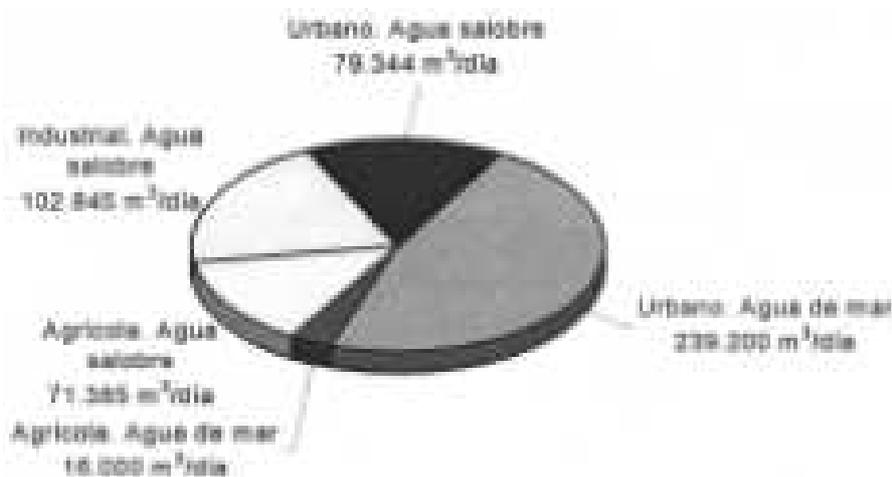


Figura 19. La desalación en el mundo. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

Con estas cifras el agua desalada representa en España el 0.4% del uso consuntivo y el 3.3% del consumo urbano. La población total abastecida con agua desalada es de 2.1 millones de personas. Estos valores, considerados en su conjunto no son aparentemente muy significativos.

La modestia de las cifras porcentuales respecto al total nacional no refleja la importancia que representa allí donde se aplica la desalación, como se verá a continuación. En las islas de Lanzarote y Fuerteventura la desalación de agua de mar permite el abastecimiento del 100% de la población autóctona y turística y en Gran Canaria representa el 80%. Lanzarote y Fuerteventura puede decirse que no tienen otros recursos hídricos disponibles que los obtenidos mediante desalación del agua de mar. En este recurso no convencional se ha basado el importante desarrollo turístico alcanzado en los últimos veinte años.

En Gran Canaria los recursos hídricos superficiales que recogen los embalses suponen 12 hm³/año como cifra media. El agua desalada de origen marino alcanza en la isla la cifra de 36 hm³/año, por tanto 3 veces superior a los recursos superficiales. El principal uso del agua desalada es el abastecimiento urbano y una parte pequeña y excepcional para uso agrícola. La desalación de agua salobre para uso agrícola, industrial y urbano alcanza proporciones parecidas entre ellos.

2. ANTECEDENTES

2.1.5.2. Evolución de la desalación

La desalación se introdujo en España en los años 50. Aquellas primeras instalaciones desaladoras, algunas ya desmanteladas, se ven hoy casi con aspecto arqueológico pero fueron las que abrieron este camino de suma importancia, allí donde se ha utilizado. Produjeron un cambio cualitativo fundamental, en la calidad de vida de los usuarios. Fue en Lanzarote y Fuerteventura e inmediatamente en Gran Canaria y Ceuta en el año 70 donde se construyeron las primeras desaladoras basadas en el proceso de evaporación. Desde entonces la desalación ha evolucionado en España de forma continua.

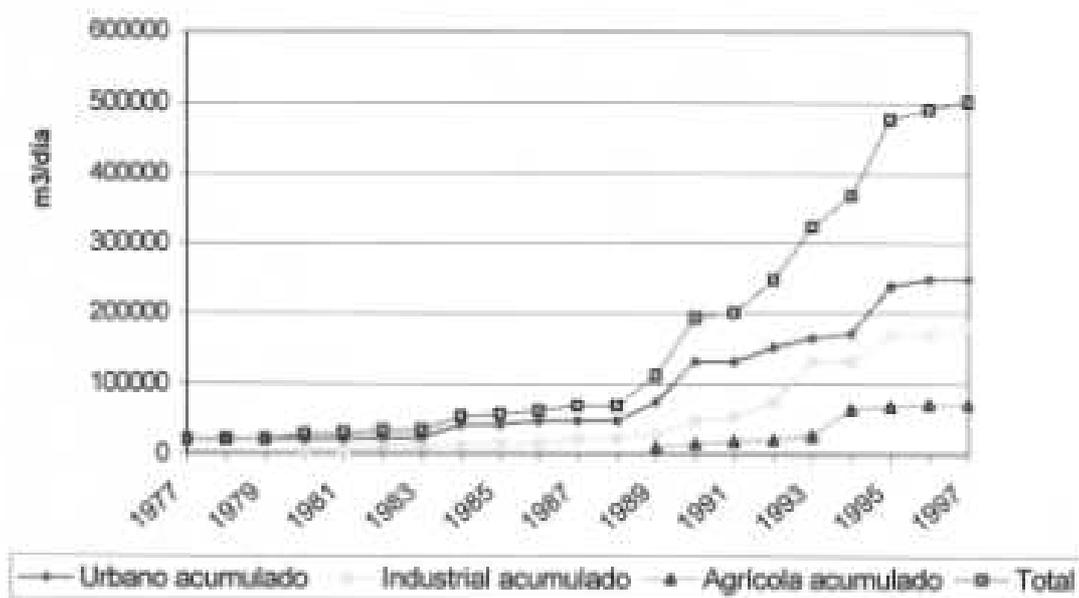


Figura 20. Evolución de la desalación en España. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

La evolución tecnológica seguida en el mundo tiene su perfecto reflejo en España. Hasta 1980 la tecnología dominante es la evaporación y más en concreto el sistema MSF (Evaporación Súbita Multietapa). En este primer período cabe incluso distinguir dos etapas distintas:

1965 – 1973 Instalaciones de menor inversión y mayor consumo energético

Corresponden a esta época las siguientes instalaciones como más importantes, algunas ya fuera de servicio y sustituidas por otras más eficientes.

1965	Termolanza * (Lanzarote) Ceuta I +	2.000 m ³ /día MSF
1970	Fuerteventura I +	4.000 m ³ /día MSF
1969	Las Palmas I	2.000 m ³ /día MSF
1970		20.000 m ³ /día MSF

Tabla 1. Instalaciones existentes de 1965 a 1973. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

2. ANTECEDENTES

1973 –1980 Instalaciones de mayor inversión y menor consumo energético

La subida de precios de los combustibles del año 1973 hace que se cambien los diseños de los evaporadores, incrementando la superficie de transferencia de calor para rebajar el consumo de energía. A este período pertenecen las siguientes instalaciones como más importantes.

1976	Lanzarote I +	5.000 m ³ /día MSF
1977	Riotinto * (Lanzarote)	2.500 m ³ /día MSF
1978	Fuerteventura II *	2.000 m ³ /día MSF
1980	Carboneras (Almería)	2.200 m ³ /día MSF
1980	Las Palmas II	18.000 m ³ /día MSF

(*Instalaciones fuera de servicio)

Tabla 2. Instalaciones existentes de 1973 a 1980. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

1980 -1990 La convivencia de la Evaporación y la Ósmosis Inversa

A partir de 1980 aparece con fuerza el proceso de Ósmosis Inversa aplicando al agua de mar. Este hecho revolucionará en gran medida el panorama de la desalación. Las membranas, aplicadas hasta entonces al agua salobre, mejoran sus características y permiten su aplicación con agua de mayor concentración de sales. Las instalaciones más importantes de este período son:

1987	Lanzarote II	7.500 m ³ /día O.I.
1989	Las Palmas II	36.000 m ³ /día O.I.
1990	Fuerteventura III	5.000 m ³ /día O.I.

Tabla 3. Instalaciones existentes de 1980 a 1990. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

En este período también destacan dos importantes instalaciones de agua salobre.

1987	Maspalomas I (Las Palmas)	10.000 m ³ /día EDR
1990	Denia (Alicante)	16.000 m ³ /día EDR

Continuación tabla 3. Instalaciones existentes de 1980 a 1990 Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

Cabe destacar al principio de esta década los esfuerzos por mejorar los rendimientos de los procesos de evaporación. Se realizan varias plantas piloto pero aunque se rebajan los consumos energéticos, no llegan a poder competir con la ósmosis, por lo que esta última termina por imponerse.

2. ANTECEDENTES

1990 - 1997 El predominio de la Ósmosis Inversa

En estos años, en todo el mundo, pero especialmente en España, se impone la Ósmosis Inversa como tecnología más aconsejable por la disminución del coste del agua desalada obtenida por este proceso. En la búsqueda por disminuir el consumo de energía, España ocupa un lugar muy destacado. En el Congreso Mundial de Desalación de la IDA (International Desalination Association) celebrado en Madrid en Octubre de 1997 pudo verse que las desaladoras españolas habían alcanzado los consumos energéticos más bajos del mundo. Hay que destacar en este período las instalaciones siguientes:

1990	Lanzarote III	20.000 m ³ /día O.I.
1990	Maspalomas II (Las Palmas)	15.000 m ³ /día O.I.
1993	Sureste Gran Canaria	10.000 m ³ /día O.I.
1994	Arucas (Las Palmas)	4.000 m ³ /día O.I.
1995	Ibiza	7.500 m ³ /día O.I.
1996	San Antonio (Ibiza)	7.000 m ³ /día O.I.
1997	Costa del Sol (Málaga)	55.000 m ³ /día O.I.
1997	Ceuta II	16.000 m ³ /día O.I.
1997	Adeje Arona (Tenerife)	10.000 m ³ /día O.I.

Tabla 4. Instalaciones existentes de 1990 a 1997. Fuente: Miguel Torres Corral (1998)

Según Carlos de la Cruz (2006) en el año 2004 la producción total de agua desalada en España en el año 2004 fue 1,4 hm³/día, duplicando la producción del año 2000. Esta cantidad ha sido producida por 900 plantas, la mayoría de reducido tamaño, que aportan del orden del 2% de los recursos hídricos disponibles, mientras que el agua reutilizada aporta el 1,25%. En su conjunto, la desalación de agua de mar supone el 47,1% del agua total desalada, con 100 plantas en funcionamiento; el resto corresponde a la desalación de aguas salobres procedentes de pozos y acuíferos.

Existen 14 plantas con una capacidad superior a 20.000 m³/día. En cuanto a su destino, el 55% del agua desalada se utiliza para uso doméstico, el 18,5% para uso industrial, el 3,6% para uso turístico y el 22,4% para uso agrícola.

Como un caso excepcional que demuestra la capacidad de las plantas de desalación para el abastecimiento de agua en España, hay que destacar a las islas Canarias, que tienen 253 plantas de desalación con una capacidad total de 315.000 m³/día, lo que supone el 25% del agua consumida en las islas (en el caso de Lanzarote y Fuerteventura el porcentaje de agua desalada es superior al 80%).

2. ANTECEDENTES

2.1.5.3. Planificación hidrológica y desalación

La desalación es una tecnología plenamente dominada y consolidada. Puede por tanto encomendarse a ella la solución del problema de la escasez de recursos hídricos. Teóricamente podría compensarse cualquier déficit mediante desalación. Para la planificación hidrológica es de suma importancia definir el papel que se asigna a cada uno de los recursos (agua superficial, subterránea, desalación o reutilización) y la forma de atender las demandas. La desalación de agua de mar es una forma clara de incrementar los recursos disponibles.

Dicho esto, debe estudiarse con sumo cuidado dónde, cuándo y cuánta agua desalada se incorpora en el sistema. Una planta desaladora puede ser una solución magnífica dentro de un sistema hidráulico, pero también puede convertirse en un serio problema. En España tenemos muchos ejemplos de lo primero, pero también tenemos algunos de lo segundo. En ciertos casos la desalación se puede contemplar como una solución de emergencia e incluso como garantía de suministro en zonas muy sensibles (áreas turísticas y densamente pobladas), pero siempre debe ocupar su puesto en la planificación con este carácter de garantía.

Para incorporar correctamente la desalación de agua de mar en el planeamiento hidrológico, se debe responder antes a las siguientes preguntas que, en apariencia sencilla, no siempre son fáciles de contestar.

1. Cuánto cuesta el agua desalada
2. Cuánta agua se debe desalar
3. Para qué usos debe emplearse el agua desalada

El coste del agua desalada suele estar en muchos casos enmascarado entre subvenciones y beneficios cruzados con otros productos, en especial la energía. En España, después de largas discusiones, se ha llegado a determinar cuál es el verdadero coste de agua desalada. Una vez imputados de forma correcta todos los consumos (energía, personal, productos químicos y otros) y la amortización correspondiente, el coste real oscila en el entorno de 0,35 euros/m³, para instalaciones de gran tamaño (más de 50.000 m³/día. Esta cifra puede incrementarse algo para plantas más pequeñas por efecto de la economía de escala. Una correcta distribución de los costes parciales sería: 42 %amortización, 45% energía y 13% personal, productos químicos y otros.

El coste del agua desalada es sin duda el más alto al que hoy se puede disponer del recurso agua. La comparación con los métodos convencionales de regulación y

2. ANTECEDENTES

conducción o con las aguas subterráneas, siempre es desfavorable a la desalación. Dicho esto también debe señalarse que el coste del agua desalada ha sido y seguirá siendo decreciente mientras que el de los otros recursos convencionales ha sido y seguirá siendo creciente. ¿Podría pensarse que un día se igualaran?. Hoy están muy lejanos pero igual que en otros lugares se ha demostrado que la desalación era el método más barato frente a conducciones complejas y largas, en España puede llegar ese momento, aunque no en un futuro inmediato.

La pregunta sobre los usos del agua desalada guarda mucha relación con el coste de la misma. Si sentamos el principio de que el agua no debe recibir subvenciones ni directa ni indirectamente, será la rentabilidad económica de la actividad a la que se dedica la que marque si puede o no pagar el precio del agua. La agricultura extensiva no puede pagar el precio del agua desalada. La agricultura intensiva, en algunos pocos casos de productos de alto valor añadido, ha obtenido rentabilidad regando con agua desalada.

El uso industrial y sobre todo el abastecimiento urbano sí puede pagar el precio del agua desalada. Canarias es un buen ejemplo que demuestra que se puede afrontar el desarrollo de una zona carente de recursos basado exclusivamente en la desalación de agua del mar. La falta de agua y no el precio de la misma era la causa del subdesarrollo de las islas orientales. Una vez garantizado el abastecimiento se ha seguido una línea ascendente de desarrollo que aún continúa. Es sin duda un ejemplo a tener en cuenta en la planificación futura en España para zonas con problemas similares.

Para saber cuánta agua deberíamos desalar es necesario saber qué franja del déficit hídrico, correspondiente a los usos asignados, queremos cubrir mediante desalación. La demanda para estos usos deberá ser la que marque la cantidad de agua que debemos desalar. En este aspecto se debe resaltar como muy positivo el buen ajuste obtenido en España entre la demanda y la oferta de agua desalada. Esto ha permitido dos logros muy importantes por su repercusión directa en la bajada del coste (Miguel Torres Corral. 1998).

- ✓ Altos factores de utilización de las instalaciones, minimizando así los costes fijos.
- ✓ Incorporación de los avances tecnológicos cuando ha habido que incrementar la producción.

2.1.6. Aspectos energéticos de la desalación

La ósmosis inversa es el método más extendido a la hora de desalar agua salobre. En este apartado se va a ver la diferencia tanto de precio como de energía que hay entre

2. ANTECEDENTES

la ósmosis inversa y la electrodiálisis reversible poniendo como ejemplo la desalación en las Islas Canarias.

En este lugar la mayor parte de las plantas se han decantado por la ósmosis inversa. En un estudio publicado por Zarzo et al. (2009) se analiza el comportamiento de 3 plantas de OI con capacidades medias comprendidas entre 6.000-25.000 m³/día (Drenajes, Cuevas de Almanzora y Mazarrón), con alimentaciones con una concentración de 9.000-20.000 mg STD/l. En general, con un pretratamiento convencional (tratamiento físico/químico- filtro de arena-filtros de cartuchos), se obtienen unos consumos energéticos de 1,2 Kwh/m³ y unos costes de operación de 0,25-0,3 €/m³.

En la asignación de costes, la energía eléctrica supone la mayor incidencia en el precio final, situándose en torno al 50-60% del coste total, en segundo lugar la reposición de membranas y mantenimiento puede estimarse en torno al 15-25% del coste total, los reactivos del 10-20%, y el resto en consumibles y otros gastos. A estos costes hay que añadir los de impulsión del agua desde los pozos, que pueden suponer un coste significativo.

Respecto a la electrodiálisis reversible, en las islas Canarias, concretamente en la isla de Tenerife, existe una amplia experiencia en su utilización. Su implantación a principios de la década de los noventa se debió principalmente a las limitaciones de espacio disponible, a los niveles altos de bicarbonatos (>1.000 mg/l) y sílice existentes (>60 mg/l), y a factores económicos principalmente asociados a la gestión de la salmuera. Las plantas tienen capacidades comprendidas entre 2.000 y 12.000 m³/día, con un rechazo medio de un 15,8%, un consumo promedio de 0,8-1,1 Kwh/m³ y unos costes de operación de 0,10-0,20 €/m³.

Como se puede apreciar, la implantación de la EDR conlleva un ahorro energético importante, en gran parte, debido a la ausencia de bombeo de la salmuera gracias al gran rendimiento que ofrece este método al contrario que en la OI cuyo rendimiento es en torno al 45%, lo que origina salmuera de rechazo la cual necesita ser bombeada al inicio del proceso para su desalación. Además, este ahorro energético supone un ahorro también económico.

2.1.7. El uso de las energías renovables en la desalación

2.1.7.1. Evolución histórica

Según Carlos de la Cruz (2006) las energías renovables se pueden clasificar, según su procedencia, en biomasa, biocombustibles, hidráulica, eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica y marina (mareas y olas). Su duración está unida a la vida de

2. ANTECEDENTES

nuestro planeta y su disponibilidad no es controlable por el ser humano, ya que depende de las condiciones climáticas, que son factores externos a la demanda. Por otra parte, las fuentes de energía primaria no renovable o convencionales son el petróleo, el gas natural, el carbón y la energía nuclear, cuya duración depende del agotamiento de las materias primas.

Su aprovechamiento por parte de la humanidad se remonta a varios miles de años a.C., con el uso de espejos curvados que concentraban la radiación solar para iniciar un fuego o con la utilización de velas para navegar.

Aunque parezca extraño, las crisis energéticas por la escasez de combustibles se han sucedido desde el siglo V a.C. en Grecia, lo que ha impulsado desde entonces el desarrollo de tecnologías de explotación de recursos renovables. Estas etapas de desarrollo sostenible han estado seguidas de períodos de olvido, cuando se ha encontrado otra fuente energética de bajo coste y de mayor eficiencia. La última crisis energética importante ha sido la del petróleo en el período entre 1973 y 1979.

Sin lugar a dudas, se puede considerar a la segunda mitad de los siglos XIX y XX como las épocas de mayor ruptura y avance tecnológico en las energías renovables, derivadas del desarrollo de la electrotecnia y la electrónica, potenciada con el desarrollo de las tecnologías de los materiales y la aerodinámica.

Simplificando muchísimo la historia de estas energías, cabría destacar el desarrollo de los molinos de viento en los siglos XII y XIII para producir energía mecánica, y habría que esperar hasta finales del siglo XIX para que el americano Brush generara electricidad (12 kW en corriente continua). En Europa, La Cour inició el desarrollo eólico, y posteriormente Juul, en los años cincuenta, logró generar corriente alterna. Los avances se han ido sucediendo hasta conseguir potencias del orden del megavatio.

En el desarrollo de la energía solar térmica se puede distinguir una primera etapa basada en la concentración de la energía con espejos. Hasta el siglo XVIII no se puede hablar de captador plano o cajas calientes solares, inventadas por Saussure, que se basan en la capacidad del vidrio para retener calor. En paralelo a este descubrimiento se desarrollaba la óptica como una rama de la física, llegando a conseguir Lavoisier fundir platino con un sistema de lentes que concentran la radiación. En el siglo XIX, Mouchot inventó la primera máquina solar con reflectores cónicos, que fue perfeccionada posteriormente por otros técnicos, aunque la comercialización tuvo poco éxito.

Un cambio significativo en el aprovechamiento de la energía solar llegó con el descubrimiento del efecto fotovoltaico por Becquerel en el siglo XIX, estudiado por Hertz en los sólidos y con el que Einstein obtuvo el premio Nobel en 1921. Los años

2. ANTECEDENTES

cincuenta supusieron el despegue tecnológico de las celdas fotovoltaicas con el desarrollo de los semiconductores, que en 1958 fueron aplicadas al satélite Vanguard para suministrar energía. Desde entonces, se han ido produciendo mejoras de eficiencia muy significativas.

En España cabe destacar dos hitos significativos en la implantación de las energías eólica y fotovoltaica, que se producen en los años ochenta con la instalación de los primeros aerogeneradores en Tarifa y la Plataforma Solar de Almería. Desde entonces, en 30 años, se ha generado en nuestro país un tejido industrial bastante sólido. En la actualidad, desde el punto de vista comercial, la energía eólica es mucho más competitiva que la energía solar, que se encuentra todavía en fase de investigación para suministrar potencias elevadas, tanto por la necesidad de espacio y la inversión requerida por unidad de potencia, como por el rendimiento energético de las plantas.

2.1.7.2. La importancia de las energías renovables entre las fuentes de energía primaria

Todavía hoy una cuarta parte de la población en el mundo no tiene acceso a la electricidad. El 80% de las personas sin electricidad vive en zonas rurales, principalmente en el sur de Asia y en África Subsahariana. Las energías renovables pueden ser una opción para estas zonas aisladas de la red eléctrica.

Por motivos de claridad, se realizan las conversiones de las distintas unidades de energía a toneladas equivalentes de petróleo (tep). El consumo mundial de energía primaria en el año 2000 alcanzó los 9.980.000 ktep. Los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) constituyeron el 81% de la energía consumida²⁶, mientras que las energías renovables tuvieron un peso del 13%.

En España, el consumo de energía primaria en el año 2004 fue de 142.056 ktep, un 4,1% más que en el año 2003. El grado de autoabastecimiento de energía primaria fue del 23%, que corresponde a la totalidad de la energía nuclear y de la energía renovable y a una tercera parte del carbón consumido (Figura 21).

2. ANTECEDENTES

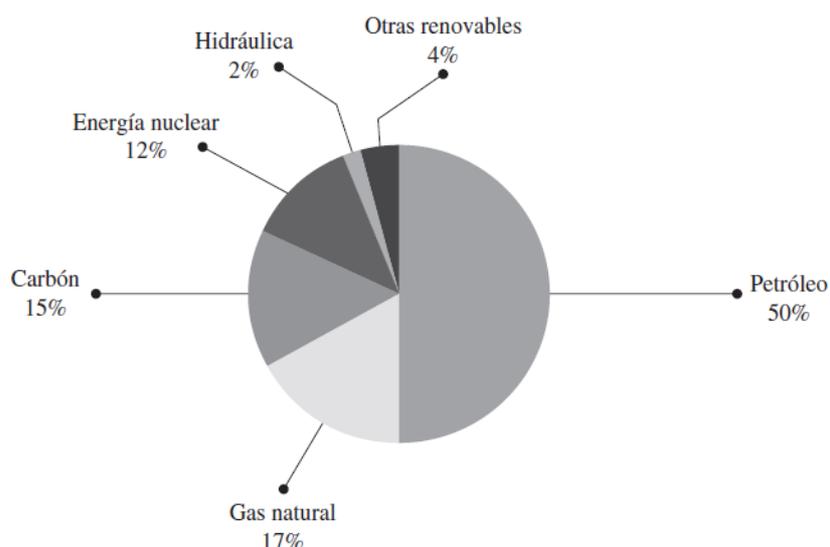


Figura 21. Consumo de energía primaria en España. Fuente: Carlos de la Cruz (2006)

La energía primaria se procesa y se transforma para obtener productos derivados del petróleo (gasolina, gasóleo, fueloil), distintas fracciones de gas (butano, propano, etc.) y electricidad. Estas energías finales son consumidas por la industria (36%), el transporte (36%) y resto de usos (28%).

Dado que las plantas de desalación necesitan energía eléctrica, se dedica una mayor atención a este sistema de generación, que produjo un total de 261.108 GWh en España en el año 2004, con una potencia instalada de 70.003 MW. En relación con los siguientes gráficos sobre la potencia instalada en el sistema eléctrico y la energía generada atendiendo a la fuente de energía primaria, es interesante diferenciar las centrales que funcionan de forma continua, como las nucleares y las de carbón, de aquéllas que operan discontinuamente por la indisponibilidad de energía primaria (energías renovables), o porque atienden sólo los picos de demanda de energía. La energía nuclear, con un 9% de la potencia total instalada, genera el 23% de la energía eléctrica; y en el lado opuesto, la energía eólica, con una potencia instalada similar, sólo genera el 5% de la energía eléctrica (Figura 22).

2. ANTECEDENTES

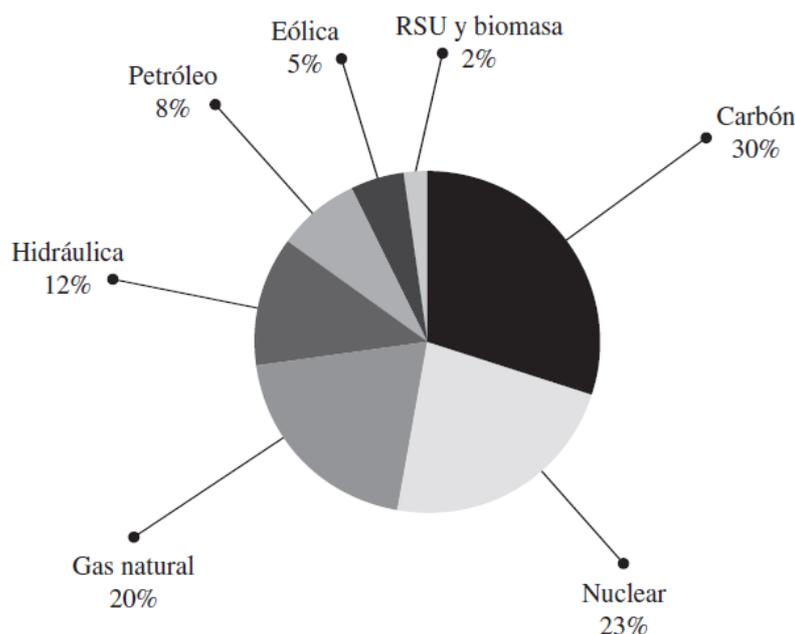


Figura 22. Generación eléctrica en España. Fuente: Carlos de la Cruz (2006)

Las plantas de generación tienen unos factores de escala que resultan clave a la hora de estudiar la viabilidad económica de un tipo de energía frente a otra. En la tabla 1 del anexo 3 se muestran las dimensiones típicas de una planta de generación eléctrica, la inversión media que necesita (Vivar, 2004) y la contribución a la generación de energía de cada tipo de central, en número de horas equivalentes (funcionamiento a la potencia nominal de la planta). Por ejemplo, una única central nuclear podría generar en una hora 1.300.000 kWh de energía y estar operativa 8.075 horas al año, mientras que un aerogenerador de última generación podría generar cada hora 2.000 kWh a la máxima capacidad y estar operativo unas 2.000 horas equivalentes al año, lo que implica que para generar la misma energía que una central nuclear serían necesarios 2.600 aerogeneradores.

La disponibilidad de energía primaria para atender la demanda es una diferencia fundamental entre las energías convencionales y las energías renovables. Una central de tipo renovable, por ejemplo, no podrá generar si en ese momento no hay viento para mover las palas de un aerogenerador; o si fuera de noche no se podría producir energía fotovoltaica y, por lo tanto, el número de horas efectivas en funcionamiento será inferior a una central de tipo convencional, que cuenta con almacenamiento de energía primaria (carbón, petróleo o gas) para cuando se necesite. Hay que señalar que la energía eléctrica de la red no se puede almacenar en grandes cantidades y, por lo tanto, se produce según se demanda.

2. ANTECEDENTES

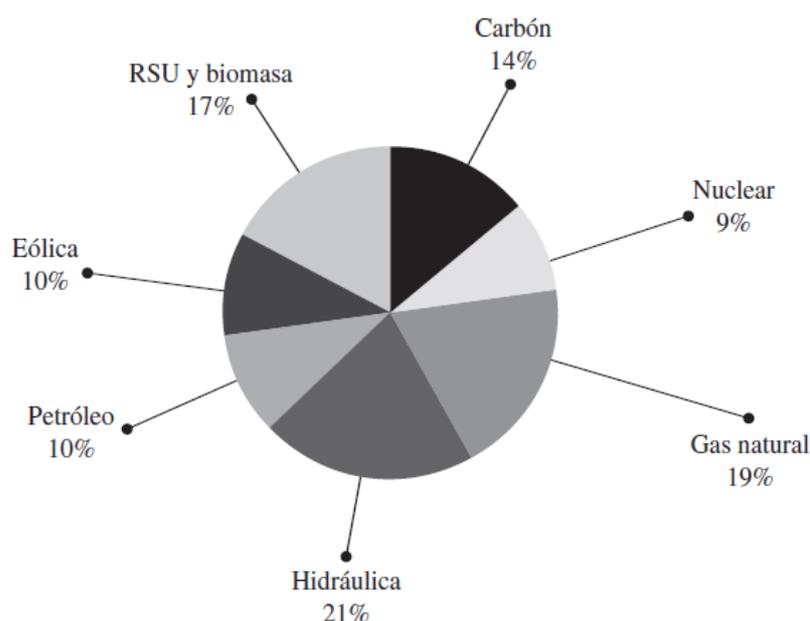


Figura 23. Potencia eléctrica en España. Fuente: Carlos de la Cruz (2006)

2.1.7.3. Perspectivas futuras

Si el actual modelo energético se mantiene a grandes rasgos, se estima que en el año 2030 el consumo mundial de energía será de 17.065.000 ktep, duplicando el consumo del año 2000, y que aumente aún más la dependencia de los combustibles fósiles hasta llegar al 87% de la energía primaria consumida. También se esperan importantes crecimientos del consumo de energías solar y eólica. Los expertos convienen en que este modelo de desarrollo no es sostenible, puesto que las reservas de petróleo durarán 34 años con la producción equivalente al año 2001, las de gas durarán 77 años al nivel de producción del año 2000 y las reservas de carbón 200 años con la producción del año 2000, siempre y cuando la escasez no eleve los precios y haga rentable la exploración y explotación de nuevos yacimientos. Centrándonos en la UE, y concretamente en la generación eléctrica, se prevé un estancamiento de la generación hidráulica y nuclear, un incremento importante de la generación térmica por gas natural y un crecimiento exponencial de las energías renovables (Vivar, 2004).

2.1.7.4. Tipos de energías renovables de mayor potencial en el campo de la desalinización

Con la puesta en marcha de las desaladoras previstas en el Programa AGUA para obtener 600 hm³/año, supuesto un consumo energético de 4,5 kWh/m³, se consumirá un total de 2.700 GWh de energía eléctrica, que podrían ser generados con energía primaria convencional (un tercio de la energía generada en un año por una central nuclear de 1.300 MW o toda la energía generada por una central de carbón de 500

2. ANTECEDENTES

MW) o con energía primaria renovable (700 aerogeneradores de 2 MW). Se describen a continuación los tres sistemas de generación de energía renovable que, a priori, resultan los más idóneos para la alimentación de plantas de desalación de tamaño pequeño y mediano, que son la eólica, la solar térmica y la solar fotovoltaica. De ellos, la energía eólica es el sistema más apropiado cuando hay requisitos más elevados de potencia, que sería el caso de las plantas de mediana capacidad de desalación. La energía solar tiene aplicación para plantas de pequeña potencia, pero con un coste muy elevado. Para plantas de gran capacidad de producción, la extensión de terreno que se necesita para implantar cualquier tipo de energía renovable, eólica o solar, no hace viable el uso de estas tecnologías, si se dispone de otro tipo de centrales de generación de tipo convencional más compactas.

1) Energía eólica

Un aerogenerador es una máquina que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica y eléctrica. La configuración más típica son tres palas movidas por el viento, situadas en una góndola en lo alto de una torre, que giran alrededor de un eje que acciona un generador eléctrico. La adecuación de las distintas velocidades de giro de los componentes se realiza por medios mecánicos o magnéticos. Estos aerogeneradores se agrupan en los denominados parques eólicos, que pueden estar en tierra (próximos o lejanos a la costa) (onshore) o en el mar (*off-shore*) anclados al fondo con pilares, a una profundidad máxima de 20 metros, no existiendo implantación reseñable de esta última tecnología en España.

La potencia eólica de los aerogeneradores comerciales de mayor potencia llega a 2.000 kW, si bien existe algún desarrollo de más de 3.000 kW. En los últimos años se ha pasado de una inversión de 1.500 €/kW a 900 €/kW.

La potencia eólica en España en el año 2004 era de 8.263 MW, la mitad de la instalada en Alemania. Entre ambos países instalaron el 70% de la potencia eólica nueva implantada en 2004, si bien Dinamarca es el país europeo que presenta las mayores *ratios* de densidad de potencia instalada por superficie del país y por población. Las *ratios* en España son de 191 kW de potencia por cada 1.000 habitantes (similar al alemán) y 16 kW por km² de superficie. La mayor *ratio* la tiene la Comunidad Foral de Navarra, con 1.400 kW por cada 1.000 habitantes y 86 kW por km² de superficie.

Se estima que España tiene un potencial eólico técnicamente aprovechable de 43.000 MW (Villanueva e Hidalgo, 2003), y que los recursos eólicos disponibles y técnicamente aprovechables en el mundo (53.000 TWh/año) podrían cubrir más del doble de la demanda total de electricidad en 2020.

2. ANTECEDENTES

2) Energía solar térmica

Un sistema de generación térmica está constituido por un conjunto de colectores o captadores de radiación solar que calientan un fluido, el cual transfiere el calor a un segundo fluido que se almacena en un acumulador. La principal aplicación de la energía térmica es la producción de agua caliente sanitaria de uso residencial.

En el caso de la generación termoeléctrica de torre, una serie de espejos reflejan y concentran la radiación solar sobre una zona en la parte alta de la torre, por la que circula un fluido que se calienta y se conduce a una turbina que se une mecánicamente a un generador eléctrico. Actualmente no hay en España ninguna central de este tipo en operación.

El rendimiento energético de los captadores solares depende, evidentemente, de la radiación solar recibida. En España va desde los 300 kWh/m²/año de Bilbao hasta los 850 kWh/m²/año de Huelva.

En el año 2003, España contaba con 700.433 m² de paneles de energía solar térmica, con una densidad media de 16 m² de paneles por cada 1.000 habitantes y de 1,39 m² de paneles por km² de superficie. Hay que destacar a las islas Baleares, que cuentan con 82 m² de paneles por cada 1.000 habitantes, o 15,7 m² por km² de superficie, seguidas de las islas Canarias y Andalucía.

Si comparamos estas cifras con las de algunos países europeos mediterráneos y centroeuropeos avanzados en el campo de las energías renovables, España no se encuentra en una posición destacada, a pesar de sus favorables condiciones climáticas. Si tuviéramos una ratio media semejante a la media de los tres principales países (Austria, Grecia y Alemania tienen 220 m²/1.000 habitantes y 23 m²/km² de superficie), la implantación en España debería ser del orden de 10 millones de m² (10 km²), lo que podría producir una energía equivalente a 6.000 GWh/año, que supondría el 2,3% de la energía eléctrica consumida en el año 2004.

3) Energía solar fotovoltaica

Un sistema de generación solar fotovoltaico se basa en la propiedad de algunos materiales de emitir electrones cuando reciben radiación solar (fotones). Estos elementos se agrupan en células y paneles y proporcionan una tensión continua que necesita de un inversor para convertirla en alterna. Las aplicaciones son de baja potencia: edificios, servicios de auxilio y transmisión de información en zonas aisladas, etc. El rendimiento energético es muy bajo: en torno al 15%.

2. ANTECEDENTES

La potencia fotovoltaica instalada en el mundo en el año 2004 era de 1.256 MW, con un crecimiento del 67% respecto al 2003. Alemania es el primer mercado mundial fotovoltaico, por delante de Japón y Estados Unidos. La mayor planta solar del mundo (Baviera Solarpark) se ha inaugurado en el año 2005 en Alemania, con una potencia de 10 MW, ocupa 250.000 m² y tiene 57.600 paneles solares.

Según el MITYC, a finales de 2004 había instalada en España una potencia de 37 MW, que supone el 7% de la potencia instalada en Alemania, pese a que recibe una radiación mayor (más de 4,5 kWh/m²). Sin embargo, somos el país líder europeo en fabricación de paneles solares, con una cuota del 35% del mercado europeo y del 9% del mercado mundial (Villanueva e Hidalgo, 2003).

La densidad de potencia instalada en España es de 0,84 kW por cada 1.000 habitantes y 0,07 kW/km² de superficie, siendo Navarra la comunidad autónoma con mayores densidades (9,3 kW/mil habitantes y 0,56 kW/km²). Si toda España tuviera la media de Navarra, habría una potencia de 400 MW, atendiendo al parámetro de población, que coincide con el objetivo del Plan Nacional de Energías Renovables, y de 300 MW, atendiendo al parámetro de superficie.

Si se compararan las densidades con otros países europeos, Alemania tiene unas densidades de 9,62 kWp/1.000 habitantes y 2,22 kWp/km², seguida de Países Bajos (4,61 kWp/1.000 habitantes y 2,22 kWp/km²) y Austria (2,46 kWp/1.000 habitantes y 0,24 kWp/km²), países con menor radiación solar que España.

2.1.7.5. Aspectos medioambientales de las energías renovables

Las previsiones mundiales de duplicar el consumo de energía primaria en el horizonte 2000-2030 implican que las emisiones de CO₂ también se duplicarán si se mantiene el mismo sistema de generación, pasando de 23.781 millones de toneladas de CO₂ generadas en el 2000 a 44.497 millones de toneladas previstas en 2030 (Rivero, 2004). En España, las emisiones de CO₂ debidas a la producción de energía eléctrica son el 17% de las emisiones totales. El resto de combustibles fósiles son consumidos en transporte (46%), industria (24%) y uso residencial (13%) (Sánchez, 2004). El Plan Nacional de Asignaciones establece los derechos de emisión de CO₂ por sectores para el cumplimiento del protocolo de Kioto. En la tabla 2 del anexo 3 se adjunta una tabla de la cuantificación de las emisiones de CO₂ para los distintos tipos de centrales de generación eléctrica.

Se podrían reducir las emisiones a la mitad con una mejora de la eficiencia energética en el uso final (58% de la reducción de emisiones), el incremento de la generación con energías renovables (20% de la reducción) y nuclear (10% de la reducción), el cambio

2. ANTECEDENTES

de combustible en usuarios finales (7% de la reducción) y cambios en la generación mixta de combustibles fósiles (Biroi, 2005).

2.1.7.6. El coste de las energías renovables

La compraventa de energía está regulada en España por el Real Decreto 436/2004, de 12 de marzo, que establece la metodología del régimen jurídico y económico de la generación eléctrica en régimen especial, otorgando unas ventajas en las tarifas reguladas para las energías renovables. Además de la tarifa regulada, se puede acceder al mercado libre, recibiendo en este caso, además del precio de mercado, un incentivo por participar, más una prima.

La tarifa media de referencia en el año 2005 fue 0,073 €/kWh. Los precios regulados de adquisición de la energía eran: para la energía de origen eólico, 0,066€/kW (90% de la tarifa), y para la energía de origen fotovoltaico (potencia menor de 100 kW), 0,42 €/kW (575% de la tarifa).

Por otra parte, existen ayudas financieras para incentivar la implantación de estas tecnologías, tipo subvención o créditos blandos, otorgadas por el IDAE, ICO y las comunidades autónomas. A efectos de este artículo, a la hora de estipular los costes de las energías renovables, se partirá de la hipótesis de que la inversión es realizada en su totalidad por el promotor, sin recibir ninguna ayuda pública, por lo que, en el caso de que el proyecto cuente con alguna ayuda financiera, mejoraría su rentabilidad.

El coste de generación utilizando viento o energía solar corresponde, básicamente, a la amortización de la inversión, costes de oportunidad y financieros. Los costes de generación de electricidad con energías renovables todavía son superiores a los de generación con energías convencionales. La que está en un estado más próximo para ser competitiva es la energía eólica. La energía solar fotovoltaica tiene unos costes seis veces superiores a la eólica y la solar termoeléctrica está en fase de demostración. La tabla 3 del anexo 3 muestra una estructura de costes típica para generación de energía renovable, y se compara con el precio de venta de la misma en el mercado regulado.

En España los precios de venta de la energía al consumidor final también están regulados y dependen del tipo de uso (doméstico o industrial), tipo de tarifa y potencia. Los costes del kWh que se utilizan en los estudios de desalación para grandes plantas corresponden a un precio de 0,0485 €/kWh, que es inferior al coste de generación de la energía si se utilizara una fuente primaria renovable.

2. ANTECEDENTES

2.1.7.7. Tendencias tecnológicas

La política energética europea pretende mantener un equilibrio entre la competitividad económica de la industria, el respeto al medio ambiente y la seguridad y calidad del suministro energético. Para ello, conjuga el desarrollo de tecnologías limpias, basadas en combustibles convencionales, con el desarrollo de las tecnologías renovables.

El Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI) identificó en el estudio Energía: Tendencias a Medio y Largo Plazo, dos macrotendencias tecnológicas de las energías renovables, a saber, la reducción de costes y el almacenamiento de energía.

1) Reducción de costes

La energía eólica todavía necesita reducir el coste del kWh generado en un 30% para ser plenamente competitiva con la generación a partir de combustibles fósiles (Thresher, 2005). En el año 2009 se desarrollaron aerogeneradores multimegavatio, cuya reducción de los costes de fabricación fue 300 a 200 €/kW, la eliminación de la caja de multiplicación para reducir el mantenimiento, la mejora del comportamiento de las máquinas en sistemas aislados y redes débiles, y la utilización de generadores eléctricos sumergidos.

Para aumentar el número de horas de funcionamiento de los equipos, la generación eólica en el mar muestra un gran potencial por la mayor regularidad y velocidad del viento, aunque también los costes son superiores a la generación en tierra, debido a la complejidad de la instalación y a las condiciones ambientales (olas, tormentas y corrosión). El mar también resulta un lugar idóneo para instalar grandes máquinas multimegavatio (Thresher, 2005). Existen equipos cimentados en profundidades de hasta 20 metros, pero no en aguas profundas (más de 30 metros), siendo una alternativa ir hacia plataformas flotantes.

En España existen algunas iniciativas destinadas al desarrollo de generación de energía eólica sobre plataformas marinas, actualmente en proyecto.

El programa de investigación eólica del Department of Energy (DoE) de Estados Unidos está evaluando distintos métodos de plataformas flotantes para generación eólica, con máquinas multimegavatio en el mar para profundidades entre 50 y 200 metros. Otro de los objetivos del programa eólico es reducir el coste de 4-6 c\$/kWh a 3 c\$/kWh para plantas en tierra y lugares con baja velocidad de viento (21 km/h a 10 m de altura) y a 5 c\$/kWh para plataformas eólicas marinas (Thresher, 2005). Por su parte, el Plan danés Energía 21 tiene por objetivo implantar 4.000 MW de energía

2. ANTECEDENTES

eólica marina en profundidades de 15 m, que generará el 50% del consumo eléctrico de Dinamarca.

Para este año 2014 se predijo el desarrollo de módulos fotovoltaicos de lámina delgada de gran superficie, y sistemas de concentración fotovoltaica que aumentan el rendimiento hasta el 25% y reducen los costes de los módulos en un 40%.

2) Almacenamiento de energía

Una de las características de la generación con energías renovables es su disponibilidad discontinua, por lo que un sistema de almacenamiento de alta capacidad y bajo coste podría asegurar de forma competitiva el suministro de energía cuando haya baja radiación solar o viento. Este es un reto tecnológico de primera magnitud.

Para ello, se está investigando en la optimización de baterías convencionales. El proyecto Electricity Storage and Demonstration of Renewable Energy Systems, aprobado por el VI PM de la UE, trata de estandarizar las pruebas de caracterización de las baterías plomo-ácido utilizadas en sistemas aislados de energía solar fotovoltaica para uso doméstico. También persigue construir un demostrador para desalinización por ósmosis inversa. Otra línea de desarrollo, de mayor riesgo tecnológico, se dirige hacia la aplicación de volantes de inercia.

2.1.7.8. Capacidad tecnológica de España en el campo de energías renovables

España cuenta con una posición tecnológica e industrial muy favorable para liderar estas tecnologías en el ámbito europeo. Hay unos recursos naturales (eólicos y radiación solar) muy importantes y un Plan Nacional de Energías Renovables que apuesta decididamente por ellas. Existe también una industria fabricante de equipos para la producción de energías renovables, una importante capacidad investigadora en los centros de investigación nacionales (CIEMAT, Plataforma Solar de Almería, CENER, Instituto Tecnológico de Canarias, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, etc.) y apoyos financieros públicos sustanciales para proyectos de investigación a través del Programa Nacional de I+D+i de la Energía y el CDTI, y financiación para la implantación de las energías renovables a través de las líneas del IDAE e ICO.

En el ámbito de la energía eólica, España es una potencia mundial en generación y producción de equipos. La empresa nacional más importante es Gamesa, que fue el

2. ANTECEDENTES

cuarto mayor suministrador de aerogeneradores a escala mundial en el año 2003. Gamesa, M. Torres, EHN y Ecotecnia han sido, entre otras, las empresas más activas en proyectos de I+D de energía eólica, financiados por el Plan Nacional de I+D+i y el CDTI.

Atendiendo a la propiedad de los parques eólicos, tres de las cinco empresas con mayor potencia instalada en el mundo son españolas: Iberdrola, líder mundial, Acciona (EHN) en tercer lugar y Endesa en cuarto puesto. Los 20 mayores propietarios mundiales explotan la tercera parte de la potencia eólica instalada. Según la Plataforma Eólica Empresarial, el sector eólico contaba a finales de 2003 con 300 empresas. De ellas, la mitad son fabricantes de componentes y el resto son promotores y explotadores de parques eólicos; dan empleo a 5.000 personas de forma directa y a 12.000 de forma indirecta, con unas previsiones de crecimiento del 11% anual, lo que daría lugar a la creación de 34.000 puestos de trabajo desde el 2004 hasta el 2011 (Villanueva e Hidalgo, 2003).

En el área de la energía fotovoltaica, según Photon Internacional, la empresa nacional más destacada, Isofoton, ocupa en Europa el primer lugar como productor y el octavo en el mundo. Es una empresa muy innovadora, habiendo desarrollado desde diciembre de 2004 cuatro proyectos de I+D, que han contado con el apoyo del Plan Nacional de I+D+i y de CDTI. También hay otras empresas multinacionales con plantas de desarrollo y producción en España, como BP Solar o Atersa. En energía solar termoeléctrica hay que mencionar al grupo Abengoa.

España cuenta con más de 300 empresas dedicadas a la instalación, mantenimiento y desarrollo de proyectos, tanto en energía solar fotovoltaica como térmica (se suelen ofertar ambos tipos de instalaciones). Se estima que dan empleo directo a 2.400 trabajadores e indirecto a otros 1.200 (García Brevia, 2004).

2.1.8. La desalación de agua de mar mediante el empleo de energías renovables

2.1.8.1. Situación actual de la aplicación de las energías renovables a desalinización

Existen diversos factores que hacen de la desalación de agua de mar una aplicación atractiva para las energías renovables. Por una parte, muchas zonas con escasez de agua dulce tienen recursos de energía primaria de tipo renovable, generalmente energía eólica o solar. Además, se suele producir la simultaneidad estacional en la demanda de agua potable y la disponibilidad de los recursos energéticos renovables (Zarza, 1998). Éste es el caso de la costa mediterránea y de las islas Canarias, en las que

2. ANTECEDENTES

la disponibilidad de energía eólica y solar es mayor en el verano, coincidiendo con una mayor demanda de agua potable por el incremento de la población turística.

Hay que distinguir dos situaciones a la hora de enfocar este tema. La primera la constituyen las zonas aisladas o remotas, en las cuales la necesidad de agua dulce, unida a la inexistencia de una red de energía eléctrica, justifica la construcción de un sistema autónomo de generación de energía, en el que el coste del kilovatio hora obtenido pasa a ser un factor secundario frente a la necesidad perentoria del agua. Otro caso muy distinto son las zonas conectadas a la red eléctrica, en las que los costes se convierten en un factor primordial para la toma de decisiones sobre la inversión.

El coste del agua desalada tiene dos componentes muy importantes, que son los derivados del capital o inversión (amortización, coste de oportunidad y coste de financiación) y el coste energético. El empleo de energía renovable como fuente de energía en zonas no aisladas sólo tendría interés si se lograra un coste energético menor que el precio actual de adquisición en el mercado. Asimismo, no todas las fuentes de energía primaria renovable son igualmente adecuadas para los procesos de desalación. Algunos procesos utilizan energía térmica o vapor (MSF, MED, CV), mientras que otros usan electricidad (OI, CV, MSF, MED, EDR) y algunos pueden emplear energía mecánica (OI, CV). Por lo tanto, hay que seleccionar la fuente energética en función del proceso de desalación. La energía eólica puede generar energía mecánica o electricidad, mientras que la solar fotovoltaica y termoeléctrica generan electricidad, y la solar térmica, calor.

Para la desalación de agua de mar por ósmosis inversa con energía eléctrica de origen renovable se han realizado proyectos que utilizan energía fotovoltaica para capacidades de hasta 50 m³/día y energía eólica para capacidades de desalación de hasta 250 m³/día.

El suministro de energía renovable a instalaciones de gran capacidad es un caso diferente, del que no hay experiencia. El tamaño de la planta de desalación condiciona el tamaño de la planta de generación energética que necesita y el tipo de energía más viable. Una planta de ósmosis inversa para desalación de agua de mar (que es la tecnología de menor consumo energético) con capacidad para 30.000 m³/día de agua dulce requiere una potencia de 5 MW para funcionar a plena carga. Esta potencia se puede conseguir con cinco aerogeneradores eólicos de 1 MW o con 90.000 m² de paneles solares fotovoltaicos. Estos datos descartan, a día de hoy, la energía fotovoltaica para suministro de energía con potencias medias, además de por su coste más elevado, dejando a la energía eólica como la alternativa tecnológica más viable. Por otra parte, conviene destacar el hecho del funcionamiento aislado de la planta (2.000 horas efectivas de funcionamiento al año para un aerogenerador y 1.500 horas

2. ANTECEDENTES

efectivas para un parque fotovoltaico), que sólo permitiría aprovechar el 25% de su capacidad productiva si utiliza energía eólica, o el 15% si emplea energía solar fotovoltaica.

Esta opción de funcionamiento aislado no está exenta de incertidumbres tecnológicas, pues la alimentación de energía a una planta de desalación a través de fuentes no estables puede causar problemas de operación. El proyecto REDDES, financiado por el programa de investigación ALTENER de la UE, para la desalación de agua de mar en zonas aisladas y remotas empleando energías renovables, marca tres estrategias para conseguir una potencia constante:

1. Combinar fuentes energéticas de distinta naturaleza, renovables o no, reduciendo la probabilidad de fallo de suministro de cada una por separado.
2. Ajustar la cantidad de agua desalada a la potencia generada en cada momento, realizando instalaciones modulares que se puedan desconectar fácilmente, y con diseños robustos para funcionar fuera del punto de consigna.
3. Sobredimensionar el generador, ajustando la potencia a un valor constante inferior, que será el de la planta de desalación.

Hay que señalar la existencia de diversas iniciativas de carácter internacional, dirigidas a la implementación de políticas y desalación de pequeña capacidad, con energías renovables para zonas remotas en los países mediterráneos, como el proyecto ADURES y el proyecto ADIRA.

2.1.8.2. Proyectos relevantes de demostración

España cuenta con una amplia experiencia en proyectos demostradores de desalación que utilizan como suministro energía renovable. El informe de desalación del año 2004 de IDA incluye un inventario de plantas desaladoras de más de 100 m³/día de capacidad, y dedica un apartado especial a las plantas de demostración de desalinización con energías renovables (Wangnick, 2004). Los datos muestran que los mayores esfuerzos se han realizado en la integración de energía solar con ósmosis inversa y con procesos de destilación, si bien los proyectos de mayor capacidad (300 m³/día), que precisamente se han realizado en los últimos años, corresponden a la integración de la energía eólica con ósmosis inversa. Una excepción destacable es el caso de Milos (Grecia), que integra energía geotérmica y MED.

A continuación se describen los proyectos más relevantes realizados en España, que está al primer nivel tecnológico mundial en este campo. Como se podrá comprobar, son proyectos de investigación en los que la capacidad de desalación es pequeña. En el caso de la energía solar, como ya se ha comentado, estas experiencias no son

2. ANTECEDENTES

extrapolables para plantas de mediana capacidad, debido a su elevado coste y a la necesidad de una gran superficie de terreno para ubicar el parque de colectores o captadores solares.

A) Energía eólica y ósmosis inversa

El proyecto AERODESA I contempló un aerogenerador de 15 kW con acoplamiento mecánico a una planta de ósmosis inversa de 10 m³/día, con funcionamiento en régimen variable.

Una variante, AERODESA II, integró dos módulos de ósmosis inversa de 20 m³/día con sistema de acoplamiento hidráulico, que permitía una elevada automatización de la planta. En el proyecto AERODESA, una planta de OI de 17 m³/día está conectada eléctricamente a un aerogenerador, conectado a un banco de baterías para almacenamiento de energía.

Por otra parte, en el proyecto PRODESAL, también desarrollado en las islas Canarias, se introduce el estudio del comportamiento discontinuo de una planta de ósmosis inversa alimentada con energía renovable. Un aerogenerador de 200 kW (600 MWh/año) suministra energía a una planta de ósmosis inversa de 200 m³/día. En este proyecto se han desarrollado membranas para funcionamiento discontinuo, bastidores, y se aplicó una bomba de émbolo y turbina de recuperación Pelton.

SDAWES (*Seawater Desalination with an Autonomus Wind System*) es otro proyecto realizado por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, que compara diversas tecnologías de desalación con generación eólica. Como sistema de generación integró dos aerogeneradores de 230 kW, un volante de inercia de 100 KVA que filtra las fluctuaciones de potencia y una UPS de 7,5 kW. Como sistemas de desalación empleó una planta de ósmosis inversa de 25 m³/día y consumo 7,2 kWh/m³, una planta de compresión de vapor al vacío de 50 m³/día y consumo 16 kWh/m³ y un sistema de electrodiálisis reversible de capacidad 190 m³/día y consumo 3,3 kWh/m³. Se concluyó que la ósmosis inversa era la mejor tecnología de desalación utilizando energía eólica, especialmente si funciona con bombas a caudal variable, pese a la reducción de vida de las membranas.

Un proyecto emblemático fue el realizado en Punta Jandía (Fuerteventura). Se trataba de un sistema eólico diésel para electrificación y desalación. La planta suministraba energía, agua, frío y hielo a un poblado de pescadores, con una población de entre 61 personas en invierno y 450 en verano. La planta desalinizadora de ósmosis inversa tenía una capacidad de 56 m³/día y consumo 16,5 kW, y sólo desalaba cuando se

2. ANTECEDENTES

generaba energía eólica, durante 1.500 horas/año. Tenía un depósito con autonomía para 4 meses.

B) Energía solar térmica y destilación

El proceso de evaporación MED, a diferencia del proceso MSF, sólo necesita calentar el agua a 70 °C, lo que reduce considerablemente los costes de inversión de los captadores solares para conseguir la energía que necesita la planta. Un sistema de almacenamiento del fluido asegura el funcionamiento en régimen permanente cuando no haya radiación solar o haya fluctuaciones de radiación. Este sistema de almacenamiento puede ser un depósito aislado que almacena el fluido u otro material que conserve el calor (placas de hierro, cerámica, etc.).

La Plataforma Solar de Almería es una referencia en el mundo en tecnologías de desalación con energía solar. Uno de los proyectos realizados integró la desalación con tecnología MED, un campo de colectores solares térmicos de tipo cilindro parabólico y un tanque de almacenamiento de aceite térmico, que actúa como medio calorportador y medio de almacenamiento de la energía térmica. Una evolución de este proyecto ha sido AQUASOL (*Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technologies*), en el que la energía es aportada por un campo de 500 m² de colectores solares parabólicos sin sistema de seguimiento (menor coste) y el almacenamiento térmico es por agua (más económico que el aceite térmico); además, emplea una bomba de calor en lugar de un turbocompresor. En este proyecto también se estudia el funcionamiento discontinuo y se introduce un secador solar avanzado para la valorización de la salmuera en una salina.

El proyecto SODESA en las islas Canarias, aprobado por el Programa Joule, utilizaba energía térmica a baja temperatura, proporcionada por 50 m² de colectores solares, con un sistema de acumulación de agua de mar caliente y destilación MED con capacidad de 0,7 m³/día. El sistema de acumulación de agua de mar caliente reducía las pérdidas y permitía el funcionamiento continuo de la planta 24 horas al día.

C) Energía solar fotovoltaica y procesos de ósmosis inversa

Un sistema de captación fotovoltaica genera una corriente continua, la cual se puede aplicar directamente a los electrodos de una cuba de electrodiálisis para desalar agua salobre, o convertirla a corriente alterna y alimentar a una bomba de alta presión para los procesos de ósmosis inversa.

2. ANTECEDENTES

En España existe la experiencia del proyecto DESSOL en Canarias, en el que una planta fotovoltaica de 4,8 kWp y un sistema de baterías alimentaban una planta de ósmosis inversa de 3 m³/día.

2.1.8.3. El coste del agua desalada con energías renovables

Partiendo de que la energía renovable se emplee en la planta directamente y no se venda a la red, salvo que haya un excedente si se sobredimensionara el parque eólico para asegurar un mayor número de horas de funcionamiento de la planta a su capacidad máxima. No será éste el caso que se exponga en el estudio, ya que se dimensionará de acuerdo a la potencia nominal de la planta de desalación.

Tampoco se considera que el proyecto perciba ninguna ayuda financiera (subvenciones o créditos blandos) que reduzca los costes del capital, como es habitual que ocurra en la implantación de energías renovables. Si se tuvieran en cuenta estos efectos, se reducirían significativamente los costes del agua desalada.

Los procesos por ósmosis inversa son los de menor necesidad de inversión y consumo energético. En cuanto a energías renovables, la más viable, desde el punto de vista comercial, es la energía eólica, tanto por coste como por la potencia que puede aportar. Se compararán los costes de autoproducción de energía eléctrica con el precio de adquisición de la energía a la red y la viabilidad económica del funcionamiento aislado de la red de modo discontinuo (dependiente de la disponibilidad de energía eólica), frente al funcionamiento continuo conectada la planta a la red eléctrica, que suministraría energía en caso de que fluctúe la generación eólica.

Aunque el coste del combustible para la generación eléctrica con energías renovables es cero, no lo es la inversión, que tiene un coste de amortización de capital, un coste de oportunidad y un coste financiero. Para reducir el coste del kWh generado hay dos vías principales. La primera es la reducción de los costes de inversión con economías de escala, el empleo de componentes estándar, el desarrollo tecnológico para integrar subsistemas comunes a los procesos de desalación y generación eléctrica y la eliminación de los procesos de conversión energética que impliquen pérdidas de rendimiento.

La segunda vía de reducción de costes es aumentar el número de horas efectivas de generación con energía renovable, aumentando la eficiencia de los equipos, buscando una localización adecuada donde haya una mayor disponibilidad de energía primaria y utilizando sistemas de almacenamiento de energía de bajo coste.

2. ANTECEDENTES

La tabla 4 del anexo 3 muestra los requisitos de inversión en €/kW y horas mínimas de funcionamiento que se le deberían requerir a un sistema de generación con energía primaria renovable para que sea competitivo con el coste de la energía eléctrica adquirida a la red, independientemente de la tecnología seleccionada (eólica o solar). Se muestran tres escenarios de costes energéticos: 0,048 €/kWh, 0,060 €/kWh y 0,072 €/kWh.

Un sistema de generación que necesite una inversión de 800 a 1.000 €/kW funcionando 2.200 horas produciría energía a un coste de 0,048 €/kW (con un coste de oportunidad del 5%), mientras que si funcionara 1.675 horas produciría energía a un coste de 0,06 €/kW. Actualmente, la energía eólica requiere una inversión de 900 €/kW y un número de horas efectivas de generación de 1.890 (según datos de generación eléctrica de 2004), que está muy próxima a ser competitiva con el precio de adquisición de la energía a la red eléctrica (0,0485 €/kWh).

Las energías solar termoeléctrica y fotovoltaica requieren unas inversiones muy superiores (2.700 €/kW la termoeléctrica y 6.000 €/kW la fotovoltaica), por lo que todavía están en una fase muy lejana de ser competitivas con las fuentes de energía convencionales.

Por otra parte, hay que analizar la mejor estrategia de operación de una planta de desalación, eligiendo si únicamente funciona con recursos renovables de forma discontinua, o es más beneficioso conectarla a la red eléctrica cuando no haya suficiente generación de energía renovable. El funcionamiento no continuo de la planta implica que la inversión se ha de amortizar con una producción menor de agua y, por lo tanto, suben los costes de amortización por metro cúbico producido. Por otra parte, la interconexión a la red puede requerir mayores inversiones en los equipos y un precio superior del kWh adquirido a la red, si se aplicara una tarifa eléctrica más alta por un menor consumo.

Dado que la utilización de energía eólica es la fuente renovable con más expectativas en el campo de la desalación de agua de mar con ósmosis inversa, en la tabla 5 del anexo 3 se realiza una simulación que contempla la integración de ambas tecnologías, mostrando cómo evolucionan los costes del agua desalada si el sistema eólico está aislado de la red con diferentes horas equivalentes de funcionamiento al año, o conectado a la red cuando no hay energía eólica suficiente.

Si la planta funciona de forma aislada, el coste del agua está en torno a 2 €/m³, mientras que si funciona conectada a la red cuando no hay energía eólica, el coste se reduce a 0,5 €/m³, debido a menor imputación de los costes de amortización por m³ de agua producido, que es una cifra que está en orden con los costes actuales del agua

2. ANTECEDENTES

desalada comprando energía a la red, pero con las ventajas de que los costes de la energía eólica se mantendrán constantes en el futuro y no dependerán del precio de las materias primas energéticas, cuya tendencia irá previsiblemente al alza.

Por otra parte, los estudios de sensibilidad de costes ante los diferentes componentes de una planta de desalación por ósmosis inversa alimentada con energía eólica muestran una gran dependencia de la capacidad de la planta, del consumo de energía, de los gastos de operación y mantenimiento, de la velocidad del viento y de los costes de oportunidad. Y, sin embargo, una baja dependencia del tipo de aerogenerador que se utilice y del coste de las membranas (García Rodríguez *et al.*, 2001).

Aplicando la misma simulación a un sistema que funcionara en modo aislado, quedaría justificada la implantación de un sistema de almacenamiento de energía que proporcione un funcionamiento continuo de la planta, si el coste total (generación y almacenamiento) no superara los 3.500 €/kW de potencia instalada.

Como se ha comentado al comienzo de este apartado, con el objetivo de reducir los costes del agua desalada algunos autores han propuesto sobredimensionar el sistema de generación eléctrica y vender energía eólica a la red, pudiendo llegar a una reducción del coste del agua desalada del 30%, en el caso de que la producción máxima del parque eólico al año sea el doble de la potencia de la planta de desalación.

A continuación se muestran los costes de los proyectos de investigación y demostración comentados en el apartado anterior, que son muy superiores a los calculados en las simulaciones de este estudio, debido a dos razones: la primera es que se trata de prototipos y no de sistemas industrializados, son proyectos singulares que no han sido replicados optimizando costes; la segunda es que su capacidad de desalación es muy pequeña y no se pueden aprovechar de las economías de escala de las grandes plantas.

Las experiencias de los proyectos demostradores de desalación por ósmosis inversa a partir de energía eólica (AERODESA I y II, y AEROGEDESA) exhiben unos costes de desalación de entre 3,1 y 4,2 €/m³. Se supone que, para sistemas industrializados con recuperación de energía, el coste se podría reducir en torno al 50%. En el proyecto SWADES el coste del agua está en torno a 0,82 €/m³.

El proyecto de desalación de agua con tecnología MED y energía solar térmica realizado en la Plataforma Solar de Almería (PSA), con captación de energía por colectores cilindro parabólicos y sistema de almacenamiento de aceite térmico da un coste de 2 €/m³ para una capacidad de desalación de 5.000 m³/día. El proyecto AQUASOL reduciría los costes anteriores abaratando el coste de los colectores

2. ANTECEDENTES

empleados, al sustituir el aceite térmico por agua y el turbocompresor por una bomba de calor.

La potencia que se genera con un sistema fotovoltaico es pequeña. Los costes del agua desalada utilizando esta fuente de energía renovable son de 5,5 a 20 €/m³ para desalación de agua de mar (de 12 a 120 m³/día) por ósmosis inversa (Loupassis, 2002). El proyecto DESSOL de las islas Canarias muestra un coste de desalación de agua de mar con ósmosis inversa de 7,9 €/m³; si se industrializara el sistema, se podría llegar a 3,5 €/m³ (Schallenberg).

2.1.8.4. Tendencias tecnológicas

Las tecnologías de desalación y de generación de energías renovables están todavía en fase de desarrollo y progresivamente van reduciendo sus costes. La energía eólica como fuente de generación de energía eléctrica está próxima a ser competitiva, con respecto a otras fuentes de energía convencionales. Uno de los problemas a solventar es que las energías renovables no son las más adecuadas para atender de forma autónoma grandes demandas de energía, mientras que las plantas de desalación se benefician en gran medida de las economías de escala. Es por ello por lo que hay que identificar el nicho de mercado por tamaño de planta donde su integración sea más competitiva.

Estas tecnologías son comerciales, aunque no existen antecedentes para plantas de tamaño medio, por lo que se presentan algunos retos:

- La reducción de la inversión de los equipos eólicos en un 30%, bien por el desarrollo de grandes máquinas multimegavatio (economías de escala) o por reducción de costes de producción.
- La reducción de la inversión de las plantas de ósmosis inversa.
- La reducción de su consumo energético, mejorando los sistemas de recuperación energética.
- El funcionamiento de la planta con fuentes discontinuas de aprovisionamiento.
- El comportamiento de redes eléctricas débiles ante grandes cargas variables.

2.1.8.5. Conclusiones sobre el uso de energías renovables para desalar

El aprovechamiento de estas energías para alimentar una planta de desalación de agua de mar se ha planteado a nivel de investigación para instalaciones de pequeña capacidad en zonas remotas o aisladas, donde el coste es un factor secundario frente a la necesidad perentoria de agua. Estos proyectos han integrado tres tipos de

2. ANTECEDENTES

tecnologías: ósmosis inversa con generación eléctrica de origen fotovoltaico, ósmosis inversa con generación eléctrica o mecánica de origen eólico y destilación con generación de vapor en captadores solares. Los prototipos realizados presentan unos costes elevados, debidos, en parte, a que no se han beneficiado de las economías de escala de las grandes plantas comerciales conectadas a la red. Hay que señalar que la integración de estas tecnologías en zonas conectadas a la red eléctrica no ha suscitado interés.

Cuando se trata de plantas de mediana capacidad, las tecnologías de desalación de agua de mar con energías renovables que presentan una mayor viabilidad técnico comercial son la desalación por ósmosis inversa y la generación de energía eléctrica de origen eólico (en tierra o en mar) que, funcionando en modo no aislado de la red eléctrica, podrían llegar a conseguir un coste del agua desalada de 0,5 €/m³, similar a los costes con los que operan las plantas actuales, pero con las importantes ventajas de ocasionar un menor impacto ambiental por una reducción de emisiones de CO₂ y de asegurar el coste energético futuro, ya que es independiente de la evolución del precio de los combustibles fósiles con los que se genera la energía eléctrica. Sin embargo, no existe ninguna implantación en la actualidad que permita descartar potenciales problemas tecnológicos derivados de la escalabilidad de la planta, principalmente los achacables al funcionamiento fluctuante del sistema de generación eólico y la demanda variable de energía de la planta a la red eléctrica, sobre todo si se trata de una red débil.

El estudio de costes realizado para esta propuesta eólica-ósmosis inversa no ha considerado los ingresos que pudieran existir por la venta de energía eléctrica a la red, ni ningún tipo de ayuda financiera a la inversión (subvenciones o créditos), como ocurre con la implantación de las energías renovables. En el caso de contar con ellos, los costes del agua desalada se reducirían significativamente.

Las tendencias tecnológicas se dirigen hacia una reducción de los costes de inversión en ósmosis inversa y eólica y hacia un menor consumo energético con sistemas más eficientes de recuperación de energía, aunque también hay otras iniciativas interesantes en el ámbito de plantas marinas (off-shore).

España tiene empresas muy importantes en los ámbitos de la desalación por ósmosis inversa y de las energías renovables, que no están integradas, con una alta capacidad tecnológica, industrial y financiera. También tenemos cualificados centros de investigación con reconocimiento internacional. La implantación y el desarrollo de estas tecnologías son una oportunidad y un reto para España y su tejido industrial, y una puesta en marcha decidida necesita de una serie de medidas:

2. ANTECEDENTES

- ✓ Coordinación de la Administración central y de las autonómicas con competencias en el ámbito del agua, medio ambiente y energía, para potenciar la implantación de este tipo de plantas si se considera de interés, realizando previamente uno o varios proyectos de demostración para capacidades de 2.500 y 10.000 m³/día. El liderazgo debería correr a cargo del Ministerio de Medio Ambiente.
- ✓ Estudiar un sistema de gestión global de explotación de los recursos hídricos que asegure la adquisición del agua producida por desalación, puesto que, de lo contrario, las amortizaciones de la planta encarecerán más su coste. El estudio debe ser liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y en él deben participar las cuencas y las empresas suministradoras de aguas, realizando simulaciones de demanda de agua en función del precio para dimensionar las plantas convenientemente.
- ✓ Facilitar la interconexión entre la planta y la red eléctrica para suministrar energía a la planta de desalación y estudiar el impacto de las cargas variables sobre la red. El coste del agua obtenida por ósmosis inversa con energía eólica, funcionando de modo aislado, sería 2 €/m³; mientras que si funcionara conectada a la red para suplir el déficit energético que tuviera la planta, el coste se reduciría hasta 0,5 €/m³, cifra competitiva con la obtenida con energía adquirida en su totalidad de la red eléctrica. Se debería favorecer, también, la venta del excedente de energía, si se sobredimensiona el parque eólico para tener mayor autonomía, aplicando en el último caso los precios de adquisición que marque el Régimen Especial. Esta tarea debería ser realizada por el Ministerio de Industria Turismo y Comercio en coordinación con el Ministerio de Medio Ambiente.
- ✓ Aplicar incentivos financieros a proyectos de implantación, al igual que sucede con las energías renovables, que son apoyados por subvenciones y financiación blanda, que subvenciona tipos de interés y concede largos plazos de amortización (IDAE, ICO y comunidades autónomas). Se deberían aplicar fondos FEDER a estos proyectos y líneas de financiación blandas a largo plazo del ICO, que reducirían los costes de capital y del agua desalada. Los incentivos a la implantación no eximen de la necesidad de que el proyecto cuente con estudios e informes preceptivos de impacto ambiental favorables.
- ✓ Fomentar las actividades de investigación y desarrollo que contribuyan a reducir costes, mejorar los procesos y la interconexión a la red, priorizando los consorcios con alta capacidad para la explotación de los resultados. Las ayudas para I+D+i deben ser subvenciones y créditos sin intereses, competencia de los Ministerios de Industria, Turismo y Comercio y CDTI, Ministerios de Educación y Ciencia, Medio Ambiente y Fomento y también de los departamentos de innovación de las

2. ANTECEDENTES

comunidades autónomas. Se deberían aunar los esfuerzos de los diferentes organismos competentes.

- ✓ Escalar las tecnologías un orden de magnitud superior a los prototipos actuales, que se beneficien de economías de escala. La capacidad de las plantas debería estar entre 2.500 m³/día y 30.000 m³/día. Los principales retos tecnológicos que deberían plantear estos proyectos son el desarrollo de:
 - Aerogeneradores multimegavatio y aerogeneradores *off-shore*.
 - Sistemas de almacenamiento de energía de bajo coste.
 - Plataformas flotantes y sistemas de cimentación en fondos marinos profundos.
 - Grandes membranas de ósmosis inversa, de alto factor de conversión y bajo consumo.
 - Reducción de la presencia de boro en el agua producto. Pretratamientos de bajo coste y bajo impacto ambiental.
 - Reducción del consumo energético con cámaras isobáricas.
 - Mejorar la integración de redes eléctricas débiles y grandes cargas variables.
 - Integración electromecánica de sistemas de desalación con sistemas de generación eólica.
 - Mejorar el comportamiento de las plantas con fluctuaciones en la generación de energía.

2. ANTECEDENTES

2.2. LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES REGENERADAS EN ESPAÑA

2.2.1. Introducción

El desarrollo económico suele implicar la necesidad de disponer de recursos hídricos adicionales para poder llevar a cabo las nuevas actividades industriales o agrícolas, o para abastecer la demanda correspondiente a las actividades domésticas, turísticas y de ocio.

Las aguas residuales regeneradas constituyen un recurso no convencional de agua que se ha desarrollado en los últimos decenios. No obstante, para poder proceder a reutilizar este recurso se requieren las tecnologías adecuadas y unos estudios previos detallados (Miguel Salgot et al., 2011)

Según el Jaume Baeza (2011) la regeneración y reutilización de las aguas residuales obran un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro de agua. En concreto, la reutilización de agua regenerada dentro de una cuenca hidrográfica es una de las prácticas que mejor concuerda con los preceptos de un desarrollo sostenible (Seguí, 2004).

A nivel internacional, la agricultura es el mayor consumidor de agua, alcanzando aproximadamente el 75% de la demanda global (Solley et al., 1998). Es lógico por tanto que el riego agrícola represente la principal aplicación de las aguas regeneradas. Este es el caso de algunas regiones áridas o semiáridas del planeta como son Israel, Jordania, Túnez, algunos estados.

Actualmente en Israel, país pionero en la reutilización de aguas residuales, el 70% de las aguas residuales recogidas son tratadas y aplicadas al riego agrícola. En esta región la reutilización supone un 36% (430 Mm³/año) de los recursos hídricos aplicados al riego (Lazarova et al., 2005).

En Europa, algunos países de la cuenca Mediterránea han sido pioneros en la reutilización de efluentes depurados, particularmente España, Portugal, Grecia, Chipre, Italia y Francia. En la última década, la aparición de la Directiva Europea 91/271/EEC (EEC, 1991), relativa al tratamiento de aguas residuales urbanas, ha supuesto un impulso decisivo a la reutilización de aguas en todos los estados miembros de la Unión Europea. En el caso concreto de España, se estima que en el 2008 se reutilizaron 447 Mm³, que representan algo más de un 13% del volumen total tratado (Iglesias et al., 2010). El riego agrícola es el destino prioritario del recurso (71%), empleado

2. ANTECEDENTES

principalmente en las zonas costeras de la cuenca mediterránea y en las islas Baleares y las islas Canarias.

Existen otras aplicaciones de las aguas regeneradas que cobran cada vez mayor importancia. Como consecuencia de una mayor aceptación social y la implantación generalizada de los sistemas avanzados de tratamiento, una gran parte de estas aguas se están destinando a usos alternativos como son los recreativos, principalmente campos de golf, los usos urbanos o la recarga de acuíferos.

Según Irene Bustamante et al., (2011) la reutilización de aguas depuradas en España se realiza desde hace décadas, siendo uno de los países en los que esta práctica está más extendida. Sin embargo, no se llega a reutilizar más del 5% del total de las aguas residuales recogidas, aunque en algunos casos, como en Canarias, el agua depurada ha llegado a suponer un 20% del agua consumida. Se presentan tres ejemplos de reutilización de aguas depuradas con una importante incidencia en los aspectos ambientales y asociados a condiciones hídricas diversas. Los estudios se están llevando a cabo dentro del Proyecto CONSOLIDER-TRAGUA cuyo objetivo es abordar de manera integrada los aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Las zonas seleccionadas para los estudios de campo se sitúan en Andalucía donde el agua regenerada se aplica a filtros verdes y riego de cultivos para la obtención de biodiesel; Canarias para riego de campos de Golf y Cataluña donde el agua es inyectada para generar una barrera hidráulica contra la intrusión marina del acuífero. En los tres casos estudiados se incide en los aspectos suelo-agua-planta y sus impactos en el medio.

En España la reutilización de aguas depuradas constituye una práctica cada vez más extendida. Su aplicación ha sido objeto de regulación jurídica mediante la publicación del R.D. 1620/2007, en cumplimiento de las directrices recogidas en la Directiva Marco del Agua (entre otras). En esta normativa se establece la necesidad de que el agua a reutilizar cumpla unas normas de calidad mínimas dependiente de su uso. Sin embargo, la sostenibilidad de esta práctica va a depender también de la afección que se produzca al medio (planta, suelo, acuífero).

Si bien de forma general se puede apuntar que la afección al medio hídrico depende en gran medida de los tratamientos aplicados para su depuración, la afección a los acuíferos varía notablemente dependiendo de factores climáticos, tipos de suelo, materiales y funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos. Se debe destacar que las condiciones del medio, el tiempo de tránsito del agua por la zona no saturada y las características del flujo en el acuífero tienen una gran importancia sobre los procesos de atenuación y transporte de los compuestos químicos. Por ello, es necesario que previo a cualquier proyecto de reutilización se incluya la realización de estudios

2. ANTECEDENTES

específicos de investigación o demostración en la zona de aplicación, que permitan valorar posibles futuros efectos no deseados (dilatados en el tiempo) de difícil solución.

La necesidad de depurar los efluentes, en especial los de origen urbano, producidos como consecuencia de la actividad humana para evitar la contaminación ambiental es un hecho incuestionable. Además, la reutilización de las aguas depuradas para usos diversos, como el regadío o la recarga artificial de acuíferos, permite la recuperación parcial de los costes derivados del proceso de depuración y especialmente en las zonas áridas y semiáridas proporciona un recurso de agua alternativo. Por ello, la reutilización es una práctica cada vez más extendida.

Si bien desde finales del siglo XX el agua procedente de depuradora ha sido utilizada para diversos fines, se ha producido un incremento generalizado en los últimos años. Los usos derivados de su aplicación pueden ser diversos y abarcan desde los menos restrictivos (p.e riego de bosques) hasta los más exigentes (riego de productos agrícolas para su consumo en fresco), siempre y cuando se consigan unos criterios de calidad del agua mínimos para que su utilización sea segura. Posiblemente, el uso más extendido sea en la agricultura, por la existencia de numerosas ventajas derivadas del enriquecimiento en nutrientes, implicaciones socio-económicas, reducción de la dosis de aplicación de abonos y posibilidad de gestionar los efluentes de una forma más efectiva. A partir de los años 70, surge el concepto de aguas depuradas en numerosos países (Israel, EEUU, España, entre otros), aplicable a las aguas depuradas cuya calidad las hace susceptibles de ser reutilizadas, aunque con un enfoque desde el punto de vista sanitario (FAO) mayoritariamente. Sin embargo se desconocen los efectos desfavorables que pudieran producirse, tanto en el sistema planta-suelo como en las aguas superficiales y los acuíferos subyacentes para minimizar su impacto. Recientemente y como respuesta a la gran reutilización de aguas residuales urbanas tratadas en agricultura, se viene demostrando un creciente interés por la presencia de los denominados productos farmacéuticos y de uso personal (PPCPs) en las aguas subterráneas y superficiales. Estos efectos, que dependen en gran medida de las características del medio receptor, deben ser caracterizados previamente a la reutilización de este tipo de agua.

2.2.1.1. El agua residual

Según Espigares García et al. (2008) desde el momento en que aparecieron las primeras poblaciones estables, la eliminación de los residuos ha constituido un problema primordial para las sociedades humanas, ya que surgió la necesidad de deshacerse tanto de las excretas como de los restos de alimentación. Durante las

2. ANTECEDENTES

últimas décadas de este siglo, el mundo ha venido observando con inquietud, analizando y tratando de resolver una serie de problemas relacionados con la disposición de los residuos líquidos procedentes del uso doméstico, agrícola e industrial.

El agua participa en la industria de muy diversas formas siendo en la mayoría de los casos imprescindible en el sistema de producción. En los diferentes sectores industriales se dan muchos procesos por vía húmeda, lo que implica consumos elevados de dicho elemento.

Parte del agua que se extrae de suministros propios (pozos) o bien de la red de agua potable, se evapora durante el proceso y se pierde, otro porcentaje está en el producto fabricado, pero un porcentaje muy importante se genera en forma de aguas residuales.

Se deben considerar por otro lado las aguas de sistemas semicerrados que suponen caudales considerables. En este punto se incluirían los circuitos de refrigeración de equipos y procesos.

Las aguas resultantes de todos los procesos se pueden resumir en los siguientes tipos:

- Aguas residuales industriales, como resultado de las distintas etapas de fabricación.
- Aguas residuales sanitarias asimilables a urbanas que son la consecuencia de la población de trabajadores que participa en los procesos.
- Aguas de circuitos de refrigeración que son las responsables del intercambio de calor entre un equipo (prensas, motores, cogeneración, etc.) y el refrigerante (agua).
- Aguas de procesos.

Los efluentes industriales deben su diversidad a los procesos de los que proceden, y, en función de ellos, pueden tener una composición más o menos constante, o estar sujeta a variaciones cualitativas y/o cuantitativas considerables, según los horarios de funcionamiento de las industrias, la demanda del mercado o la posible influencia estacional en la producción. Los componentes de dichos vertidos se pueden clasificar, según los métodos de tratamiento, en:

- Elementos insolubles separables físicamente
- Materias grasas flotantes: grasas, hidrocarburos, alquitranes, aceites. Estas sustancias provocan olor y sabor desagradables, ensucian las instalaciones de

2. ANTECEDENTES

tratamiento, y pueden producir la muerte de peces por asfixia, al recubrir las branquias, y de gran variedad de algas e insectos acuáticos.

- Materias sólidas en suspensión: arenas, óxidos, hidróxidos, pigmentos, azufre coloidal, látex, fibras, etc. Pueden requerir coagulación-floculación para ser eliminadas.
- Elementos orgánicos separables por adsorción: colorantes, detergentes, compuestos macromoleculares diversos y compuestos fenolados.
- Elementos separables por precipitación:
 - Metales: hierro, cobre, zinc, níquel, berilio, titanio, aluminio, plomo, mercurio y cromo, precipitables en un rango determinado de pH. Estos metales pueden llegar a estar implicados en ciclos bioquímicos complejos.
 - Sulfitos, fosfatos, sulfatos y fluoruros: pueden ser precipitados por adición de determinados cationes.
- Elementos que pueden precipitar en forma de sales insolubles de hierro o en forma de complejos: sulfuros, fosfatos, cianuros y sulfocianuros. El cianuro impide las reacciones de oxidación del fósforo.
- Elementos separables por desgasificación o stripping: ácido sulfhídrico, amoníaco, alcoholes, fenoles y sulfuros.
- Elementos que necesitan una reacción de oxidación-reducción: cianuros, cromo hexavalente, sulfuros, cloro y nitritos.
- Ácidos y bases:
 - Ácidos clorhídrico, nítrico, sulfúrico y fluorhídrico.
 - Bases diversas.
- Elementos que pueden concentrarse por intercambio iónico o por ósmosis inversa:
 - Radionúclidos: Los isótopos más importantes, por su acumulación en las cadenas tróficas son ^{137}Cs , ^{85}Sr y ^{32}P
 - Sales de ácidos y bases fuertes: compuestos orgánicos ionizados (intercambio iónico) o no ionizados (ósmosis inversa).
- Elementos que se eliminan mediante tratamiento biológico: azúcares, proteínas y fenoles. Los tratamientos biológicos pueden aplicarse también, después de una fase de adaptación de los microorganismos, a compuestos orgánicos tales como el fenol, la anilina y ciertos detergentes.

Las masas receptoras, es decir, ríos y corrientes subterráneas, lagos, estuarios y el mar, en la mayoría de las ocasiones, especialmente en las zonas más densamente pobladas y desarrolladas, han sido incapaces, por sí mismas, para absorber y neutralizar la carga polucional que tales residuos imponen. De esta forma, han venido perdiendo sus condiciones naturales de apariencia física y su capacidad para sustentar una vida acuática adecuada, que responde al equilibrio ecológico que de ellas se espera para preservar nuestras masas hídricas. Como consecuencia de esto, en numerosas ocasiones pierden aquellas condiciones mínimas que les son exigidas para su racional y

2. ANTECEDENTES

adecuado aprovechamiento como fuentes de abastecimiento de agua, como vías de transporte o aún como fuentes de energía.

Los problemas causados no son sólo de índole física o estética, sino que trascienden al campo de la sanidad, ya que las comunidades humanas necesitan recurrir a diversos recursos de agua superficiales para su abastecimiento de agua de bebida, y si éstos están contaminados con los productos de desecho humanos o industriales, pueden dar lugar a problemas epidemiológicos graves.

Es evidente que la polución está disminuyendo la calidad del agua en muchas partes del mundo. Con este progresivo deterioro, el uso de técnicas y modelos para predecir la conducta de los organismos indicadores de la calidad del agua, ha llegado a ser cada vez más importante.

En la mayoría de las naciones, los programas de control de la contaminación, se han iniciado restringiendo las descargas, estableciendo limitaciones para determinados compuestos químicos y parámetros, y se han identificado algunos productos químicos tóxicos en las aguas residuales, para los que se han fijado límites de vertido.

A pesar del éxito conseguido en el control de la contaminación del agua en los países más industrializados, muchos efluentes continúan deteriorando los sistemas acuáticos e interfiriendo en los usos potenciales del agua. Los vertidos de aguas residuales pueden contener desde algunos centenares a varios miles de productos diferentes, muchos de ellos subproductos que ni siquiera han podido ser identificados.

Es por esto que las aguas residuales, antes de ser vertidas en las masas receptoras, deben recibir un tratamiento adecuado según su composición, capaz de modificar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas, hasta evitar que se provoquen los problemas enunciados de polución y de contaminación de las aguas receptoras.

La eliminación de las aguas residuales no es el único problema a considerar, ya que, al ser el agua un bien escaso, que cada día se necesita en mayores cantidades, es cada vez más imprescindible la reutilización de los recursos hídricos disponibles para poder satisfacer las necesidades humanas.

Las aguas residuales se pueden definir como aquellas que por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de sustancias y/o microorganismos.

Dentro de este concepto se incluyen aguas con diversos orígenes:

2. ANTECEDENTES

- Aguas residuales domésticas o aguas negras: proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal y de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas.
- Aguas blancas: pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden de evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración.
- Aguas residuales industriales: proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales y contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales.
- Aguas residuales agrícolas: procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo.

Las aguas residuales, debido a la gran cantidad de sustancias (algunas de ellas tóxicas) y microorganismos que portan, pueden ser causa y vehículo de contaminación, en aquellos lugares donde son evacuadas sin un tratamiento previo.

Se puede definir la polución del agua como una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciéndola impropia y peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la vida natural.

Según esta definición, la polución sería una consecuencia ineludible del desarrollo y la civilización. Esto es explicable, ya que conforme aumenta el desarrollo de las poblaciones, se incrementa a su vez la diversidad de los agentes contaminantes procedentes de actividades agrícolas, industriales y urbanas, que el hombre no se preocupa de destruir o reciclar, o no lo hace en la magnitud suficiente. De esta forma, se acaba saturando el poder autodepurador del medio natural.

Algunas de estas sustancias tienen un comportamiento desconocido en los organismos vivos. En otros casos, es evidente que la contaminación ambiental por diversas sustancias, que quizás no estén en alta concentración en el medio, pero a las que el hombre está expuesto durante largos períodos de tiempo, es importante en varias

2. ANTECEDENTES

enfermedades crónicas, incluido el cáncer. A continuación se relacionan los principales inconvenientes de las aguas residuales.

Malos olores y sabores

Son consecuencia de la diversidad de sustancias que portan, y sobre todo, de los productos de la descomposición de éstas, especialmente en aquellos procesos, sobre todo anaerobios, en los que se descompone materia orgánica, con desprendimiento de gases. A esto hay que añadir las causas naturales de olores y sabores: la proliferación de microorganismos, los procesos de descomposición, la presencia de vegetación acuática, mohos, hongos, etc., y la reducción de sulfatos a sulfuros, en condiciones anóxicas.

Acción tóxica

Es el efecto y la repercusión que tienen algunos residuos sobre la flora y fauna natural de las masas hídricas receptoras y sobre los consumidores que utilicen esas aguas, o que se vean afectados por la acumulación de estas sustancias tóxicas en la cadena alimentaria. A este respecto, es importante tener en cuenta que en numerosas ocasiones las aguas residuales se utilizan, sin un tratamiento previo, para el riego de cosechas de verduras y hortalizas, con el enorme riesgo que esto supone, ya que el hombre puede consumirlas crudas, pasando a él directamente la contaminación por tóxicos o microorganismos.

En otras ocasiones, no son directamente los residuos los que provocan la desaparición de los organismos del agua, sino que para la descomposición de las sustancias contaminantes son necesarias grandes cantidades de oxígeno, llegando a agotarse y creando condiciones anóxicas que impiden la vida acuática.

Por estas razones, se están realizando diversos estudios sobre la toxicidad de algunos compuestos sobre organismos y microorganismos acuáticos, y sobre los niveles de resistencia y adaptación de éstos a algunas sustancias y elementos presentes en el agua.

Estos organismos se pueden utilizar como bioindicadores de la calidad de las aguas, ya que su presencia o ausencia nos indica el nivel de contaminación, siempre teniendo en cuenta el medio de referencia, ya que la presencia de un mismo organismo en distintos medios puede indicar distintos grados de polución, según el medio del que se trate, y la simple comparación puede llevar a una subestimación del grado de contaminación. Los efectos tóxicos pueden ser:

2. ANTECEDENTES

- Letales: causan muerte por envenenamiento directo.
- Subletales: por debajo de los niveles que causan la muerte, pero que pueden afectar al crecimiento, reproducción o actividad de los organismos.
- Agudos: causan un efecto (normalmente la muerte) en un corto período de tiempo.
- Crónicos: causan un efecto letal o subletal durante un período de tiempo prolongado.
- Acumulativos: se incrementa el efecto con dosis sucesivas.

Los compuestos con acción tóxica tienen características y orígenes diversos:

1) Compuestos orgánicos de efluentes domésticos e industriales

Representan el problema más antiguo de contaminación del agua. En un principio, se priorizaban los efectos de los residuos domésticos sobre los industriales, debido al potencial de efectos agudos sobre la salud que poseían los residuos humanos, comparados con la creencia de que los residuos industriales producían sólo efectos indirectos. Pero conforme fueron apareciendo nuevos compuestos químicos procedentes de las industrias, se empezó a prestar una mayor atención a los efectos de los residuos industriales sobre la salud y su impacto en el medio ambiente.

Hay una gran diversidad de compuestos orgánicos presentes en el ambiente acuático causando la polución de éste, y existen numerosas técnicas para detectarlos.

Podemos citar los hidrocarburos, y dentro de éstos, los hidrocarburos aromáticos policíclicos, algunos de los cuales son cancerígenos. También son muy importantes los fenoles que provocan problemas de olor y sabor acentuados cuando éstos reaccionan con el cloro en los procesos de cloración del agua.

Otras sustancias a tener en cuenta son los compuestos organometálicos, ya que su presencia en el medio ambiente, incluso a pequeñas concentraciones, puede afectar a la cadena alimentaria, alcanzando concentraciones mucho mayores en los organismos.

Los de mayor interés son los derivados del plomo, cadmio, estaño y mercurio.

Hay que hacer también mención especial de las industrias estacionales (azucareras, almazaras, etc.) que provocan contaminaciones agudas en determinadas épocas del año.

En los últimos años, se está tomando un interés creciente por los agentes tensoactivos, cuyas espumas engloban multitud de microorganismos, inhiben la oxidación química y biológica y dificultan los procesos de tratamiento.

2. ANTECEDENTES

2) Compuestos inorgánicos y minerales

Proceden de industrias mineras y de productos químicos inorgánicos. Entre ellos podemos citar amonio, cianuros, fluoruros, sulfuros, sulfitos y nitritos.

También están los metales pesados, que se acumulan en la cadena alimentaria, a través de la captación por el fitoplancton, peces y organismos filtradores, y pueden afectar al hombre.

De todos los residuos industriales, el drenaje ácido de las minas alcanza el récord, en cuanto a perjuicios para las fuentes de agua, puesto que aumenta los costos de tratamiento y distribución y origina corrosiones.

3) Compuestos procedentes de efluentes agrícolas

Los residuos agrícolas contienen altos niveles de nitratos, fosfatos, amonio y sulfuros, y el drenaje de los silos puede ser tóxico, debido a sus bajos niveles de pH. Pero los compuestos más tóxicos de estos efluentes son los fertilizantes, herbicidas, fungicidas e insecticidas.

4) Compuestos que se forman durante el tratamiento del agua, asociados al proceso de cloración

Los trihalometanos, de los cuales uno de los más peligrosos es el cloroformo, por su posible carácter carcinogénico. La formación de trihalometanos se ve acentuada cuando el agua tiene gran contenido en materia orgánica, como consecuencia de los crecimientos explosivos de algas en los meses estivales.

2.2.1.1.A. Recogida del agua

Aunque se conocen ya primitivas alcantarillas en el Imperio romano, el proyecto y construcción de redes de saneamiento no experimentó desarrollo alguno hasta la década 1840-1850.

La preocupación por el problema de evacuación y eliminación de los residuos procedentes de la actividad humana, llevó a las autoridades competentes a la construcción de redes de alcantarillado que alejaban las aguas residuales del núcleo de la población. Se dejaron de utilizar los pozos negros, que solían contaminar los pozos de obtención de agua potable, y se canalizaron los residuos de forma que fueran a parar a uno o unos pocos puntos. Pero el problema continuaba, ya que las alcantarillas debían seguir las líneas de pendiente, y el punto de vertido final solía estar a un nivel más bajo que la ciudad, coincidiendo en la mayoría de los casos con un cauce de agua.

2. ANTECEDENTES

En las ciudades desarrolladas, las redes de alcantarillado conducen las aguas residuales hasta las estaciones de tratamiento. Estos sistemas de recogida pueden ser de dos tipos:

a) Separativo: comprende dos canalizaciones distintas, una la sanitaria, para la evacuación de aguas residuales domésticas e industriales, y otra que recoge las aguas superficiales y atmosféricas y que suele descargar directamente en los cursos de aguas naturales.

b) Unitario: se recogen en una misma canalización los dos tipos de aguas residuales señalados. En este sistema se producen cambios significativos de flujo durante las tormentas.

Cada uno de los sistemas tiene ventajas e inconvenientes. El sistema unitario es más económico, ya que sólo habría que construir una conducción por cada calle. Pero tiene inconvenientes, ya que el volumen de agua es mayor. Además, han de construirse redes capaces de soportar las variaciones de flujo debidas a las precipitaciones atmosféricas.

La planificación y proyecto de una red de saneamiento supone la determinación del caudal de aguas residuales, el cálculo hidráulico de alcantarillas, grandes conducciones y estructuras de enlace y derivación, selección adecuada de instalaciones complementarias y proyecto de estaciones de bombeo.

Los avances más importantes a este respecto, han sido la aplicación de técnicas fotogramétricas y de ordenadores al proyecto de alcantarillas, la mejora de los materiales de construcción y la utilización de informática al control de alcantarillas para aguas pluviales.

2.2.1.1.B. Cantidad

La cantidad de aguas residuales que produce una comunidad va en proporción al consumo de agua potable y al grado de desarrollo económico y social, puesto que un mayor desarrollo trae consigo un mayor y más diverso uso del agua en las actividades humanas. Los factores que van a influir en la cantidad son:

- Pluviometría: cuando se utiliza el sistema unitario.
- Consumo de agua potable.
- Ingestión de agua.
- Heces y orina.

2. ANTECEDENTES

- Pérdidas: pueden producirse por fuga en las conducciones, o porque parte del agua potable consumida no llega a las alcantarillas (reciclaje en la industria, riego de jardines, etc.).
- Ganancias: consumo y vertido de otros líquidos distintos del agua potable.

En la práctica, del 60 % al 80 % de agua potable consumida se transforma en residual, y si a esto añadimos el agua procedente de las precipitaciones atmosféricas, se pueden alcanzar cifras superiores a las de consumo. El volumen de aguas residuales va a sufrir una serie de variaciones respecto al tiempo.

Está claro que en el sistema unitario, la pluviometría va a jugar un papel importante en estas variaciones. Pero, también el flujo de aguas domésticas e industriales sufre oscilaciones de diversos tipos:

- Anuales y mensuales: en los meses de verano, es mayor el consumo de agua por ingestión, aseo, usos recreativos y municipales, etc. Así mismo, las afluencias turísticas originan grandes variaciones en la producción de agua potable. También, hay industrias estacionales que sólo consumen agua durante una parte del año.
- Semanales: hay algunos días en la semana en los que se consume mayor cantidad de agua (aseo, coladas, etc.). En los tipos de industrias que no funcionan durante el fin de semana, los cambios en la cantidad de aguas residuales son apreciables.
- Diarias: es mayor el vertido de agua residual, tanto doméstica como industrial, durante el día que durante la noche, produciéndose durante ésta los caudales mínimos.

2.2.1.1.C. El agua residual industrial

C.1. Sistemas de producción, puntos en los que se originan las aguas residuales

C.1.1) Aguas residuales industriales y de proceso

Proceden de la limpieza de líneas de producción, envases y depósitos, así como de la limpieza de las diferentes maquinarias empleadas en el proceso industrial (bombos de molturación, tanques de agitación, reactores, etc.).

Las principales características y problemas más importantes que aparecen en las aguas de este tipo son:

2. ANTECEDENTES

a) Presencia de metales pesados procedentes de las materias primas empleadas en el proceso industrial, que forman cationes solubles o complejos metálicos. Un importante contaminante es el boro, que es un elemento habitual en la composición de fritas y esmaltes, detergentes, etc... y que en disolución se presenta como borato, anión muy soluble, que resulta imposible de eliminar con los tratamientos convencionales. De modo que si se encuentra en el agua de vertido permanece en los acuíferos contaminándolos.

b) Materia orgánica en suspensión y disuelta que es la responsable de la aparición de malos olores, espumas y biomasa. Dicha materia orgánica procede de la limpieza de contenedores, tanques de agitación, reactores, etc. Es la responsable del aumento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La descomposición de dicha materia orgánica produce malos olores y fouling o biomasa que en el interior de las tuberías da lugar a la proliferación de flora bacteriana.

c) Generación de un importante volumen de fangos como consecuencia del proceso de depuración, que deben transportarse hasta el punto de gestión.

Este tipo de aguas residuales industriales se depuran mediante un procedimiento físico-químico por decantación o por flotación.

C.1.2) Aguas residuales sanitarias

Se originan como consecuencia de la presencia de trabajadores en las plantas. Proviene de los aseos, duchas, lavabos y comedores. Se trata de aguas asimilables a urbanas. Contienen elevadas concentraciones de materia orgánica y de compuestos nitrogenados.

Su proceso de depuración no tiene nada que ver con el de las aguas industriales y se debe someter a un tratamiento biológico, para acondicionarlas y poder realizar un vertido en condiciones controladas.

C.1.3) Aguas de circuitos de refrigeración

Estas suponen un apartado especial dentro de la industria, ya que no se trata de aguas residuales, aunque en ocasiones presentan volúmenes y caudales de agua muy importantes.

La utilización del agua como fluido refrigerante es una práctica ampliamente extendida, ya sea en sistemas de un solo paso o en sistemas semicerrados y cerrados. El agua se considera el disolvente universal, ya que la misma solubiliza tanto una roca

2. ANTECEDENTES

como el propio acero, a su vez los componentes salinos presentes en el agua pueden producir modificaciones muy importantes en el comportamiento de la misma.

C.1.4) Aguas de proceso

Son las aguas que se reutilizan dentro del proceso industrial. Su función principal es la de refrigerar un proceso (como por ejemplo muelas de pulido o sierras de corte). Al igual que las aguas de circuito de refrigeración, no se consideran aguas residuales.

Las principales características son:

- a) Elevada salinidad provocada por el continuo aporte de sales procedentes de los diferentes procesos.
- b) Los elevados valores de conductividad hacen que aparezcan problemas de corrosiones e incrustaciones sobre las máquinas y tuberías, reduciendo considerablemente la vida media de las mismas.
- c) En este tipo de agua resulta imprescindible establecer un régimen de purgas adecuado dentro del circuito, para mantener el contenido salino dentro de unos valores adecuados.

Es por ello que la utilización de este líquido refrigerante está siempre acompañado de medidas correctoras sobre la calidad de la misma o sobre los efectos que su uso produce sobre las superficies en contacto.

2.2.2. Usos ambientales de la reutilización en España

España es el país europeo con mayor déficit hídrico donde los recursos hídricos no convencionales, como la desalación o el agua procedente de depuradora, constituyen una parte importante de la gestión integrada de los recursos hídricos de forma generalizada. Paralelamente, también es uno de los países que más agua reutiliza aunque en cantidades poco significativas; no se llega a reutilizar más del 5% del volumen de las aguas residuales captadas, aunque según estudios recientes, el potencial de reutilización unas 10 veces superior al nivel actual (Hochstrat et al., 2005). Entre las causas de la escasa reutilización, cabe citar la ausencia de protocolos de tratamiento para las aguas regeneradas en las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), ausencia de criterios claros tanto en la elección de tecnologías para tratamientos avanzados como en los instrumentos que permitan establecer las ventajas económicas y sociales de la reutilización.

2. ANTECEDENTES

Recientemente, la ausencia de indicadores de calidad de las aguas reutilizables en función de los usos se ha visto subsanada mediante la publicación de legislación específica al respecto, con el Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007) por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Este Real Decreto desarrolla la legislación pendiente tras la publicación del Plan Hidrológico Nacional (11/2005) a la vez que da cumplimiento a las exigencias del Reglamento de Dominio Público Hidráulico y transpone la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) e incorpora el concepto y la definición de ‘agua regenerada’, cuyo uso requerirá una concesión administrativa que se concederá según la posterior utilización del agua. En el Real Decreto, se distinguen los siguientes usos: urbano, agrícola, industrial, recreativo y ambiental y en su anexo I se recogen los criterios de calidad diferenciados según los usos, aportando límites de obligado cumplimiento. Los criterios definidos tienen la consideración de mínimos obligatorios exigibles, incluyendo parámetros físico-químicos y sanitarios. Además, para el resto de los parámetros es necesario que las aguas depuradas cumplan con las condiciones necesarias para el vertido de aguas residuales según se recoge en el Real Decreto 1315/1992 (BOE, 1992). La Tabla 1 (anexo de tablas) resume los usos y las calidades de agua indicadas en el citado Real Decreto, comparándolas con los datos recogidos por Levine y Asano (2004) basados en las normas de la EPA. La tabla no incluye otros criterios que se especifican en la norma española, que en función de los usos contempla el control de otros contaminantes, como *Legionella* sp. si existe riesgo de aerolización o nitratos si se va a proceder a recarga de acuíferos.

2.2.3. Ejemplos de reutilización

En el marco del proyecto de investigación CONSOLIDER-TRAGUA, iniciado en 2006, se aborda de manera integrada los diferentes aspectos implicados en la reutilización de aguas residuales procedentes de EDARs. Entre los diversos objetivos planteados se incluye la realización de un inventario de aguas residuales potencialmente aptas para su reutilización, el establecimiento de protocolos de tratamiento en función de sus características cualitativas, los aspectos económicos y estimación del impacto de su reutilización sobre el medio físico.

Un aspecto importante está constituido por la investigación de la reutilización de aguas orientados a la recarga de acuíferos y a regadío. Los estudios se desarrollan en tres áreas (Cataluña, Andalucía y Canarias; Fig. 24) caracterizadas por su diversidad geográfica, condiciones hídricas diferenciadas y la reutilización del agua regenerada mediante diversas metodologías.

2. ANTECEDENTES

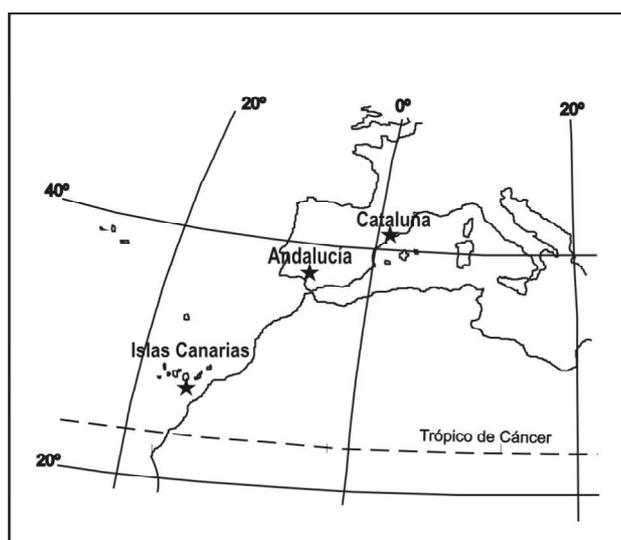


Figura 24. Situación geográfica de las tres áreas de estudio seleccionadas para la reutilización de las aguas regeneradas. Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

1) Barrera hidráulica contra la intrusión salina. Delta del Llobregat (Barcelona)

El delta del río Llobregat, formación sedimentaria de 97kmde extensión situada en las proximidades de Barcelona (Fig. 24) constituye uno de los mejores ejemplos hidrogeológicos estudiados desde los años 60 del que existen innumerables publicaciones al respecto. El delta, desarrollado al pie de la Cordillera Litoral Catalana, está formado por materiales cuaternarios de naturaleza detrítica depositados sobre materiales de edad pliocena, a excepción de las zonas de borde donde descansa sobre materiales más antiguos.

A nivel hidrogeológico, la formación deltaica está caracterizada por la presencia de tres acuíferos: el valle Bajo, el acuífero superficial y el acuífero profundo. El primero de estos se extiende por el actual valle aluvial del río hasta el estrechamiento del valle, donde se divide en dos acuíferos separados por una cuña de limos grises de 40 m de potencia. La cuña de limos confina la formación acuífera profunda, salvo en las zona de borde donde desaparece y los dos acuíferos pasan a estar hidráulicamente conectados por unas arenas finas. El acuífero confinado, de 6m de espesor medio, está constituido por materiales cuaternarios detríticos (arenas finas y gravas) y se extiende a lo largo de casi toda la superficie deltaica, prolongándose hacia el mar por debajo de la cuña de limos (Fig. 25). El acuífero superior, inicialmente surgente, no está sometido a explotación dada la elevada contaminación de sus aguas. El acuífero inferior ha constituido una fuente importante de abastecimiento para las industrias implantadas en la zona y ha estado sometido a una gran explotación, que ha conducido a un descenso piezométrico generalizado desde los años 70 y a las presencia de intrusión marina en diversos sectores. Los valores de contenido de cloruros en algunos de los pozos muestreados llegaron alcanzar valores de hasta 20.000 mg/L.

2. ANTECEDENTES

A lo largo de los años se han realizado diversos estudios encaminados al estudio y posible control de la cuña de intrusión marina en el acuífero profundo. Entre las propuestas cabe destacar la construcción de una barrera hidráulica positiva de inyección, similar a la que existe actualmente en funcionamiento en el Orange County Water District (California), mediante agua regenerada procedente de la planta de tratamiento Depurbaix.

La primera fase de la barrera, consta de 4 pozos de inyección aunque el P4 no está operativo actualmente, (Fig. 26) de 70 m de profundidad, separados 300 m entre si y totalmente penetrantes en el acuífero inferior. Se sitúan paralelos a la línea de costa a una distancia de 1500 m. Los pozos se perforaron en 2006, presentan un diámetro de 610 mm y presentan 6 m de rejilla perforada a lo largo del nivel acuífero. Según resultados de los ensayos hidráulicos efectuados después de la perforación, los valores de transmisividad oscilan entre 700 y 2000 m²/día (P1 y P3 respectivamente) y 100-200 m²/ día (P2 y P4).

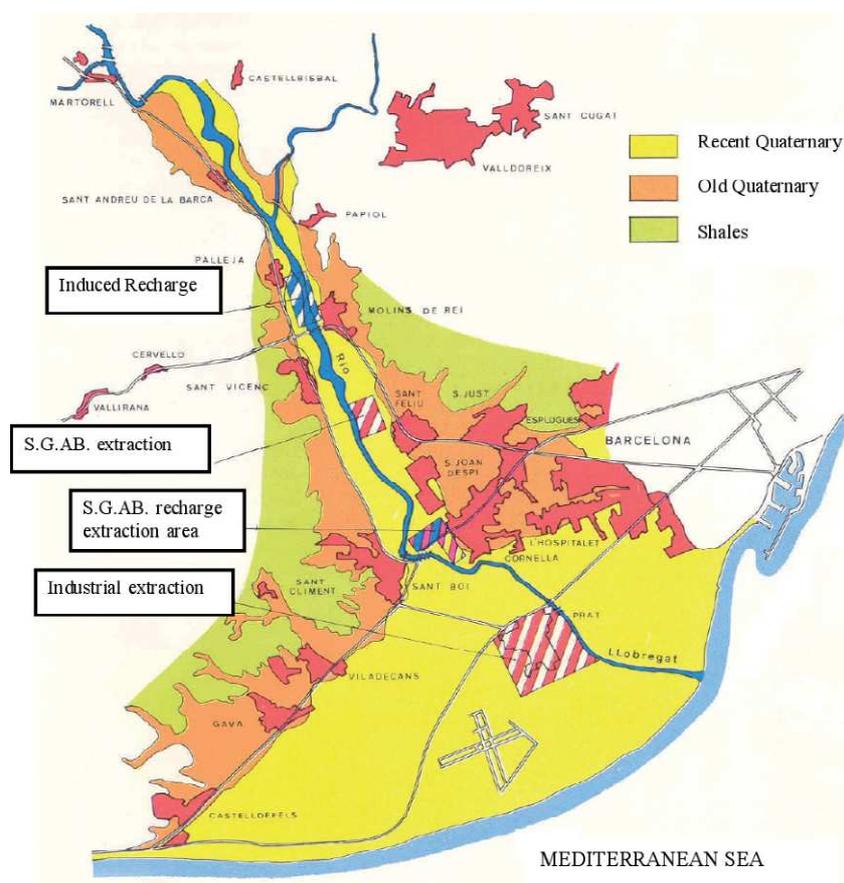


Figura 25. El Delta del Llobregat (Barcelona). A) Situación geográfica y B) perfil longitudinal donde se observa la presencia de los dos acuíferos separados por la cuña de limos (marrón).

Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

2. ANTECEDENTES

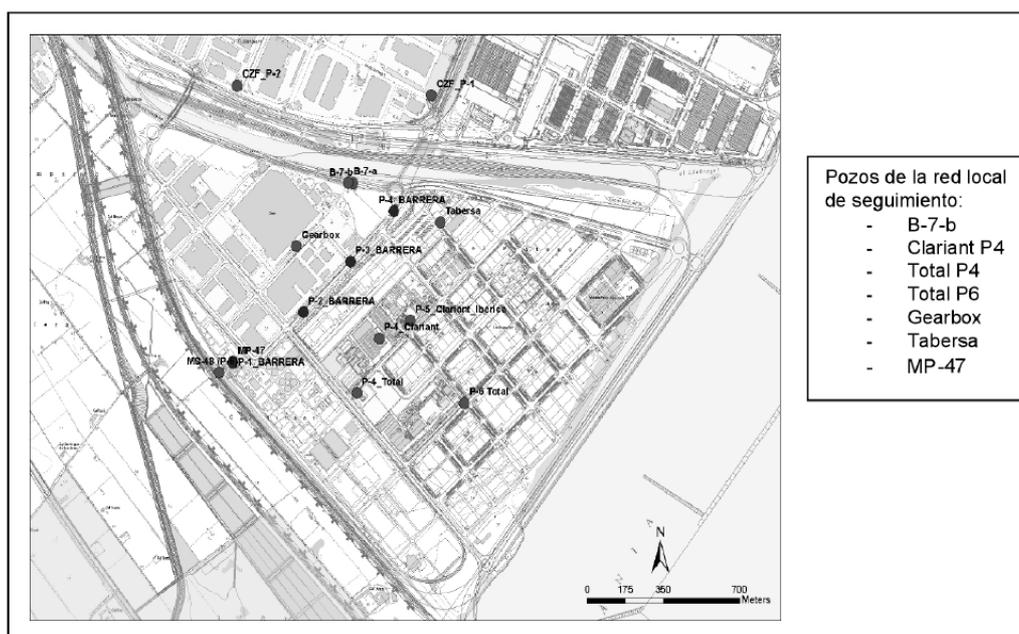


Figura 26. Situación de los pozos de inyección y muestreo correspondientes al estudio de la barrera hidráulica del Delta del Llobregat. Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

En marzo de 2007 se inició la inyección de $2.500 \text{ m}^3/\text{día}$ de agua regenerada y el total de agua inyectada a finales del mismo año se estima en 244.000 m^3 . El agua inyectada está constituida por agua residual depurada en la EDAR mediante tratamiento terciario, y posteriormente sometida a ultrafiltración, ósmosis inversa y desinfección ultravioleta. Como complemento al proyecto global llevado a cabo por la Agencia Catalana del Agua-ACA, en este estudio se ha controlado la presencia de 170 compuestos emergentes (Anexo 2, prioritarios y metales pesados considerados de interés en muestras de agua procedentes de la depuradora, aguas regeneradas para inyección y pozos del acuífero).

Los contaminantes emergentes constituyen un grupo de compuestos químicos de origen muy diverso caracterizados por su elevada producción y consumo, lo que comporta su continua presencia en el medio ambiente, por lo que no necesitan ser persistentes para ocasionar efectos negativos. Entre ellos se incluyen fármacos (antibióticos, analgésicos, etc.), productos para diagnóstico, esteroides y hormonas, antisépticos, productos para el cuidado personal (protectores solares, fragancias, etc.), aditivos de gasolina, etc. Aunque en su mayoría son compuestos orgánicos, se diferencian de los agroquímicos por presentar múltiples grupos funcionales. Este hecho añade complejidad a su transporte y degradación en el medio ambiente, y a las técnicas analíticas necesarias para su monitoreo. En general estos compuestos no son ni acumulativos ni volátiles, aunque los perfumes son tóxicos, bioacumulativos, persistentes y volátiles. Los efectos que pueden llegar a producir en el hombre y en la biota son desconocidos y al ser introducidos de una forma continua en el medio se convierten en contaminantes persistentes, incluso si su periodo de degradación es

2. ANTECEDENTES

corto. Su origen en el medio ambiente es diverso. El mayor porcentaje procede de los fármacos excretados a través de la orina y heces y que se incorporan al agua de de las redes de saneamiento. En otras ocasiones, su presencia se origina a partir de lixiviado de vertederos, escorrentía en zonas con animales estabulados, descarga directa de aguas negras debido a tormentas e incluso a partir de la producción de proteínas por plantas modificadas genéticamente (conocido como biofarming).

La necesidad de un control exhaustivo de la calidad del agua a inyectar es prioritaria dado que no todos los contaminantes son eliminados en el tratamiento terciario. El gran interés existente sobre los contaminantes emergentes desconocidos o no reconocidos como tales en el medio acuático, reside en el desconocimiento de sus efectos sobre el medio ambiente y la salud humana.

2) Riego campo de golf en Canarias

Dada la escasez de recursos hídricos existente en Gran Canaria (Islas Canarias), la reutilización de aguas depuradas para riego es una práctica utilizada desde finales de los años 60. En la actualidad, supone el 8% de los recursos hídricos en la isla y se han implementado tratamientos terciarios con desalinización por ósmosis inversa así como una importante infraestructura para la distribución del agua regenerada por la isla.

La reutilización de aguas regeneradas se centra en el Campo de Golf de Bandama situado al NE de la isla, (Fig. 27) cuyo objetivo es el estudio integrado a medio-largo plazo de los procesos que sufre el agua aplicada en el suelo y en la zona no saturada desde que se infiltra hasta su llegada al acuífero infrayacente. Está situado en una zona con una pluviometría media de 300 mm y la temperatura media es de 19°C (con 22°C en verano y 16°C en invierno). La precipitación durante el invierno 2008/09 ha sido especialmente lluviosa, alcanzando los 440 mm.

El campo de golf tiene una superficie de 14,5 ha. Desde 1976 ha sido regado por aspersión con agua depurada sometida a diversos tratamientos para mejorar su calidad y a partir del año 2002 se aplican métodos de desalación para reducir su salinidad. Las frecuencias de riego, determinadas por el green keeper, varían de invierno a verano. La especie regada es el Kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*), una gramínea C4 muy bien adaptada a los ambientes cálidos y suelos salinos.

2. ANTECEDENTES

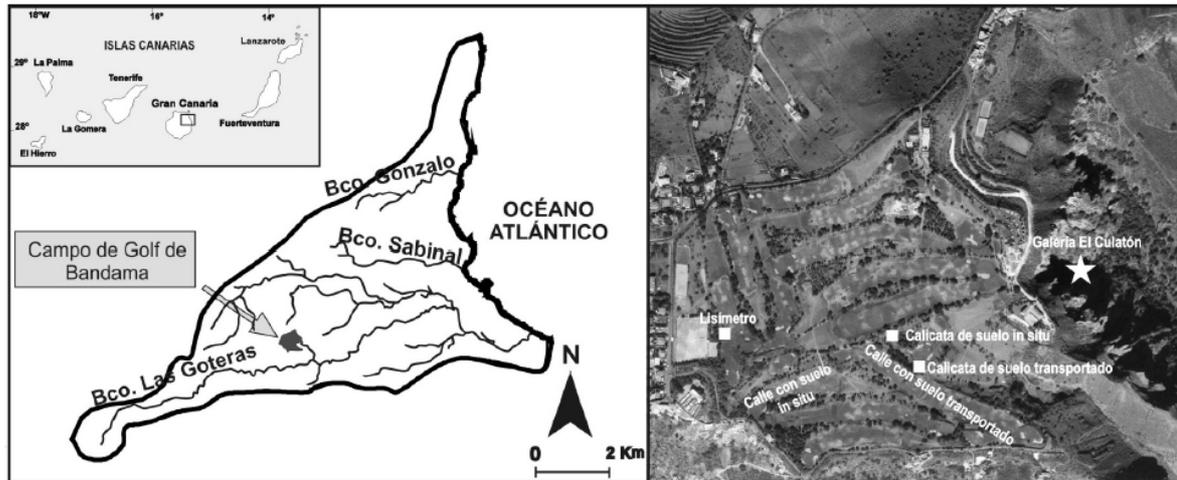


Figura 27. Localización del área de estudio en la isla de Gran Canaria. A) zona N4 de la Planificación Hidrológica de la Isla. B) situación del lisímetro y de la galería de agua muestreados.

Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

Desde el punto de vista hidrogeológico, la isla se considera un acuífero único con una superficie piezométrica en forma de domo que alcanza máximos en el centro de la isla. El acuífero infrayacente al campo de golf está formado fundamentalmente por materiales volcánicos situados en las medianías de la isla y el flujo del agua subterránea se produce de OSO a ENE, según se puede deducir de la piezometría realizada en 2009 a partir del inventario de puntos de agua de la zona (Fig. 28). En el área del campo de golf, el nivel piezométrico se encuentra a unos 250 m de profundidad, La parte superficial de esta zona está constituida por un suelo de poco espesor (0,5-1 m), mientras que en el resto de la zona no saturada, el agua debe circular preferentemente por fracturas, aunque dependiendo de la naturaleza de los materiales, cierta fracción puede fluir por porosidad.

2. ANTECEDENTES

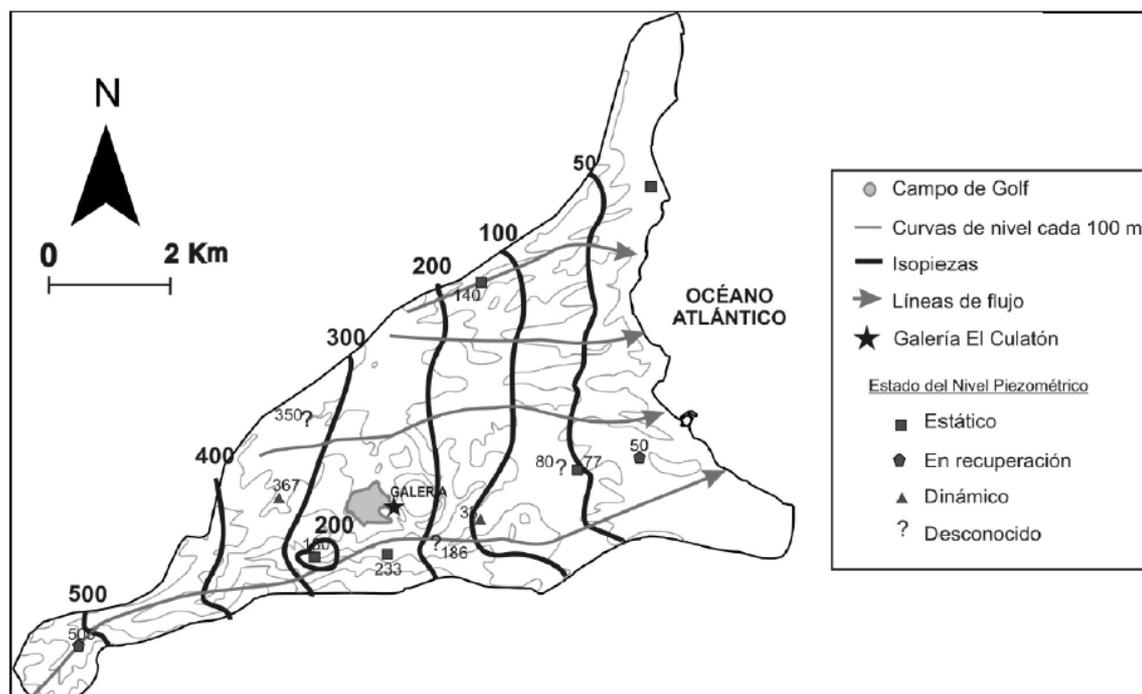


Figura 28. Piezometría de la zona N4 definida en la planificación hidrológica de Gran Canaria para 2009.
Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

La caracterización del perfil del suelo se ha realizado mediante la toma de muestras inalteradas. Para el muestreo del lixiviado a través del suelo se ha instalado in situ un lisímetro a 60 cm de profundidad. En el escarpe Oeste de la Caldera, a unos 50 m por debajo del campo de golf, se muestreó una galería de agua (galería El Culatón) cuyas muestras se consideraron representativas del agua que circula por la zona no saturada desde el campo de golf hasta el acuífero.

Actualmente se realiza el muestreo periódico del agua de riego, agua del lisímetro, agua de la galería y agua de pozos seleccionados. Las determinaciones analíticas incluyen elementos mayoritarios (pH, Conductividad eléctrica, Residuo Seco, sodio, potasio, Calcio, Magnesio, Cloruros, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos, Nitratos, Amonio, Fósforo, Boro, Cobre, Hierro, Manganeso y Zinc) compuestos emergentes seleccionados, y metales pesados. Los compuestos emergentes analizados incluyen nicotina, atenolol, metamizol, paraxantina, ibuprofeno, cafeína, fluoxetina y permetrina. Está previsto aumentar la base de datos de compuestos en los próximos muestreos.

La caracterización edafológica del campo de golf ha permitido identificar dos tipos de suelo: un suelo in situ, de naturaleza franco-arcillo-arenoso, y un suelo transportado de cotas superiores de la misma vertiente de la isla, de naturaleza arcillo-limosa. Los primeros resultados obtenidos de los análisis de suelo realizados en dos calles representativas de sendos suelos permiten concluir que ambos presentan una alta variabilidad incluso considerando separadamente cada zona homogénea respecto al

2. ANTECEDENTES

manejo del agua (calle o rough). La evolución temporal de las muestras de suelo tomadas en dos campañas llevadas a cabo en 2008 y 2009 apunta a que el invierno 2008-09 (lluvioso) ha dado lugar a un lavado del mismo, con el probable efecto superpuesto, para los elementos poco móviles, de una mayor actividad biológica (caso del fósforo). Asimismo, se ha observado un diferente comportamiento para ambos tipos de suelos: mientras el suelo in situ presenta un lavado mayor, los contenidos en sales se mantienen más estables para el suelo transportado (más arcilloso).

De los primeros resultados lisimétricos, puede inferirse que se produce un incremento en los iones de las aguas recogidas en el mismo respecto al agua de riego, causado por las elevadas fracciones de lavado que se usan en el campo de golf y originando un lixiviado de sales del suelo. Los iones que presentan incremento son: Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, NO₃⁻ y B comparativamente con el aumento en Cl (atribuible a la concentración por evapotranspiración).

La comparación de los resultados químicos obtenidos para las aguas subterráneas de la zona, con el agua de la galería permiten concluir que esta galería presenta un agua químicamente diferente a los pozos de los alrededores, variable en el tiempo y que debe drenar un acuífero colgado al que llegan los retornos de riego del campo de golf. Por lo que respecta a la presencia de contaminantes emergentes analizados, nicotina y cafeína están presentes en casi todas las muestras, La presencia del resto de compuestos es variable (siempre en cantidades de ng/L).

3) Filtros verdes. Carrión de los Céspedes (Sevilla)

En Carrión de los Céspedes (Fig. 24), el gobierno regional de Andalucía, a través de la Consejería de Medio Ambiente, dispone de una planta experimental de 35.000 m² donde se investigan técnicas convencionales y no convencionales de depuración de agua. Desde 2005, en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) está en funcionamiento un Filtro Verde con una superficie de 2.000 m², subdividido en dos parcelas (Fig.17). En la primera se cultiva una plantación de chopos (clon I-214 del *Populus euroamericana*) y de eucaliptos (*Eucaliptos camaldulensis*) en la otra. En estos sistemas, se obtienen rendimientos medios entre el 85-95% para los sólidos en suspensión, del 85-95% para la DBO₅, el 80-90% para la DQO, entre el 50-90% para el nitrógeno, el 40-90% para el fósforo y del 99,9% para los coliformes fecales.

En el marco del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA, se ha diseñado un nuevo Filtro Verde con el objetivo de regenerar y reutilizar aguas depuradas, obtención de biomasa y recarga de acuíferos mediante infiltración a través del terreno. Para ello, se han acondicionado 4 nuevas parcelas de cultivo (2 regadas con aguas depuradas y 2 con

2. ANTECEDENTES

agua de pozo, como parcelas de referencia), en las que se cultivarán *Jatropha curcas L.* y *Paulownia tomentosa*. La primera es una planta oleaginosa muy utilizada para la producción de biodiesel. La segunda es una especie arbórea de crecimiento rápido, con potencial utilización en plantas energéticas y muy resistente a la polución. La calidad del agua utilizada en la reutilización es la fijada en los puntos 5.1 (a) y 5.3 (a) del anexo 1.a del Real Decreto 1620/2007 (Anexo 1.a del apartado de anexos).



Figura 29. Esquema general de la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes-PECC (Sevilla) y localización de los piezómetros instalados y de las secciones geofísicas realizadas. Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

Para evaluar la variabilidad espacial de los materiales geológicos en la PECC, se aplicaron técnicas geofísicas basadas en tomografía eléctrica (Lillo et al., 2009). Se realizaron varios perfiles transversales (Fig. 29).

En la parcela experimental, se han instalado 9 nidos de piezómetros con profundidades de 2, 6 y 10 m (Fig. 30). A partir de las muestras procedentes de los testigos continuos de la perforación se realizaron análisis texturales, fisicoquímicos y mineralógico y del contenido de humedad y densidad natural.

2. ANTECEDENTES

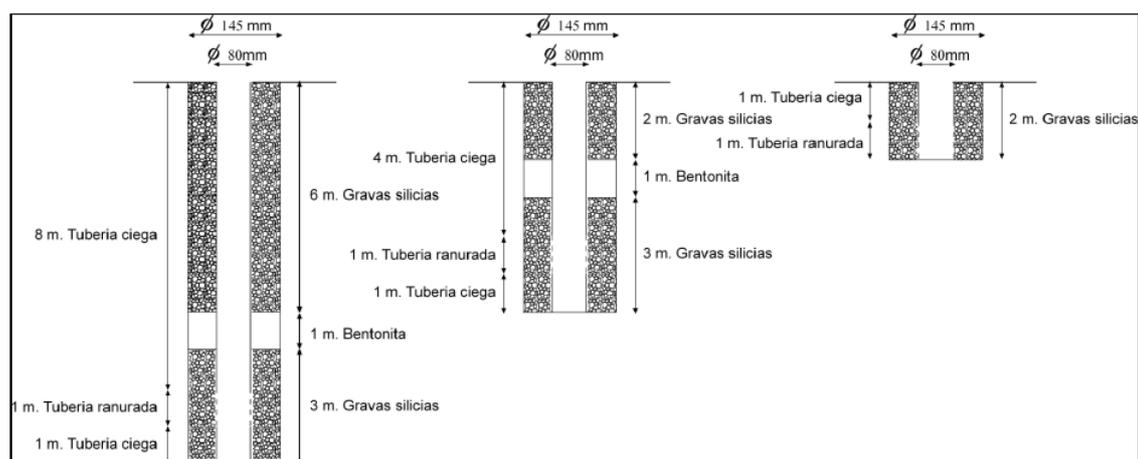


Figura 30. Esquema de nido de piezómetro en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes.

Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

Tras la instalación y limpieza de los piezómetros, y antes de iniciar el riego y la recarga con aguas tratadas, se tomaron muestras de agua con el fin de obtener valores composicionales de base o referencia. Los parámetros analizados fueron: conductividad, pH, TSS, TOC, TC, IC, DBO₅, DQO, turbidez, dureza, alcalinidad, F, Cl, NO_x, Br, NO₃, HPO₄²⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Li, Na, NH₄⁺, K, Mg²⁺, Ca²⁺, coliformes totales, huevos de helminto y compuestos emergentes. Los análisis convencionales se realizaron en los laboratorios de la Fundación iMdea agua y los análisis de compuestos prioritarios y emergentes en los laboratorios del grupo de la Universidad de Almería.

De los datos aportados por la testificación de los sondeos, la tomografía eléctrica y las observaciones locales, se identifican tres unidades litológicas diferentes (Fig. 31). La unidad superficial está compuesta de arenas finas a muy finas, de color marrón rojizo, con bajo contenido en agua (mayor resistividad) y contenidos en arcilla en torno al 30%. Tiene un espesor variable de 0-2 m, y sobre ella se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica. Mineralógicamente, esta unidad está formada por calcita, cuarzo, halita, albita, anortita, illita y caolinita. La unidad principal está formada por limos arcillosos de color ocrea verde con abundantes nódulos y algunos niveles precipitación de carbonatos, con aspecto radicular, lo que sugiere origen paleoedáfico. Sobre esta unidad se ha desarrollado un suelo agrícola con abundante materia orgánica y algunos pequeños nódulos carbonatados. Su espesor es superior a 10 m, ya que su base no se ha cortado en ningún sondeo y presenta una mineralogía formada por calcita, cuarzo, anortita, albita, illita, montmorillonita y caolinita, apareciendo también halita en los tramos verdosos del perfil de los sondeos. Por último una unidad subyacente, descrita regionalmente como unidad de las margas azules, formada por arcillas calcáreas de color gris azulado, prácticamente impermeables y que actúan como límite inferior de los acuíferos.

2. ANTECEDENTES

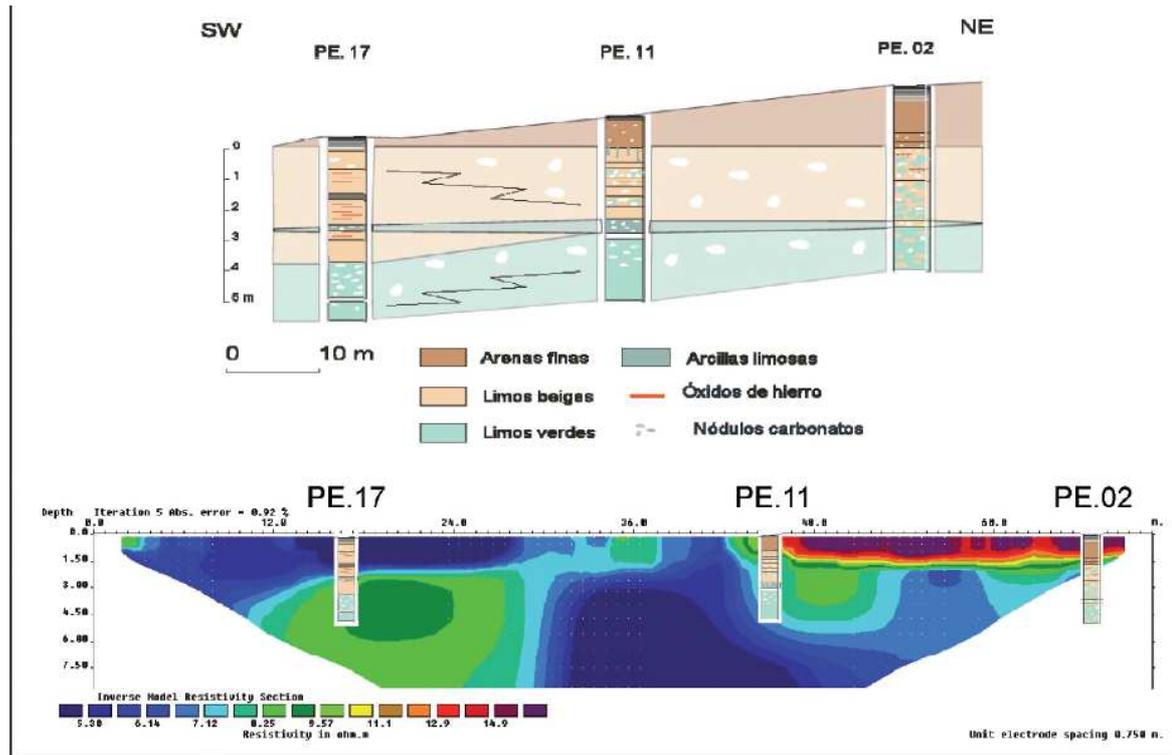


Figura 31. Unidades litológicas y perfil de resistividad obtenidos en la parcela experimental de Carrión de los Céspedes Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

En la figura 32 se han representado en el diagrama de Piper los resultados de las muestras de agua de los piezómetros analizada. Las aguas están muy mineralizadas, con altos contenidos en cloruros y sodio, presentando los valores más bajos los piezómetros PE-16 y PE-21, con profundidades de 10 m y 2 m respectivamente. Así todas las aguas pueden clasificarse como cloruradas sódicas, excepto la PE-16 que es clorurada sódico-magnésica, la PE-20 clorurada sódico-cálcica y la PE-21 clorurada cálcico-sódica. Esta composición tiene su origen en los materiales que componen la zona, que presentan contenidos de halita en varios tramos. En cuanto a los parámetros indicadores de algún tipo de contaminación, como carbono orgánico, nitratos y amonio, están dentro de los rangos normales, sin presentar signos de contaminación. Respecto a compuestos prioritarios y emergentes, en el PE-1, PE-10 y PE-19, se ha detectado nicotina (entre 0,059 y 0,206 $\mu\text{g/L}$), paraxantina (metabolito de la cafeína, entre 0,112 y 0,125 $\mu\text{g/L}$), cafeína (entre 0,068 y 0,403 $\mu\text{g/L}$) y cotinina (metabolito de la nicotina, entre 0,014 y 0,052 $\mu\text{g/L}$). Aunque la presencia de estos compuestos de difícil degradación es típica de aguas residuales, dado que la parcela no ha estado sometida a riego con este tipo de aguas, su presencia debe estar asociada a flujos regionales.

2. ANTECEDENTES

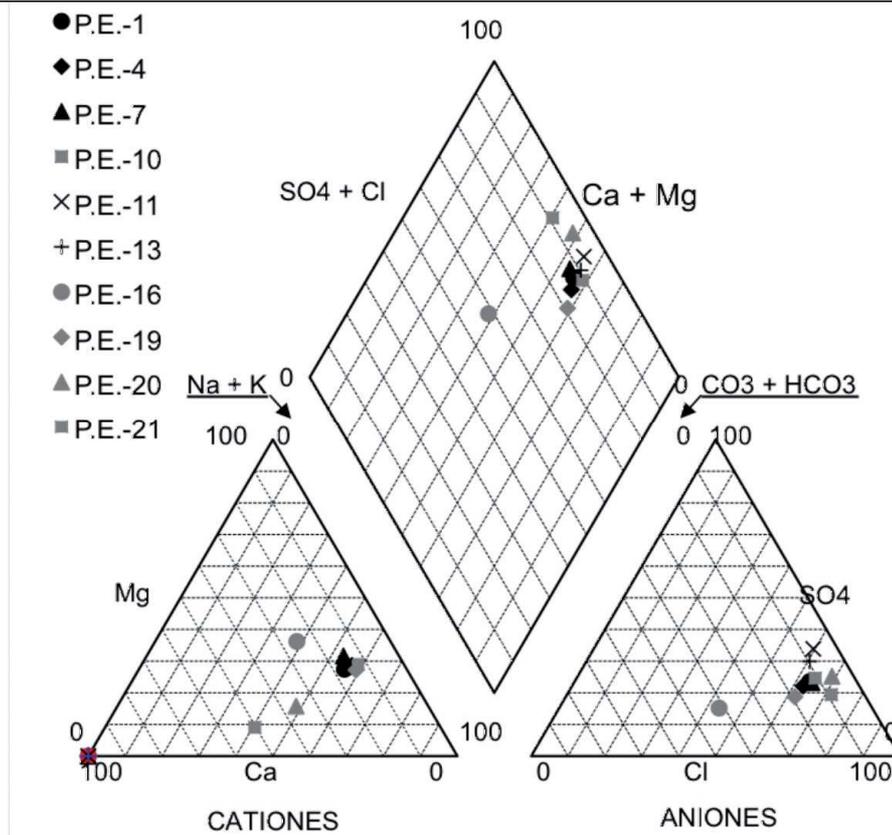


Figura 32. Diagrama de Piper de las muestras de agua analizadas en la parcela experimental. Fuente: Irene Bustamante et al. (2011)

2. ANTECEDENTES

2.3. ELECTRODIÁLISIS

Los primeros usos de la electrodiálisis se remontan a principios del siglo XIX cuando Schwein utilizó esta técnica para purificar extractos azucareros; no obstante, su invención se atribuye a Morse y Pierce quienes, en el año 1903 introdujeron un par de electrodos en los compartimentos de una celda de diálisis para acelerar el proceso de separación de electrolitos de una solución de gelatina.

No fue hasta 1940, cuando Meyer y Strauss propusieron la utilización de membranas selectivas eléctricamente cargadas para separar aniones y cationes. Las membranas se sitúan alternativamente entre un par de electrodos, separadas entre si 1 mm o menos. Con el desarrollo, a finales de los años cuarenta, de membranas más selectivas y con una baja resistencia eléctrica, este tipo de dializador se convirtió en una opción válida para realizar operaciones de dilución y concentración de disoluciones de electrolitos.

Una ventaja de esta disposición es que sólo utiliza dos electrodos para un número muy elevado de membranas y, por lo tanto, las reacciones irreversibles que se producen en los electrodos se distribuyen en muchos compartimentos de concentrados y diluidos, con lo que se minimizan sus efectos. Además los problemas que pueden ocasionar el manejo de los productos formados en los electrodos son asimismo minimizados.

La ED hoy en día es utilizada ampliamente para la desalación del agua salobre y, en algunas zonas del mundo, es el proceso principal para la producción de agua potable.

Aunque de mayor importancia la desalación del agua y producción de sal de mesa no son las únicas aplicaciones significativas. El desarrollo del nuevo intercambio iónico de membrana con mejores selectividades, menor resistencia eléctrica y con propiedades térmicas, químicas y mecánicas mejoradas ha generado recientemente un gran interés en las aplicaciones de la ED, especialmente en las industrias de la alimentación, medicamentos y procesos químicos, así como en biotecnología y en el tratamiento de aguas residuales.

La ED en el sentido clásico puede utilizarse para llevar a cabo varios tipos de separación general, tales como la separación y concentración de sales, ácidos y bases de soluciones acuosas, la separación de iones monovalentes de iones polivalentes y múltiples componentes cargados y la separación de componentes iónicos de moléculas no cargadas. La ED ligeramente modificada se usa todavía para separar mezclas de aminoácidos o incluso proteínas. La electrodiálisis también se usa para producir ácidos y bases de las sales correspondientes, cuando se combina con la disociación de agua eléctricamente forzada en las membranas bipolares.

2. ANTECEDENTES

En muchas aplicaciones, la ED está en competencia directa con otros procesos de separación como destilación, intercambio iónico, ósmosis inversa y varios procedimientos cromatográficos. Para ciertas aplicaciones hay muy pocas alternativas económicas a la ED. Aunque este proceso es conocido en principio desde hace más de ochenta años, la utilización a escala industrial comenzó hace veinticinco años. La ED clásica o estándar unidireccional se desarrolló durante los años cincuenta. Sin embargo, durante las dos décadas y media pasadas la característica principal ha sido el desarrollo del proceso de polaridad inversa que se conoce como electrodiálisis inversa (EDI). Esta técnica ha desplazado virtualmente a la ED unidireccional de la mayoría de las aplicaciones de agua salobre y ha ganado un significativo cupo en este mercado. El último énfasis en el desarrollo de la ED es la aplicación de ED bipolar para recuperación de recursos y control de la contaminación.

2.3.1. Principio de funcionamiento

La molécula de agua es polar, debido a la diferencia de electronegatividad entre el átomo de oxígeno y los átomos de hidrógeno y también debido a su geometría, ya que los pares de electrones no compartidos del oxígeno se orientan de tal manera que la repulsión sea mínima; adquiriendo el átomo de oxígeno una cierta carga negativa y los dos átomos de hidrógeno una cierta carga positiva, como se puede apreciar en la figura 33.



Figura 33

Debido a esta característica el agua es buen disolvente de compuestos iónicos y compuestos polares. Por ejemplo al disolver NaCl en agua, esta sal se disocia en sus iones, es decir: $\text{NaCl(s)} \rightarrow \text{Na}^{1+}(\text{ac}) + \text{Cl}^{1-}(\text{ac})$. Las moléculas de agua rodearán al catión por el polo negativo y el anión por el polo positivo, hasta que se anulen las fuerzas electrostáticas atractivas, proceso que se conoce como solvatación, (figura 34). Así ocurre con otras sales en mayor o en menor medida dependiendo de su solubilidad, la temperatura y la carga del ion.

2. ANTECEDENTES

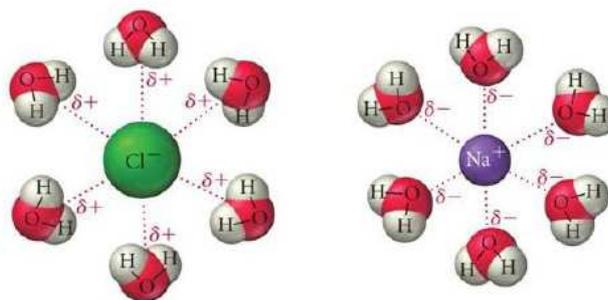


Figura 34

Los iones que más comúnmente se encuentran en las aguas naturales son:

➤ Cationes:

- Sodio (Na^+)
- Calcio (Ca^{+2})
- Magnesio (Mg^{+2})
- Potasio (K^+)

➤ Aniones:

- Cloruro (Cl^-)
- Bicarbonato (HCO_3^-)
- Sulfato (SO_4^{-2})
- Nitrato (NO_3^-)

Estos iones se encuentran normalmente en cantidades muy pequeñas, por lo que su concentración suele expresarse en partes por millón (ppm), en lugar de tanto por ciento (1 ppm = 0,0001%). La cantidad total de iones disueltos se refiere como Sólidos Totales Disueltos (STD ó TDS), y corresponde a la suma de las concentraciones de los diferentes iones en presencia.

Acción de la corriente continua sobre un agua salina

Al someter un agua salina bruta a la acción de un campo eléctrico, generado por dos electrodos, entre los que se aplica una *diferencia de potencial de tipo continuo*; se producen movimientos de los iones, los negativos son atraídos por el ánodo y los positivos por el cátodo, como se muestra en el ejemplo de la figura 35.

2. ANTECEDENTES

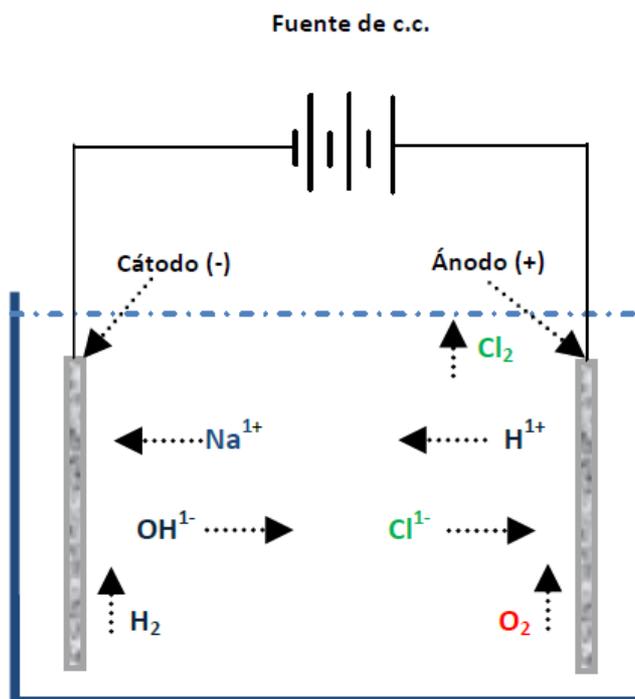
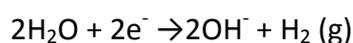


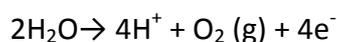
Figura 35

Supongamos un recipiente, figura 35, con un electrodo en cada extremo y una disolución acuosa de cloruro sódico (NaCl). Al aplicar una diferencia de potencial de corriente continua entre los electrodos, tienen lugar los siguientes procesos de oxidación-reducción:

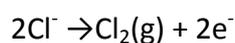
1. Los cationes Na^+ son atraídos por el cátodo.
2. Los aniones Cl^- son atraídos por el ánodo.
3. En el cátodo ocurre la siguiente reacción de reducción:



4. En el ánodo tiene lugar la siguiente reacción de oxidación:



5. En la ánodo puede ocurrir también la reacción de oxidación siguiente:



2.3.2. Comparativa con otros procesos

Según Jorge Lechuga et al., (2007) los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas que se realizaron a través de la Inteligencia Competitiva y Tecnológica, se ordenaron en las matrices FODA y MET, y se concentraron en una tabla de indicadores de los procesos analizados.

2. ANTECEDENTES

Las cifras fueron obtenidas de las investigaciones correspondientes y expresadas en las matrices FODA y MET. El criterio utilizado para la columna de tendencias mundiales, se obtuvo de un informe del Boletín de la MEDRC de Marzo, 2002; e información recabada de Dow Chemical Company, 2006, en donde se informa del incremento en las compras de membranas para ósmosis inversa en los últimos 6 años; así como la sustitución de las plantas para desalinización de agua de mar en el Medio Oriente, que utilizaban MED o MSF, y ahora están cambiando por las de ósmosis inversa. En América y Europa, las tendencias son hacia la desalinización por ósmosis inversa. (Dow Chemical Company, 2006)

Matriz FODA

A continuación se presenta la Matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), con el contenido de los datos recabados en la investigación en la tabla 5:

Procesos	Fuerzas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Ósmosis Inversa	<p>El procedimiento es simple en términos generales.</p> <p>Los costos de instalación son bajos.</p> <p>Las plantas de producción emplean Ósmosis Inversa generalmente tienen una alta tasa de producción.</p> <p>El uso de energía para procesar agua salobre es del rango de 2 a 2.8 Kwh/m³ de agua producida.</p> <p>Este proceso puede hacer uso de prácticamente cualquier tipo de agua sin importar su origen. Permite remover con cierta sencillez contaminantes orgánicos e inorgánicos.</p> <p>El impacto ambiental de este proceso es prácticamente</p>	<p>Buscar alternativas para mejorar los materiales de las membranas que eficienten su limpieza pues el proceso es muy dependiente de ellas.</p> <p>Generar dispositivos con procedimientos de auto limpieza de membranas para preservarlas mayor tiempo.</p>	<p>El único factor complicado es encontrar o producir un suministro limpio que minimice la limpieza frecuente de la membrana.</p> <p>El agua empleada usualmente necesita ser pre tratada para remover inicialmente las partículas contaminantes y prolongar la vida de la membrana</p> <p>Las plantas que requieran procesar el agua con este método deben garantizar la calidad de sus servicios, maquinaria y materiales mediante procesos de certificación.</p> <p>El deshecho de la salmuera debe ser tratado con mucho cuidado para no impactar nocivamente el ambiente.</p> <p>-Se corre un alto riesgo de contaminación bacterial en las membranas mismas que pueden introducir olores y sabores desagradables en el</p>	<p>-El proceso de lechos compactados, es investigado actualmente, para la desalinización de agua.</p>

2. ANTECEDENTES

	mínimo.		producto final. Se requiere de una fuente confiable de energía, es decir de un suministro permanente para generar el producto, pues no puede ser interrumpido	
Electrodialisis	Utiliza corriente eléctrica para forzar las sales disueltas por membranas. - Maneja a base de membranas para separar las sales.	Puede utilizar diferentes fuentes de energía eléctrica (combustibles fósiles o renovables como solar o eólica).	Es el método más aplicable a agua salobre. Consume mucha energía.	
Destilación multietapas (MED)	Es aplicable a proyectos de mediana o grande escala. - Maneja cámaras de baja presión para ayudar en la vaporización. - El calor que se utiliza en una etapa es utilizado para la vaporización de agua de la siguiente. - El acomodo de los destiladores ocupa menos superficie.	Utilizar energías alternas.	El mantenimiento costoso de maquinaria. Genera muchos residuos con alto contenido mineral, los cuales requieren un manejo especial. Consume gran cantidad de energía	El crecimiento de los procesos por ósmosis inversa.
Evaporación de múltiples etapas (MSF)	Es aplicable a proyectos de mediana o grande escala. Utiliza calor. Maneja cámaras de baja presión para ayudar en la vaporización. A mayor etapas en el proceso, mayor	Utilizar energías alternas.	El mantenimiento costoso de maquinaria. Genera muchos residuos con alto contenido mineral, los cuales requieren un manejo especial. A mayores etapas del proceso, son necesarios más	El crecimiento de los procesos por ósmosis inversa.

2. ANTECEDENTES

Solar stills destillation	<p>eficiencia en sus resultados</p> <p>Se vale de la energía solar para calentar el agua salada.</p> <p>Captura el vapor del agua condensado como agua pura.</p>	<p>Tiene gran potencial para proyectos pequeños en lugares con condiciones favorecedoras.</p>	<p>espacios, capital y mantenimiento.</p> <p>Es aplicable principalmente a proyectos de menor escala debido a su simplicidad e independencia.</p> <p>Tiene altos costos de operación.</p>	<p>Los factores climáticos pueden influir en el desempeño del proceso.</p>
------------------------------	--	---	---	--

Tabla 5. Matriz FODA. Fuente: Jorge Lechuga et al., (2007)

Matriz MET

También se presenta un análisis MET, (Material, Energía y Toxicidad) en la que se pueden apreciar los distintos procesos y sus características principales.

Procesos	Materiales	Energía	Toxicidad
Ósmosis Inversa	Membranas Bombas	Consume de 2 a 2.8 kwh/m ³ con un costo de 0.60 USD/m ³ agua tratada.	Metales pesados (Cu, Fe, Ni, Cr, Zn), son metales corrosivos que pueden acumularse en el sistema y causar estrés a nivel molecular y celular. Sulfuro de Sodio, utilizado como anticorrosivo, y además se reemplaza para capturar O ₂ , aún no se conocen efectos tóxicos para este material.
Electrodiálisis	Membranas Selectivas. Pila análoga Intercambiador de calor de placa	Ion El costo para la producción de un galón de agua destilada mediante este proceso, es de 58 USD/m ³ con un consumo de energía de 16 a 19 kwh/m ³ .	Formaldehído, en concentraciones de 0.1 ppm o más, puede producir trastornos agudos, tales como ojos llorosos, náuseas, accesos de tos, opresión en el pecho.
Destilación de Múltiple Efecto (MED)	Platos perforados Columna de destilación Capuchones para burbujas Boiler Condensador.	Consumo de energía de 3.4 a 4 kwh/m ³ y un costo de 1.5 USD/m ³ .	Metales pesados (Cu, Fe, Ni, Cr, Zn), son metales corrosivos que pueden acumularse en el sistema y causar estrés a nivel molecular y celular. Fosfatos, sirven como anti-crustantes, son macronutrientes que llegan a causar eutrofización. Sulfuro de Sodio, utilizado como anticorrosivo, y además reemplaza para capturar O ₂ , aún no se conocen efectos tóxicos para este

2. ANTECEDENTES

Evaporación de múltiples etapas (MSF)	Separador flash Tubería de entrada Válvulas de control de flujo Condensador	Consumo de energía de 5 a 8 kWh/m ³ y un costo de 1.10 USD/m ³ de agua tratada.	material. Residuos sólidos que provienen de la limpieza. Los mismos problemas de toxicidad del proceso MED. Residuos sólidos que provienen de la limpieza
Solar stills	Recipiente con agua por tratar Membrana Colector de destilado Vidrio Costo de 28 USD/m ³		Salmuera: puede ser corrosiva, dependiendo del material del recipiente.

Tabla 6. Matriz MET. Fuente: Jorge Lechuga et al., (2007)

Tabla de indicadores relevantes

INDICADORES	Consumo de Energía Fósil	Costos Unitarios	Tendencias Mundiales	Fuentes de Energía
Procesos				
Ósmosis Inversa	De 2 a 2.8 kWh/m ³	0.60 USD/m ³	Crecimiento	Eléctrica
Electrodialisis	De 16 a 19 kWh/m ³	58 USD/m ³	Estático	Eléctrica
Destilación Multi-efecto MED	De 3.4 a 4 kWh/m ³	1.5 USD/m ³	Decreciente	Eléctrica Calorífica
Evaporación Multi- etapas Flash MSF	De 5 a 8 kWh/m ³	1.10 USD/m ³	Decreciente	Eléctrica Calorífica
Destilación * por energía Solar		28 USD/m ³	Estático – Creciente	Energía solar

* Se opera a bajas escalas de Producción y en climas favorecedores.

Tabla 7. Indicadores relevantes. Fuente: Jorge Lechuga et al., (2007)

De los procesos analizados en este trabajo, observamos que el de ósmosis inversa presenta ventajas significativas, en cuanto a consumo de energía fósil, costos unitarios e impacto ambiental; esto último debido a que el proceso no requiere de cambios de estado, como los de MED y MSF, que utilizan mayor consumo energético e incrementan la emisión de CO₂, provocando el efecto invernadero.

La electrodiálisis, es más utilizada para tratamiento de aguas salobres y consume elevadas cantidades de energía, ya que se basa en intercambio iónico. La destilación por energía solar, es recomendable en climas favorecedores, pero tiene el inconveniente de operar a bajas escalas de producción. La ósmosis inversa, puede operarse a cualquier capacidad de producción, ya que ésta depende del número de membranas utilizadas, tal y como se utiliza en Lanzarote, Canarias en la planta H-O-H Canarias, ordenadas en bastidores.

2. ANTECEDENTES

En el proceso de ósmosis inversa, el agua de rechazo de las membranas, puede utilizarse para recuperar energía, accionando dispositivos adecuados tales como, turbinas, ruedas de Pelton e intercambiador de presión, el cual es el que más se está utilizando en las plantas desaladoras en España.

El proceso dual ósmosis inversa – recuperación del agua de rechazo, permite la flexibilidad para operar a diferentes capacidades de producción, manteniendo la calidad del agua tratada y con las ventajas ya mencionadas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ELECTRODIÁLISIS

3.1.1. Principios de operación

La electrodiálisis es un proceso de separación electroquímico, en el que los iones pasan a través de una membrana de intercambio iónico por la acción de una corriente continua. Para controlar el movimiento de los iones en el recipiente que contiene la disolución y los electrodos, se colocan varias membranas que forman compartimentos estancos, como se muestra en el ejemplo de la figura 37.

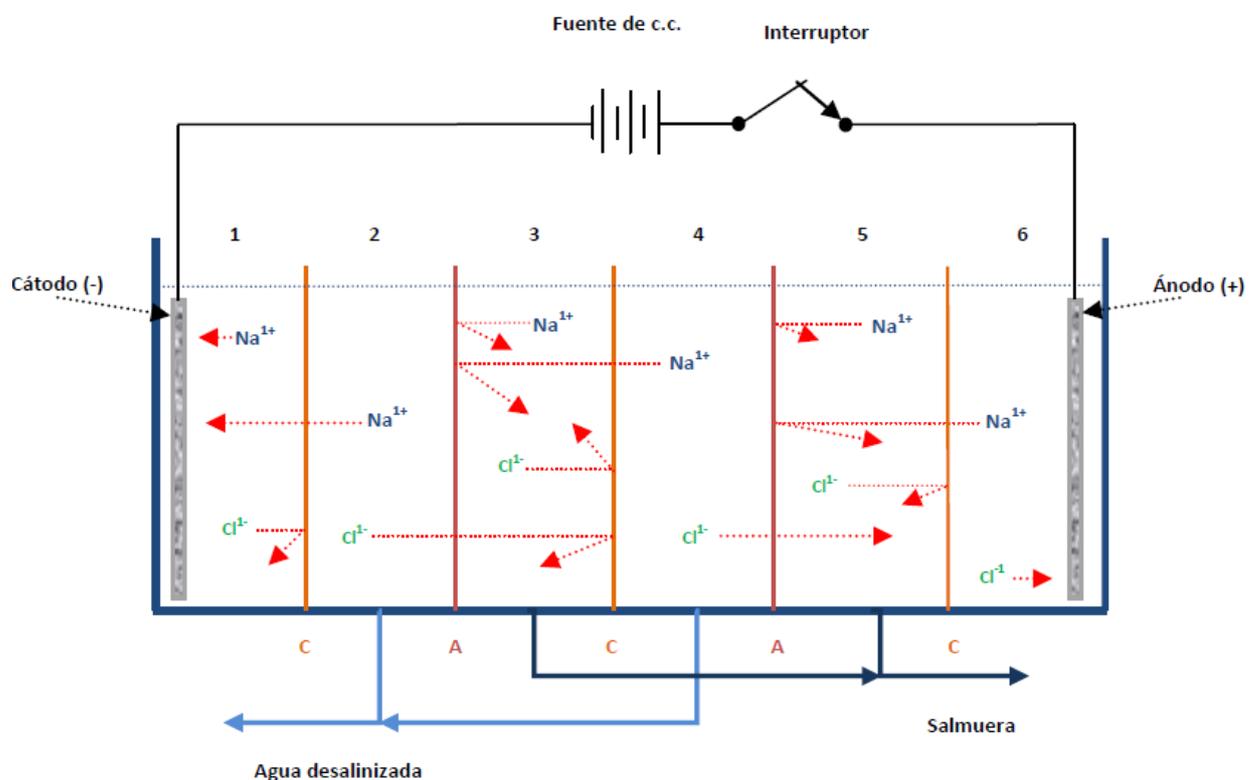


Figura 36. Movimiento de los iones a través de las membranas iónicas

3.1.2. Proceso estándar de electrodiálisis

Cuando se establece un campo eléctrico, los iones migran hacia el ánodo o el cátodo, según el signo de su carga. Debido a la disposición de las membranas, aparecen compartimentos donde la disolución del electrolito se empobrece en éste y otros, donde el electrolito se concentra. Los cationes que están en un compartimento de diluidos migran por efecto del campo eléctrico hacia el cátodo, encontrándose en primer lugar una membrana catiónica, que permite el transporte, pasando al compartimento adyacente donde, en su camino, se encuentran con una membrana aniónica que no pueden atravesar, quedando retenidos en este compartimento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los aniones migran hacia el ánodo, encontrándose una membrana aniónica que pueden atravesar para entrar en un compartimiento de concentrados, donde en su trayectoria se encuentran con una membrana catiónica que no permite su transporte, quedando retenidos en este compartimiento.

Esta permselectividad encontrada en las membranas de intercambio iónico es la base de los procesos de ED/EDR.

Para que ocurra un funcionamiento como el descrito anteriormente el modulo de electrodiálisis debe estar formado por dos electrodos metálicos que establecen el campo eléctrico, cátodo y ánodo, entre los cuales están colocadas las membranas.

En la figura 36 se representan dos tipos de membranas, una de transferencia aniónica (A) que permite el paso de los iones negativos. Otra de transferencia catiónica (C), que permite el paso de los iones positivos. Los dos tipos de membranas son eléctricamente conductoras e impermeables al agua bajo presión (aproximadamente 3 a 5 atmósferas. Como se observa en la figura 36 los compartimentos 2 y 4 han sido vaciados de iones (agua desalinizada), que han pasado a los compartimentos 3 y 5 (agua concentrada en iones).

Por otro lado, también se pueden clasificar en función de su estructura física en:

- Heterogéneas: formadas por dos fases poliméricas. Transferencia por los espacios vacíos (membrana porosa).
- Homogéneas: formadas por una sola fase polimérica. Estructuras sin poros donde el paso de las sustancias a través de la membrana sigue un modelo de solución-difusión, en el que los componentes de la solución se disuelven en la membrana y posteriormente se difunden a través de. Son los más utilizados.

Como se observa en la figura 37, hay compartimentos alternados de disoluciones concentradas y desmineralizadas en ésta célula de membranas, cuando se ha aplicado una diferencia de potencial de corriente continua. Esta unidad da como resultado dos flujos principales y separados; aguas desmineralizada y concentrada, y dos flujos menores de los compartimentos de los electrodos. En las instalaciones normales, se unen varios cientos de estos compartimentos en una *pila de membranas* para obtener el caudal de agua deseado.

Si el recipiente multicompartimental se gira por un extremo, tendremos la orientación normal de una pila de membranas, figura 37.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

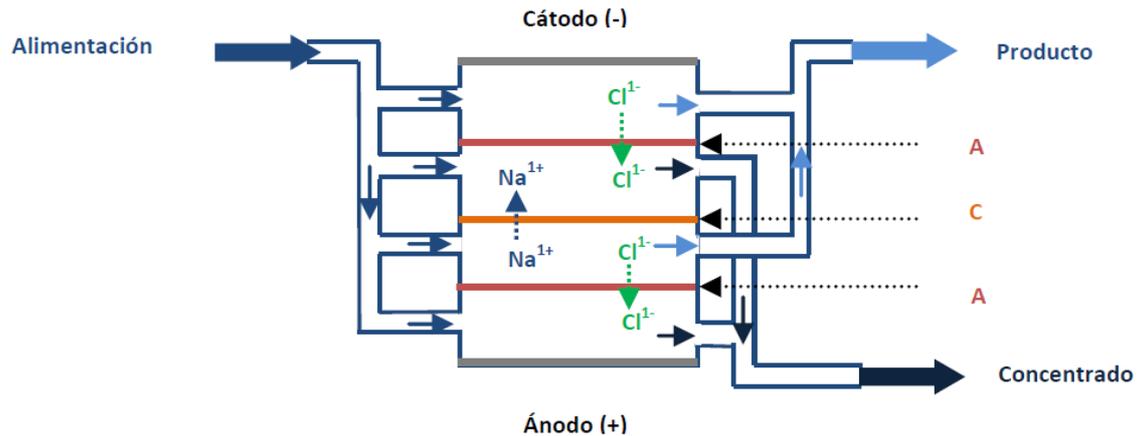


Figura 37. Orientación normal de una pila de EDR

Los espacios entre membranas representan los caminos de los flujos concentrados y desmineralizados, formados por separadores de plástico (polietileno de baja densidad), llamados espaciadores de flujo concentrado y desmineralizado respectivamente. Estos espaciadores están dispuestos en pilas de tal modo que todos los flujos desmineralizados están conectados entre sí y todos los flujos de concentrado también están interconectados. Una sección que se repite, llamada *par de célula*, está compuesta por:

- Una membrana de transferencia catiónica.
- Un espaciador de flujo de agua desmineralizada.
- Una membrana de transferencia aniónica.
- Un espaciador de flujo de agua concentrada.

Una pila típica puede tener entre 300 y 500 pares de células. La mayoría de las pilas se pueden incluir dentro de uno de los dos tipos básicos siguientes: Pilas de Caminos Tortuosos o Pilas de Láminas de Fluido. Esta designación se debe al tipo de espaciador por el que fluye la disolución en los compartimentos de la pila.

- Módulos de flujo tortuoso, donde la disolución se ve obligada a recorrer un camino largo y serpenteante entre la entrada y salida.
- Módulos de flujo laminar, donde la solución fluye directamente entre la entrada y salida. Presenta un consumo energético menor y es, por tanto, el más utilizado.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

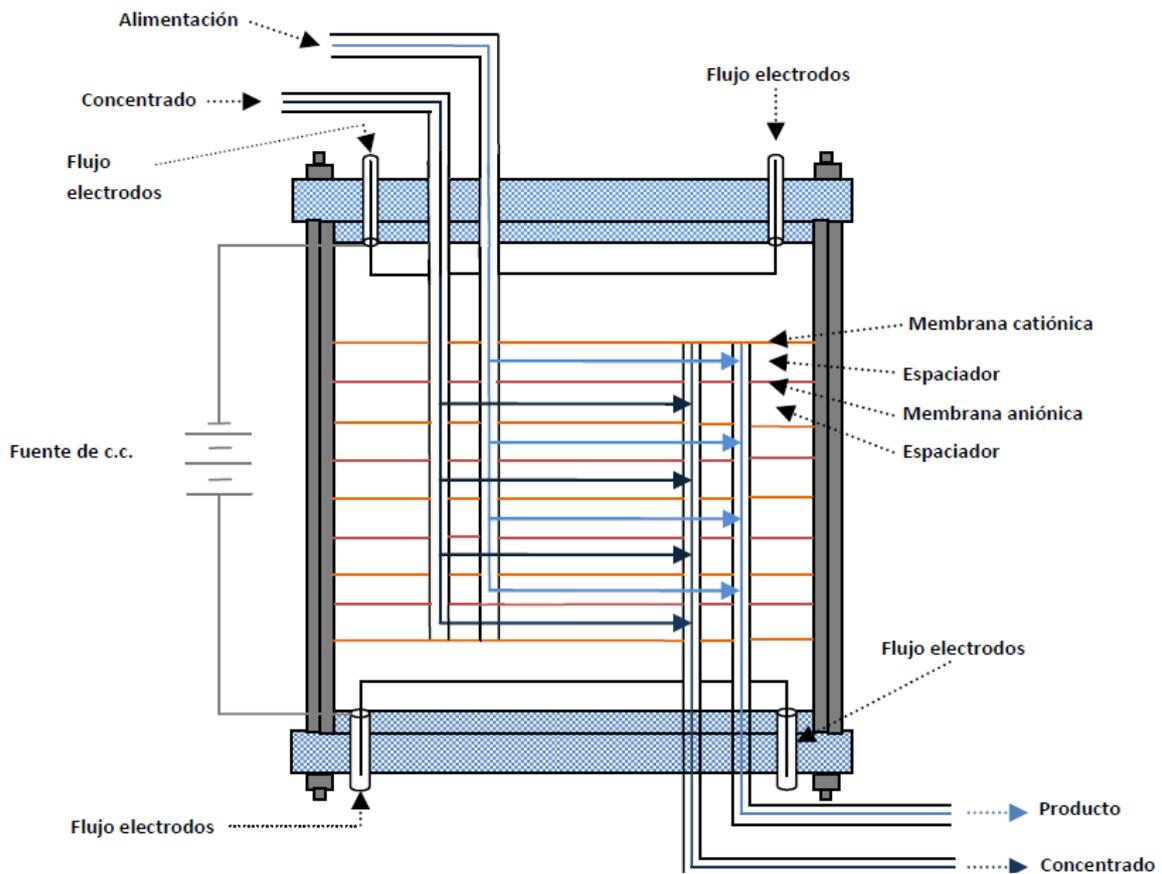


Figura 38. Pila de ED

La corriente de agua entra en la pila, figura 38, fluye en paralelo, sólo por los compartimentos de desmineralización, mientras que la otra corriente entra en la pila de membranas y fluye sólo en paralelo a través de los compartimentos de concentrado.

Debe advertirse que los flujos de agua circulan entre las membranas y no por ellas. Cuando los flujos de agua pasan entre las membranas, los iones son transferidos a través de las membranas, desde la corriente desmineralizada a la concentrada por la acción del campo eléctrico de tipo continuo.

El agua de los compartimentos de los electrodos, no se mezcla con los flujos de desmineralizado ni concentrado. Después de salir de la pila, el flujo combinado de los electrodos se envía a un desgasificador, para sacar al exterior los gases de las reacciones de oxidación-reducción producidas.

En la figura 38 se muestra las placas superior e inferior que son de acero, y que se usan como tirantes para comprimir la pila entera, sellando de este modo las membranas y los espaciadores para proveer caminos para el concentrado y desmineralizado, evitando fugas de agua.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Espaciadores o separadores

Las membranas son esencialmente resinas intercambiadoras de iones fabricadas en forma de lámina, que tienen orificios colectores. Los espaciadores están formados por dos hojas de polietileno de baja densidad, con orificios que forman colectores que se alinean con los colectores de las membranas, formando tubos verticales en la pila. El agua entra en un espaciador entre dos membranas por los caminos del flujo, que están conectados con los orificios colectores de salida. Existen dos cortes en los orificios del espaciador que canalizan selectivamente el flujo de agua entre las membranas, para formar dos corrientes separadas de concentrado y desmineralizado.

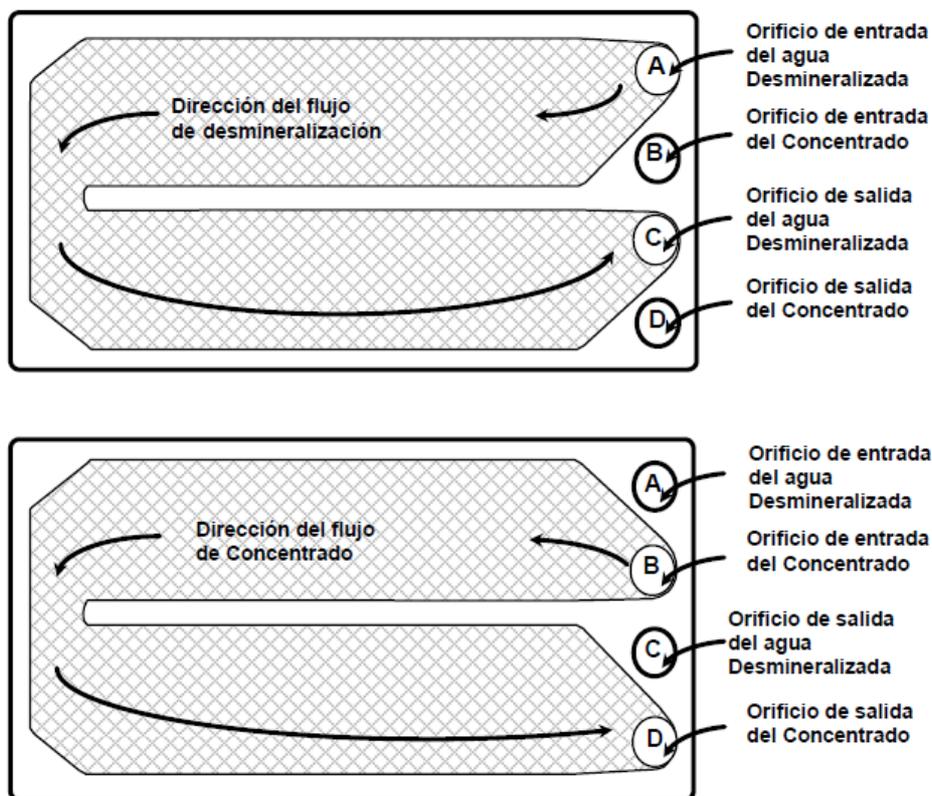


Figura 39. Espaciadores de flujo mineralizado y concentrado.

Fuente: Patricia Martínez Martínez (2012)

Las funciones de un espaciador son varias:

- Separar las membranas evitando que se toquen y cortocircuiten.
- Originar un camino para que el agua pueda circular.
- Generar la separación entre agua de alimentación y salmuera.
- Provocar la mayor turbulencia posible.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

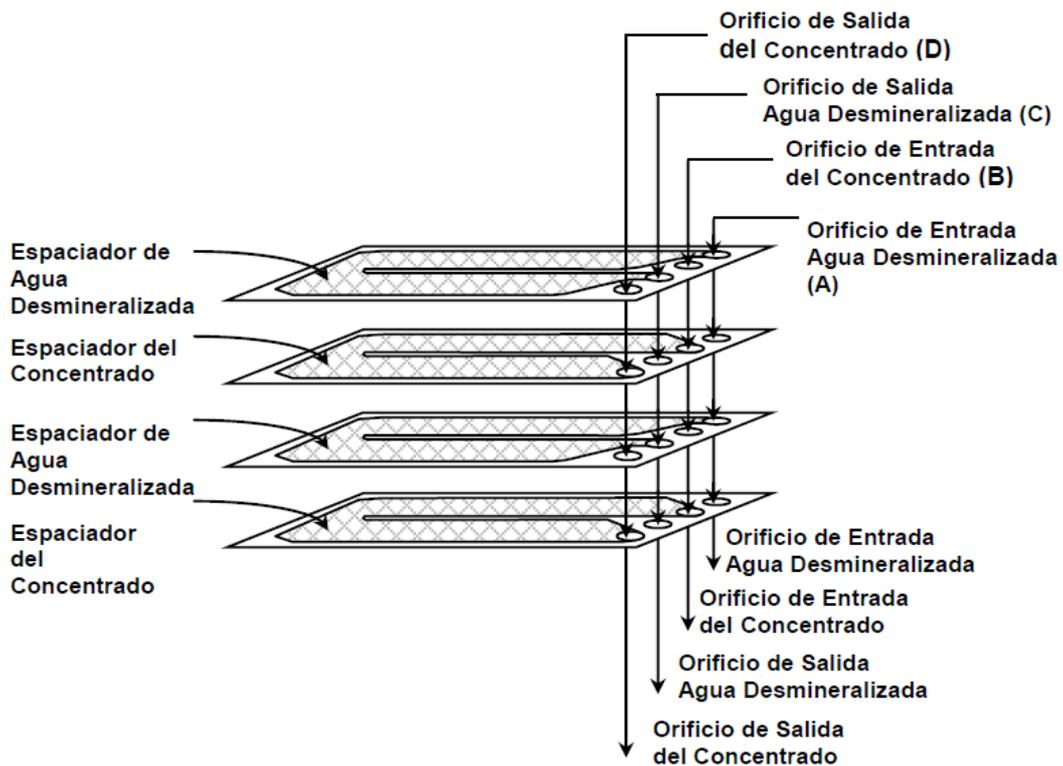


Figura 40. Disposición de los espaciadores. Fuente: Patricia Martínez Martínez (2012)

En la figura 41 se muestra un corte seccional de un espaciador de camino tortuoso. Este diagrama muestra un espaciador entre cada dos membranas para formar un compartimento de flujo.

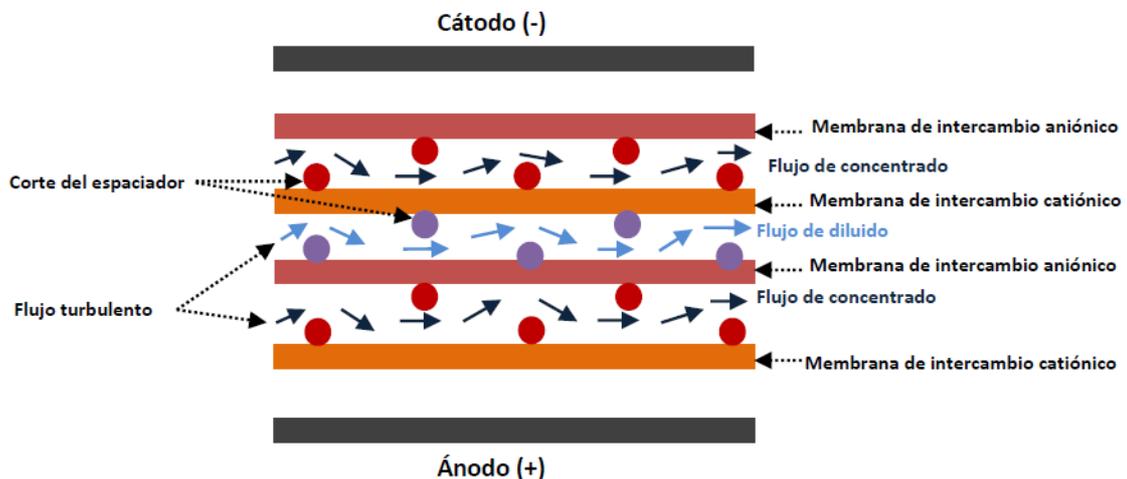


Figura 41. Corte seccional de un espaciador de camino tortuoso

La turbulencia creada en el flujo promueve la mezcla, ayudando a la transferencia de iones a la superficie de la membrana y reduciendo las incrustaciones en la superficie de las membranas.

El proceso estándar de ED a menudo necesita la adición de ácido y/o secuestrante a la corriente de concentrado, con el fin de inhibir la precipitación de sales solubles (como

3. MATERIALES Y MÉTODOS

CaCO_3 y CaSO_4) en el acumulador. Para mantener el rendimiento, el acumulador o batería de membrana debe limpiarse periódicamente para eliminar incrustaciones y otras materias ensuciadoras de las superficies. Esto se hace de dos maneras (Manual de desalación USAID, 1980) por limpieza in situ (LIS) y por desmontaje de la batería.

Las soluciones especiales de limpieza (ácidos o bases diluidas) se hacen circular a través de la batería, pero ésta necesita desmontarse y limpiarse mecánicamente a intervalos regulares para eliminar la incrustación y otros materiales ensuciantes superficiales. El desmontaje regular es una operación que consume tiempo y representa una desventaja del proceso de ED.

Aplicable para la recuperación y reutilización de concentrados aniónicos y/o catiónicos, siempre que tenga la finalidad de regeneración y reutilización del agua en los siguientes sectores industriales:

- Industria alimentaria.
- Industria gráfica.
- Industria química.
- Industria no-metálica.
- Industria de metales básicos.
- Tratamiento superficial.
- Industria textil.

3.1.3. Proceso de Electrodialisis Bipolar

El proceso de ED bipolar utiliza membranas de intercambio iónico para separar y concentrar los constituyentes ácido y base de una corriente de sal. El elemento clave en este proceso electrodialítico es la membrana bipolar, así llamada porque está compuesta de dos capas diferentes que son selectivas a los iones de cargas opuestas. Bajo el influjo de la corriente eléctrica aplicada, el agua se difunde en la interface de membrana donde se divide en iones H^+ y OH^- , que después son transportados a través de las capas selectivas aniónicas y catiónicas, respectivamente, a cámaras al otro lado de la membrana bipolar. El resultado final es la acidificación o basificación de estas cámaras.

Para conseguir la producción neta de ácido y base, las membranas monopolares (por ejemplo, intercambio catiónico y aniónico) se usan junto con las bipolares. Un esquema de unidad de celda generalizada de tres compartimentos se ve en la figura 42. La sal (por ejemplo, sulfato sódico) alimenta a la cámara que está entre las membranas aniónicas y catiónicas. Los cationes (Na^+) y aniones (SO_4^{2-}) se mueven sobre la membrana monopolar y se combinan con los iones hidrógeno e hidróxido,

3. MATERIALES Y MÉTODOS

como se muestra, para formar ácido y base. En una operación comercial, hasta 200 de estas unidades se montan entre un solo lote de electrodos para formar una batería compacta de separación de agua. La alimentación a las cámaras de ácido, base y sal se alcanza por medio de manguitos interiores construidos en a batería. Si sólo se necesita obtener uno de estos componentes (NaOH) en forma pura, la celda puede simplificarse en una unidad de dos compartimentos. Sólo se utilizan aquí las membranas bipolares y catiónicas. El producto ácido de esta celda, cuando se usa alimentación de sulfato de sodio sería una mezcla de ácido sulfúrico y sal no convertida.

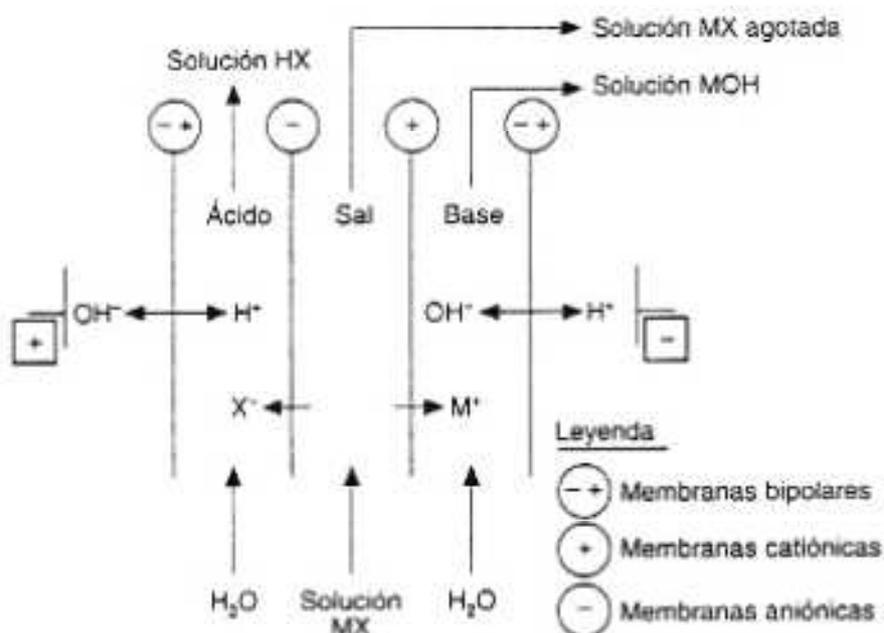


Figura 42. Celda bipolar de triple compartimento de ED para conversión de sal en ácido y base.
Fuente: CIDTA (2011)

3.1.3.1. Aplicaciones de la ED Bipolar.

Las sales que se dan en los efluentes, como cloruro sódico, sulfato sódico, nitrato sódico, fluoruro potásico, acetato sódico, etc., pueden convenirse en sus respectivos ácidos y bases con ED bipolar. Las aplicaciones de a ED bipolar incluyen:

1. Regeneración de licores usados en la manufactura de acero inoxidable (recuperación de HF, HNO₃, KOH).
2. Desulfuración de humos y gases para producir sulfito sódico,
3. Recuperación de ácido fluorhídrico del ácido fluorsilícico, un subproducto de las plantas de proceso húmedo del ácido fosfórico.
4. Recuperación de ácidos y aminoácidos orgánicos.
5. Recuperación del regenerante de intercambiadores jónicos.
6. Purificación de ácidos y bases.
7. Control de contaminación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El uso de membranas bipolares ofrece soluciones potenciales para la recuperación y reutilización de un abanico de sales orgánicas e inorgánicas en un amplio campo de industrias.

3.1.4. Proceso de Electrodialisis Inversa (EDI) o Reversible (EDR)

El proceso de EDR opera sobre los mismos principios básicos del proceso estándar de ED. Sin embargo en el proceso de EDR, la polaridad de los electrodos se invierte periódicamente (aproximadamente de 3 a 4 veces por hora) y, por medio de válvulas motorizadas, se intercambian las salidas del acumulador de membrana del agua potable producto y del agua residual. Los iones son transferidos así en direcciones opuestas a través de las membranas (Figura 43). Esto ayuda a la rotura de la incrustación y al lavado y salida al exterior de lodos y otros depósitos de las celdas. El agua producto que emerge de la celda previa de salmuera se descarga normalmente al residuo por un tiempo de uno o dos minutos hasta que la calidad del agua se haya restaurado. Nótese que esta inversión de polaridad se debe a dos características inherentes al sistema: a) Las membranas de EDR son simétricas; operan de la misma forma en ambas direcciones, y b) las pilas de EDR tienen una configuración simétrica, siendo idénticos los compartimentos de concentrado y desmineralizado (Ramón Valerdi Pérez. 1999).

La operación automática del proceso EDR normalmente elimina la necesidad de dosificar ácido y/o secuestrantes y la formación de incrustación en los compartimentos de los electrodos se minimiza debido al cambio continuo de condiciones ácidas a básicas. Esencialmente, en la EDR se usan tres métodos para eliminación de incrustaciones y otras materias ensuciantes de las superficies (Manual de desalación USAID, 1980) comprendiendo el sistema de limpieza in situ, desmontaje de la batería, como en la ED normal, e inversión del caudal y polaridad en la batería.

El sistema de inversión de la polaridad aumenta en gran medida los intervalos entre las tareas de desmontaje y montaje, suministrando una reducción total del tiempo de mantenimiento.

La capacidad de la EDR para controlar la precipitación de la incrustación es más efectiva que la ED normal, lo cual es una gran ventaja de este proceso, especialmente para las aplicaciones que requieren altas recuperaciones de agua.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

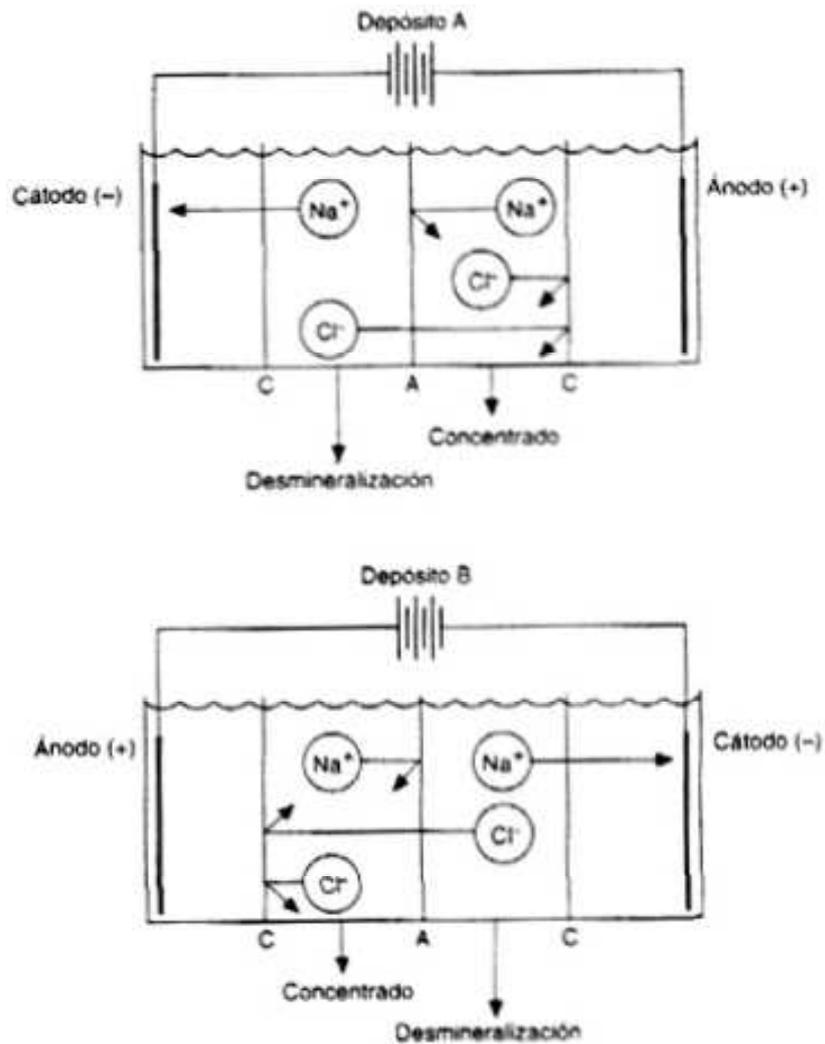


Figura 43. Fuente: CIDTA (2011)

Etapas

La manera en la que se dispone el conjunto de pilas se denomina etapa. La finalidad de las etapas es prever suficiente área de membrana y tiempo de retención para eliminar una fracción específica de sales del flujo desmineralizado. Se usan dos tipos de etapas, hidráulicas y eléctricas. La pila de membranas de la figura 38, es un ejemplo de una etapa hidráulica y una eléctrica. Es decir, el flujo de agua que entra en la pila, hace un solo recorrido a través de las membranas, entre un único par de electrodos y sale al exterior.

Etapas hidráulicas

La máxima extracción de sales de una etapa hidráulica oscila entre un 40 y 60%, normalmente del 50%. Para aumentar la cantidad de sales extraídas en un sistema ED, deben incorporarse etapas adicionales. En sistemas donde son precisas altas

3. MATERIALES Y MÉTODOS

capacidades, se incorporan etapas hidráulicas adicionando más pilas en serie para obtener la desalinización deseada, figura 44.

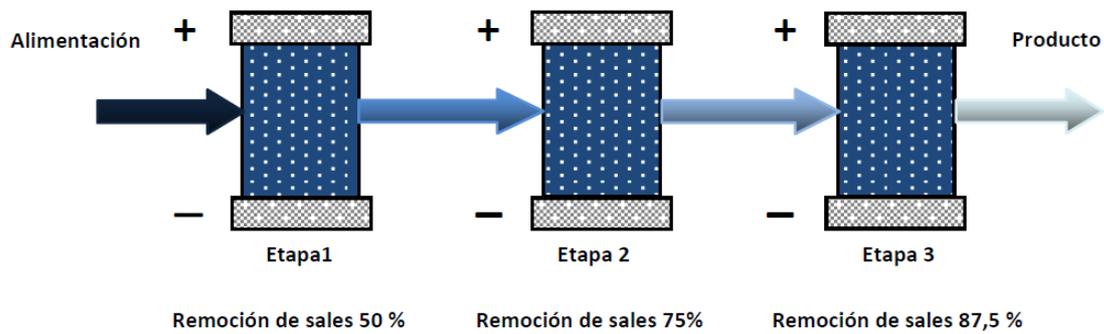


Figura 44. Remoción de sales en tres etapas hidráulicas con rendimiento del 50% por etapa

Para aumentar la capacidad de producción, se disponen líneas paralelas con diferentes etapas, como por ejemplo la mostrada en la figura 45:

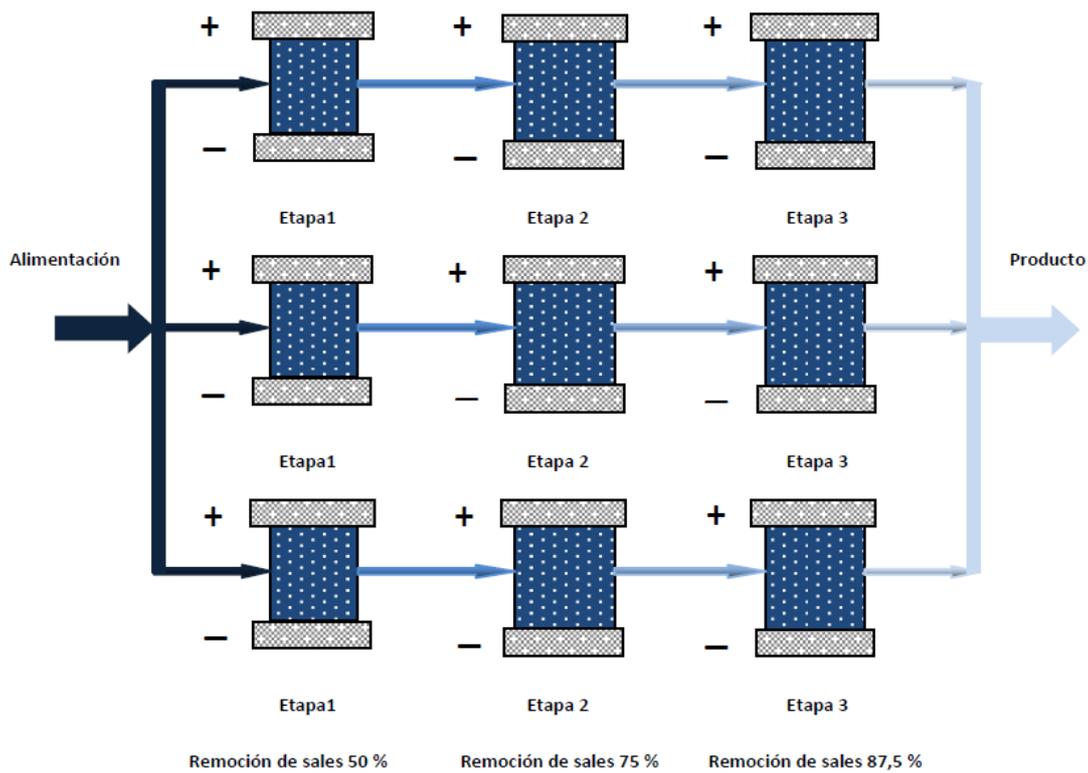


Figura 45. Disposición de tres líneas de tres etapas en paralelo

En sistemas donde las etapas hidráulicas adicionales se incorporan en el interior de una única pila, se utiliza una o más membranas interetapas. Estas membranas son más gruesas (1mm), para resistir una mayor presión diferencial que una membrana normal (0,5 mm). En la figura 46 se muestra una pila con tres etapas hidráulicas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

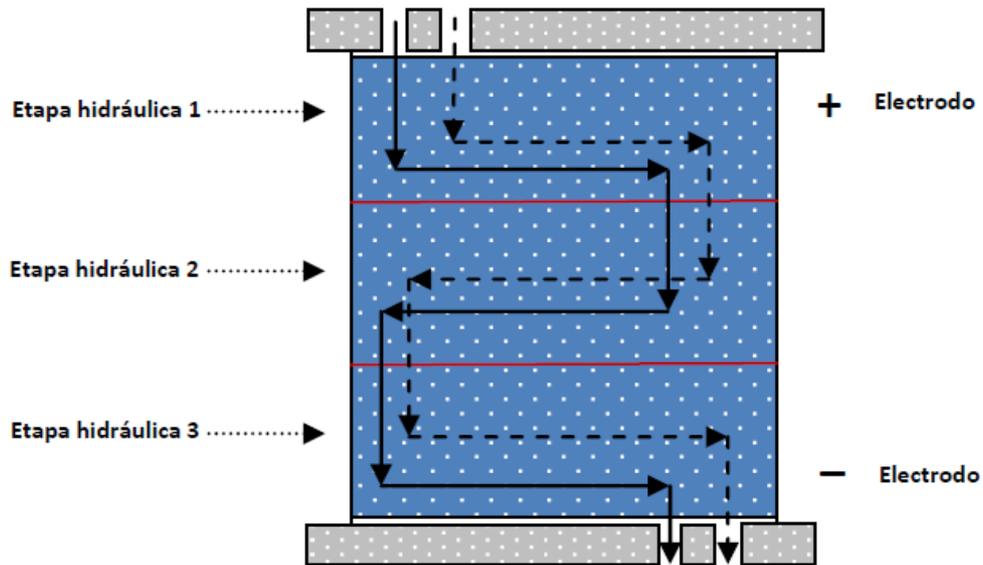


Figura 46. Pila de una etapa eléctrica y tres hidráulicas

Etapas eléctricas

Las etapas eléctricas se llevan a cabo insertando pares de electrodos adicionales en la pila de membranas. Esto da flexibilidad en el diseño del sistema, proveyendo las proporciones máximas de extracción de sales.

Cada etapa eléctrica permite el uso de una corriente eléctrica controlada para cada par de células en una etapa. Como se muestra en el ejemplo de la figura 47, si se usan dos etapas eléctricas, habría dos corrientes independientes. Las etapas hidráulicas 1 y 2 son ahora la etapa eléctrica 1, y la etapa hidráulica 3 es la etapa eléctrica 2. Tenemos la posibilidad ahora de introducir una corriente eléctrica más baja a la etapa hidráulica 3, pueden adicionarse más pares de células para disminuir la caída de presión a un nivel aceptable.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

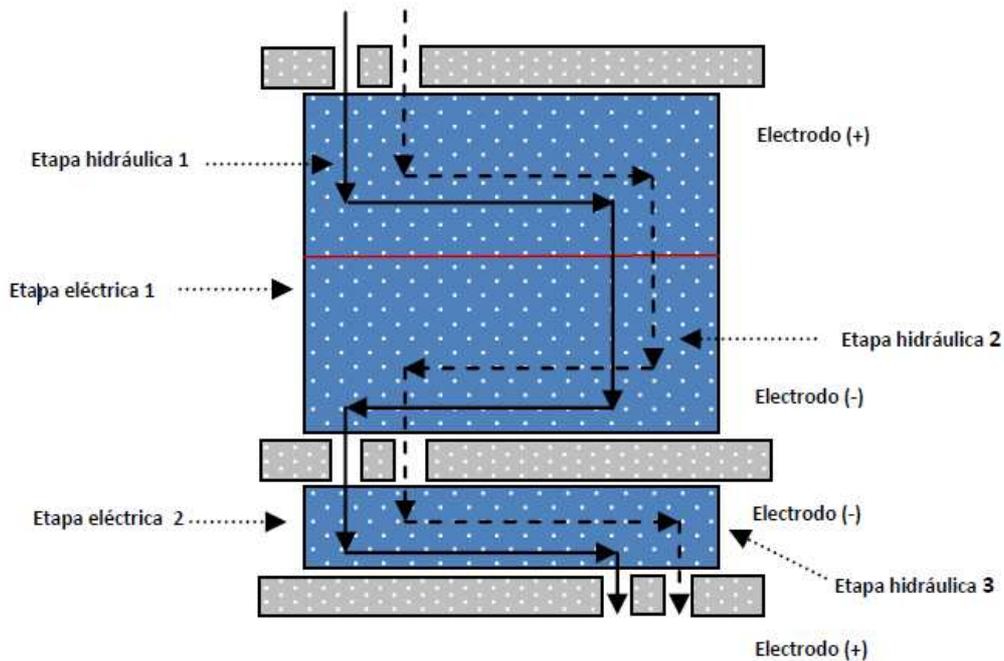


Figura 47. Pila de dos etapas eléctricas y tres hidráulicas

En resumen, la electrodiálisis reversible tiene cinco efectos positivos en el sistema de membranas:

1. Rompe la capa de polarización 3 ó 4 veces cada hora, evitando incrustaciones y polarizaciones.
2. Rompe incrustaciones recientes y las elimina antes de que puedan crecer y dar lugar a problemas.
3. Reduce la suciedad o formaciones similares sobre la superficie de las membranas por inversión eléctrica del movimiento de las partículas coloidales.
4. Elimina la complejidad de problemas prácticos asociados a la necesidad de alimentación continua de ácidos u otros productos químicos
5. Limpia automáticamente los electrodos con ácido formado durante la etapa anódica.

3.1.4.1. Aplicaciones de ED/EDR

Las principales aplicaciones de la ED/EDI comprenden la separación de minerales (Scott, 1990). No es sorprendente que la ED/EDI haya sido usada ampliamente para desalación, donde hay una competencia directa con la OI.

Las aplicaciones potenciales más importantes de la ED/EDI incluyen (Lacey y Loeb, 1972; Leitz y Eisenmann, 1981; Mami, 1991; Itoi, 1979; Moutounet y Escuden 1991; Katz, 1982; Hughes, Raubenheimer y Viljoen, 1992):

3. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Desalación del agua salobre: Es la tecnología de elección, frente a *OI*, en el caso de soluciones acuosas de 500 mg/L – 2000 mg/L de sal, ya que los costes de operación son menores. El consumo de energía es directamente proporcional a la concentración salina de la alimentación, variando de 1 kWh/m³ para influentes de 1000 mg/L de sal a 10 kWh/m³ – 15 kWh/m³ en el caso de influentes con concentraciones de sal de 5000 mg/L. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al; 2006)

2. Concentración de agua marina

3. Desalación de agua marina.

4. Desmineralización de suero.

5. Recuperación de metales y aguas de lavado de electrodeposición.

6. Desalación de purga de agua de fibra de refrigeración.

7. Recuperación de ácidos y bases de efluentes ácidos usados.

8. Desmineralización del vino.

9. Desmineralización del azúcar.

10. Producción de sal de mesa a partir de agua de mar: Esta forma de producir sal común se realiza sólo en Japón, el proceso no es competitivo con los procesos tradicionales de obtención de sal común, estando su economía fuertemente subvencionada por el gobierno. (Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al; 2006)

11. Producción de agua ultrapura: La baja conductividad de las soluciones salinas de concentraciones inferiores a 10 mg/L hace que éste sea el límite de de la electrodiálisis en la producción de agua desalinizada. Para conseguir agua ultrapura se disponen partículas de resina de intercambio iónico en el espacio intermembrana de la solución diluida. Las partículas de resina concentran los iones, reduciéndose la resistencia eléctrica de la celda, lo que permite desalinizar el agua hasta calidades de agua ultrapura. El proceso se denomina electrodesionización y el agua ultrapura obtenida se utiliza en la industria farmacéutica y electrónica (Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al; 2006).

12. Regeneración de aguas residuales para su reutilización: Sustancias con un tamaño de partículas de aproximadamente 0,0004 a 0,1 mm (de rango iónico a macromoléculas) pueden ser eliminadas del agua con ED/EDR. El posible rango de tamaño de las especies permeables se encuentra entre 0,0004 y 0,03 mm. Los contaminantes típicos que pueden ser eliminados se muestran en la siguiente tabla.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Contaminantes			
Sodio	Níquel	Cloruro	Fluoruro
Potasio	Cromo	Sulfato	Cromato
Calcio	Cobre	Nitrato	Acetato
Magnesio	Zinc	Fosfato	Oxhidrilo
Amónio	Estroncio	Cianuro	Conductividad
Arsénico	Hierro	Plata	STD
	Aluminio		

Tabla 8. Contaminantes típicos que pueden eliminarse con ED/EDR. Fuente CIDTA (2011)

Aunque la economía varía de país en país, está claro que la OI es más recomendable a niveles de salinidad de cerca de 3.000 mg/L y superiores (Scott, 1990). Strathmann (1992), por su parte, indica que la ED/EDR hace más económica que el OI en niveles aproximados a los 500 mg/L y mayores, mientras que para niveles de 5.000 mg/L y superiores, OI es el proceso menos costoso.

Para una aplicación determinada, no hay siempre una decisión clara y tajante sobre qué tipo de proceso de separación por membranas se debe seleccionar (Scott, 1990). La composición química o el tamaño del material a eliminar es a menudo la clave. La ósmosis inversa se usa generalmente para eliminar componentes de un tamaño molecular próximo al del agua. La ED puede ser considerada para la eliminación de constituyentes iónicos cuando se requieren grandes niveles de concentración, por encima de los que normalmente son prácticos con la OI, donde las limitaciones de presión osmótica restringen la concentración final a alrededor del 20 por 100 (Scott 1990).

3.1.5. Características de la EDR

1) *Rendimiento:* la Electrodiálisis Reversible (EDR) es una versión de la Electrodiálisis en la que se invierte la polaridad de los electrodos varias veces por hora, lo que induce una autolimpieza química. Esto permite la desalinización de fuentes de agua con recuperaciones muy elevadas del orden del 90%, con mínimo pretratamiento y bajos costos de operación (Antonio Ros Moreno, 2011).

2) *Gasto energético:* los sistemas de electrodiálisis y de inversión de electrodiálisis requieren grandes cantidades de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema; se utilizan para

3. MATERIALES Y MÉTODOS

tratamiento de aguas salobres de baja salinidad en la gama de 1 a 5 gr/l de sales totales disueltas, ya que la cantidad de energía eléctrica necesaria para la purificación es directamente proporcional a la cantidad de sales separadas (para aguas con 5 gr/l de sales totales disueltas, el consumo de energía eléctrica suele estar entre 1 y 2 Kwh/m³). Por éste y otros motivos, estas opciones no se usan mucho en instalaciones de tratamiento de agua de gran escala. Sin embargo, se las puede ajustar para el uso con sistemas pequeños y por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento, comparable en muchos casos a la ósmosis (Antonio Ros Moreno, 2011).

Por otro lado, según Rodríguez Fernández-Alba et al. (2006) el consumo de energía es de 1 kwh/m³ para una concentración de 1000 mg/l y de 10-15 kwh/m³ para una concentración de 5000 mg/l. Según Ramón Valerdi Pérez (1999) el consumo es de 0,5 a 1,1 kwh/m³ + 0,7 por cada 1000 ppm de STD eliminados.

Según Antonio Rodríguez Fernández-Alba et al. (2006) la caída de potencial en cada celda es de 1 - 2 V y los valores de la densidad de corriente del orden de 40 mA/cm². Para un equipo estándar de 200 celdas, con 1 m² de superficie de membrana, la diferencia de potencial es de 200 – 400 V y la intensidad de corriente de 400 A.

La relación entre las necesidades de separación: diferencia de concentración molar entre la alimentación y el efluente desalinizado (Dc), se relaciona con la intensidad de la corriente que circula por el sistema.

$$I = z * \Delta c * F * Q$$

Siendo I la intensidad de la corriente eléctrica, z la valencia de la sal, F la carga eléctrica de un mol de electrones (faraday » 96500 culombios) y Q el caudal de alimentación. El consumo de energía eléctrica (E) se relaciona con I según la ecu. E2

$$E = I^2 * R = I * R * z * \Delta c * Q * F = V * z * \Delta c * Q * F$$

3) *Costes de la operación:* según la empresa "Grupo Aguas de Valencia" (2014) la desalinización de fuentes de agua con recuperaciones muy elevadas del orden del 90%, con mínimo pretratamiento y bajos costos de operación (0,15 - 0,20 €/m³).

Según el proyecto realizado por la Universidad de La Laguna de Canarias (2011), de acuerdo con el estudio de Iglesias et al. (2010) para en las instalaciones de regeneración de España, se recogen los costes de inversión y explotación de las líneas de tratamiento. En los costes de explotación se han incluido las partidas de personal y las analíticas rutinarias. No se incluyen los costes de amortización y las analíticas previstas según la normativa 1620/2007.

Estimación del coste de la línea de tratamiento (Tecnoagua):

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Calidad de agua	Descripción tratamiento	Inversión (€/m ³ d)	Explotación (€/m ³)
A (desalación)	FQ-DL-FG-UF-OI-D	416-736	0,35-0,45
A (desalación)	FQ-DL-FG-EDR-D	310-506	0,35-0,45
A	FQ-DL-FG-UF-D	185-398	0,14-0,20
B	FQ-DL-FG-D	28-48	0,06-0,09
C	FG-D	9-22	0,04-0,07
D	FG	5-11	0,04-0,07

FQ: Físico-químico; DL: Decantación lamelar; FG: Filtración granular; UF: Ultrafiltración; OI: Ósmosis inversa; D: Desinfección; EDR: Electrodialisis reversible

Tabla 9. Coste de la línea de tratamiento. Fuente: Tecnoagua (2011)

- 4) Las pérdidas de agua son bajas (5-20%).
- 5) No suele requerir productos químicos. En caso de hacerlo, se añaden a la salmuera.
- 6) Presenta un elevado coste de la instalación pero bajo coste de operación.
- 7) Solo elimina partículas cargadas.
- 8) Utiliza energía eléctrica.
- 9) Las membranas de electrodiálisis se caracterizan por su resistencia eléctrica (ha de ser pequeña) y su permselectividad (ha de ser elevada). Además, se destaca su resistencia a cambios de pH entre 1 y 10, su vida útil elevada y su resistencia al ensuciamiento.
- 10) Cada pila está formada por los siguientes componentes:
 - Electrodo: Los electrodos son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se verifica la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias cuya transformación se desea. En electrodiálisis únicamente cumplen la función de proporcionar el campo eléctrico necesario para que se produzca el proceso. Por lo tanto son DSAs (ánodos dimensionalmente estables como los elaborados con óxidos metálicos por ejemplo los de dióxido de estaño) ó Pt/Ti (platino soportado sobre titanio) como ánodos, y acero inoxidable como cátodo. Los electrodos se encuentran situados en los extremos superior e inferior y aislados con una goma. La elección del mismo es fundamental y va a determinar el coste y la vida media.
 - Membranas: Basta recordar que en electrodiálisis los criterios más importantes que se toman en cuenta para seleccionar las membranas de intercambio iónico, son los de alta permselectividad y baja resistencia eléctrica. La única excepción la constituyen las dos membranas que delimitan los compartimientos electródicos (de las soluciones de lavado). Éstas últimas deberían ser perfluoradas, de alta

3. MATERIALES Y MÉTODOS

resistencia química, ya que se enfrentan a un ambiente químico mucho más agresivo que el resto de las membranas del módulo (oxidante en el ánodo y valores extremos de pH, ácido en el ánodo y básico en el cátodo).

- Pares de células: un par de célula está compuesto por una membrana aniónica, una membrana catiónica, un espaciador de flujo de agua desmineralizada y un espaciador de flujo de agua concentrada.
- Cuerpos de la celda: es aquel que engloba todos los componentes de la celda y debe ser resistente.
- Juntas: se utilizan para evitar fugas y mezclas entre productos y salmuera. Deben poseer alta estabilidad química y resistencia mecánica. Es de gran interés que ambas propiedades se satisfagan con el menor espesor posible, pues de esta forma se minimizará la distancia intermembránica y por lo tanto el consumo específico de energía.
- Espaciadores o separadores: Los espaciadores son materiales plásticos (polietileno, poliéster) en forma de malla que se colocan entre cada par de membranas. Sus funciones se han descrito anteriormente.

11) Recuperación de agua: La cantidad de agua producida a partir de una unidad de volumen de agua de alimentación se llama recuperación de agua y se expresa usualmente como porcentaje. El factor, de mayor relevancia, determinante de la recuperación de agua es la presencia en el agua de alimentación de sustancias capaces de originar precipitados, como son el CaCO_4 , Mg(OH)_2 y CaSO_4 , ya que cuando su concentración en la corriente de concentrado excede sus límites de solubilidad, precipitan afectando seriamente al rendimiento del proceso, de ahí que el agua de alimentación se deba tratar con ácidos e inhibidores de precipitación, si éste hecho ocurre. Solamente con la recirculación del caudal de concentrado se recupera del 70 al 85% del agua de alimentación como producto, y si además empleamos otros medios la recuperación puede llegar a ser del 90 al 95% (Ramón Valerdi Pérez, 1999).

12) Pretratamiento: Generalmente no se necesita ni preablandamiento ni refrigeración. Los sistemas EDR pueden tratar agua con un índice de Langelier de +2,2 y temperaturas de hasta 45°C sin ningún cuidado especial. Por lo que, generalmente, no se requiere de pretratamientos excesivos, puesto que las membranas de este proceso son bastante resistentes a los oxidantes y al ensuciamiento orgánico. Los pretratamientos se pueden clasificar de manera global en físicos y químicos. El pretratamiento que se debe aplicar va a depender de las características de nuestra agua.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.6. Funcionamiento de una planta de ED

En este apartado se van a estudiar los factores que intervienen en el proceso de ED para desalar agua en una planta según Ramón Valerdi Pérez (1999).

3.1.6.1. Aspectos teóricos de una planta de ED

1) Factores que limitan el rendimiento

El rendimiento de corriente, también llamado rendimiento de Coulomb, expresa la desviación respecto del rendimiento ideal, que se alcanzaría en un proceso electrodialítico en el cual las membranas fuesen idealmente permselectivas y se define como la relación entre los equivalentes de electrólito desplazados y los faradays de electricidad pasados en el proceso (Wilson, 1960). Los factores que limitan el rendimiento del proceso son:

- *Baja Selectividad.* Causada por la penetración de similitones en la membrana que disminuyen el transporte de contraiones y aumenta el efecto de difusión del electrólito por la membrana. Hay que tener en cuenta que ésta diferencia de concentraciones es mayor que la existente entre las disoluciones principales a ambos lados de las membranas, debido a la existencia de capas de fluido polarizadas, próximas a la superficie de las mismas. En general, la tasa de difusión a través de una membrana selectiva tiene una variación compleja con la concentración de electrólito.
- *Transferencia iónica no deseada.* Se da cuando, en determinadas condiciones, los iones hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-), que poseen una elevada selectividad, atraviesan las membranas aniónicas y catiónicas respectivamente.

2) Densidad de corriente límite (polarización) en un dispositivo de ED

La densidad de corriente puede ser aumentada hasta que la corriente para transferir iones exceda del número de iones que pueden ser transferidos. Este punto se denomina densidad de corriente límite (la densidad de corriente es la cantidad de corriente transportada por unidad de área de la superficie de la membrana). Este límite es función de la velocidad del fluido, la temperatura y del tipo de iones presentes.

Mientras que prácticamente todos los iones son transportados a través de las membranas de ED por transporte eléctrico, sólo alrededor de la mitad de los iones que

3. MATERIALES Y MÉTODOS

alcanzan las superficies de las membranas desde la masa de agua, son transportados por el flujo eléctrico. Los iones restantes llegan como resultado de procesos de difusión y convección. Puesto que los iones son eléctricamente transferidos desde el compartimento de desmineralizado a través de las membranas, la concentración de iones en la delgada capa inmediatamente adyacente a la superficie de la membrana es muy pequeña.

Cuando la densidad de corriente aumenta, la capa de disolución próxima a la membrana se llega a vaciar tanto en iones, que la resistencia eléctrica aumenta rápidamente; lo que se traduce en un aumento del voltaje que eventualmente excede el voltaje de ruptura para las moléculas de agua, causando por tanto su disociación, formando iones H^+ y OH^- . Cuando tal disociación de moléculas de agua se produce, hemos alcanzado el *punto de polarización*. La transferencia de iones H^+ en el caso de las membranas catiónicas, y de iones OH^- en el de las aniónicas, llega a ser apreciable. La extensión de la transferencia de protones e hidroxilo depende de la proporción de la concentración de H^+ y los otros cationes en la superficie de la membrana catiónica y la proporción de la concentración de iones OH^- y los demás aniones en la superficie de la membrana aniónica. La polarización ocurre entonces gradualmente, cuando el voltaje aplicado a la célula de membrana se aumenta, y por tanto la densidad de corriente.

La polarización sólo ocurre en los compartimentos desmineralizados, puesto que es en éstas células donde está teniendo lugar la separación. La polarización no llega a ser, normalmente, significativa en ambas membranas al mismo tiempo. Cuando la polarización llega a ser pronunciada en una membrana aniónica, los iones OH^- son transferidos a la corriente de concentrado, haciéndola alcalina. Los iones H^+ remanentes en la célula desmineralizadora procedentes del agua disociada, dan lugar a una disminución del pH del flujo desmineralizado. La polarización de las membranas catiónicas, origina una transferencia de protones al flujo de concentrado, disminuyendo su pH y aumentándolo para el flujo desmineralizado. Por tanto, cambios en el pH de los flujos del proceso, pueden indicar polarización.

La operación con densidades de corriente suficientes para causar una polarización significativa, puede dar lugar a las siguientes ineficiencias:

- El rendimiento de la corriente disminuirá, ya que la transferencia de H^+ y/o OH^- , normalmente, no es el objeto de la operación.
- En la región de polarización, cada incremento adicional de corriente es menos efectivo en transferir los iones deseados ya que la resistencia del agua pura es alta
- La corriente necesaria para transportar las sales aumenta.
- Pérdidas de energía debidas a la energía de disociación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- Alto valor del pH en el concentrado que origina precipitados.

En el diseño de sistemas de electrodiálisis comerciales se utiliza el 70% de la densidad de corriente límite, como máxima densidad de corriente permitida. Por otra parte, según Ramón Valerdi Pérez (1999) se recomienda un valor de operación entre el 60 y 80% del valor límite del parámetro de polarización.

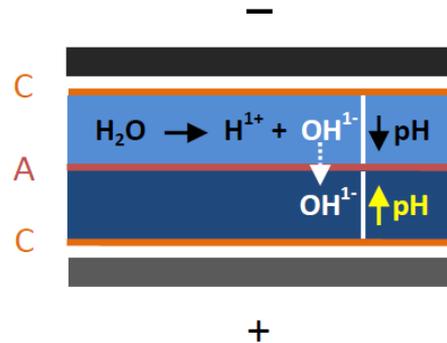


Figura 48. Polarización en membrana aniónica

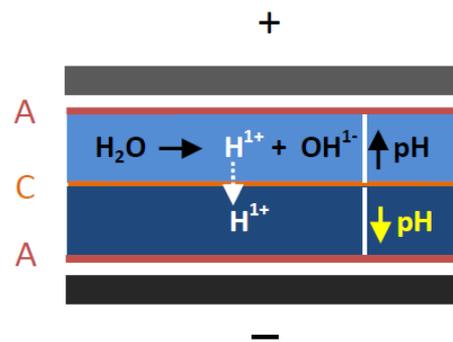


Figura 49. Polarización en membrana catiónica

3) Ensuciamiento de la membrana

Tal y como se ha explicado anteriormente el ensuciamiento de la membrana es debido a la presencia en la alimentación de sustancias que pueden interaccionar con ella, adsorbiéndose y/o precipitando en su superficie o penetrando en su interior, en cuyo caso son adsorbidas en las paredes de los poros, reduciendo el diámetro de paso de estos. La consecuencia del ensuciamiento es una disminución del flujo de permeado, debido a una mayor resistencia de la membrana. Un aumento progresivo de la diferencia de presión transmembrana, con el fin de mantener el flujo de permeado, acelerará el proceso de ensuciamiento, pudiendo llegar a una situación irreversible de taponamiento de la membrana, lo que haría necesario su sustitución (Antonio Rodríguez Fernández-Alba. 2006).

Esta forma de mal funcionamiento es dependiente del tiempo de trabajo de la membrana. La forma de corregirlo dependerá de las características del ensuciamiento.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Así, en el caso de ensuciamiento en la superficie, un cambio en la dirección del flujo, bien en intervalos de tiempo definidos o en forma de pulsos, puede ser suficiente para eliminar el problema. En otras situaciones como ensuciamiento en el interior de la membrana o deposiciones persistentes en la superficie, será necesario en empleo de productos químicos de limpieza.

La mejor forma de retrasar los problemas de ensuciamiento es preverlos identificando las causas que lo producen. A veces esto es posible con pequeñas modificaciones en las formas de operar, como optimizar la diferencia de presión de trabajo para retrasar el taponamiento de los poros, operando a presiones menores que las de flujo de permeado máximo pero suficientes para que la relación flujo de permeado-tiempo de utilización de la membrana sea ventajosa; determinar si los procesos de adsorción son pH dependientes, y si este el caso, optimizar el pH de trabajo; determinar el tipo de pretratamiento que podrían hacerse en la membrana para mejorar su comportamiento al ensuciamiento, etc.

También es posible mejorar el comportamiento al ensuciamiento actuando sobre la configuración de las membranas, se ha comprobado que las membranas del tipo fibras huecas, de pequeño diámetro, dispuestas con orientación vertical y baja densidad de empaquetamiento tienen un mejor comportamiento al ensuciamiento, o que en las membranas con mayor porosidad y mayor diámetro de poro se produce antes la reducción en el flujo de permeado.

Los aspectos comentados representan condicionantes serios en los procesos con membranas, debido al acortamiento del periodo de vida de las membranas y la discontinuidad que supone las paradas necesarias para llevar a cabo la limpieza o sustitución de las membranas, lo que se traduce en costes de operación.

4) Área de membrana y consumo de potencia

Para una pila dada, con un tipo de etapa y membrana, el consumo de potencia es inversamente proporcional al área de membrana instalada, pudiendo ésta instalarse, como unas pocas celdas de amplia área membranosa, o muchas de área pequeña.

El consumo específico de potencia del proceso es la suma de la potencia de bombeo del diluido (P_D), concentrado (P_C) y lavado de electrodos (P_E) a través de la pila y de las tuberías. Así pues, la ecuación que nos da la energía total del bombeo (PT) es

$$PT = PD + PC + PE$$

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La pérdida de carga en las celdas electrodiálíticas es función de la geometría de los espaciadores, del espesor de la celda y de la distribución geométrica de las mismas.

5) Resistencia de una célula electrodiálítica

Esta resistencia es la suma de las resistencias correspondientes a las membranas intercambiadoras de la celda, catiónica (r_2) y aniónica (r_4), y las de las láminas de las disoluciones concentrada y diluida (r_1 y r_3) (figura 50). De estas cuatro contribuciones, la más importante es la de la lámina de diluido, como a continuación ponemos de manifiesto, con el manejo de unos valores típicos (Solt. 1987).

En la Tabla 10 se muestra los valores usuales de la resistencia específica de las membranas intercambiadoras, de modo que para una pareja de membranas aniónica/catiónica, la resistencia por cm^2 está en torno a 5Ω ($r_2 + r_4$).

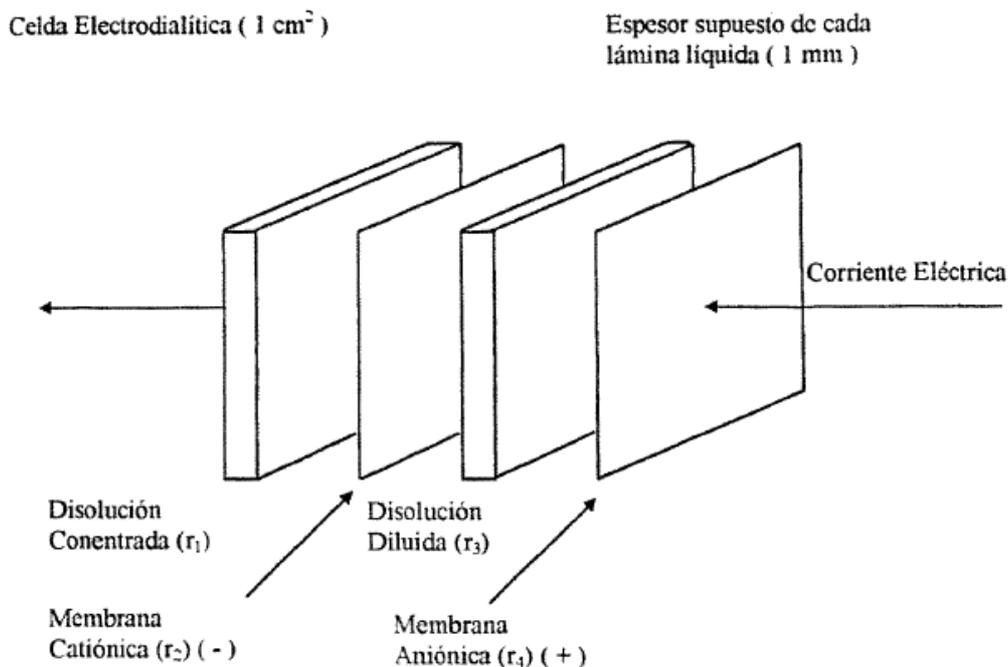


Figura 50. Resistencias en una celda de ED. Fuente: Ramón Valerdi Pérez (1999).

	Membrana catiónica	Membrana aniónica
Resistencia eléctrica (Ω/cm^2)	2-3	1-2
Nº de transporte: cationes	0,98 <	0,02 >
Nº de transporte: aniones	0,02 >	0,98 <

Tabla 10. Valores usuales de la resistencia específica de las membranas intercambiadoras.

Fuente: Ramón Valerdi Pérez (1999).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El predominio de r_3 sobre las demás contribuciones a la resistencia eléctrica de la celda electrodiálítica, establece un límite inferior de salinidad en la producción, que es determinante en la rentabilidad económica del proceso.

6) Hidrodinámica

En el diseño de una pila de ED se debe cuidar el mejorar la turbulencia que favorezca la separación de las sales en el flujo del diluido.

La mayoría de los montajes comerciales operan a números de Reynolds de aproximadamente 100. En una situación ideal, si consideramos la sección transversal de una celda de diluido, observamos que al lado de la membrana catiónica y de la aniónica hay dos capas límite de fluido que se mueven en régimen estacionario (capas no agitadas) y, el resto del líquido que está entre ellas lo hace en régimen turbulento (agitado).

La situación real no es tan simple debido a la presencia de separadores entre la membranas, para mantener el espaciado de las celdas, guiar la distribución del líquido, y promover turbulencia. La presencia de los espaciadores tiene un doble efecto: apantalla una parte de la membrana, y favorece la turbulencia. Este apantallamiento de la membrana ocurre donde quiera que el separador toque a la membrana en el compartimento de diluido. Habrá un apantallamiento adicional si el separador toca por la otra cara, al entorpecer la migración de los iones a través de la membrana.

Para estimar el apantallamiento óptimo, lo más conveniente es realizar experiencias piloto con plantas a pequeña escala con las mismas condiciones de trabajo y después ver en que extensión los datos obtenidos pueden coincidir con los de un diseño de planta a gran escala (Rautenbach. 1989).

7) Fugas de corriente/quemaduras

Para un sistema determinado de ED, existe un límite en el voltaje a ser aplicado. Este límite está en función de la temperatura del agua, concentración de los flujos, tamaño de la membrana y sección interior del colector. Si se sobrepasa dicho límite, una corriente eléctrica excesiva pasará lateralmente desde el electrodo a través de una membrana adyacente al colector de flujo de concentrado, generando suficiente calor como para dañar algunas membranas y espaciadores en las inmediaciones del electrodo. El límite de voltaje se define como su valor al que resulta afectado solo un par adyacente al electrodo, es decir, un 80% de dicho voltaje.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

8) Retrodifusión

La retrodifusión ocurre cuando la concentración de iones del flujo concentrado, es sustancialmente más alta que la concentración en iones del flujo desmineralizado. El resultado es que algunos iones del flujo concentrado regresan a través de la membrana al flujo desmineralizado en contra de la fuerza ejercida por la tensión de corriente continua, disminuyendo el rendimiento de las membranas cuando la proporción entre las concentraciones es igual o mayor a 150:1.

9) Índice de Langelier

La acumulación de iones Ca^{2+} , sólidos totales disueltos (STD) y HCO_3^- en el flujo de concentrado como resultado de la purificación del flujo desmineralizado, puede dar lugar a incrustaciones de CaCO_3 . El índice Langelier indica la tendencia incrustante de un agua específica. Este índice es la diferencia entre el valor actual del pH y el pH al cual tendrá lugar la incrustación para una composición particular de iones presentes. Por tanto, un índice positivo indica una tendencia a incrustar, mientras que si es negativo representa una tendencia a no producir incrustaciones o corrosiones. El índice Langelier pueden bajarse mediante pretratamientos del agua de alimentación, para eliminar Ca^{2+} y Mg^{2+} , por inyección de ácido en el flujo de concentrado o por inversión de la polaridad de la pila.

3.1.6.2. Aspectos prácticos de una planta de ED

1) Materiales

Los materiales empleados en las pilas ED como bombas, tuberías, depósitos y el resto de equipamiento asociado a los procesos con membranas intercambiadoras se eligen en base a su resistencia a la corrosión, su resistencia física y su resistencia al ataque electroquímico por las disoluciones que se van a tratar.

Las tuberías que conducen las disoluciones hacia y desde la pila ED, suelen ser mayoritariamente de cloruro de polivinilo (PVC) reforzadas con resina epoxi (para las uniones), además de no ser conductoras. Esto es así debido a la resistencia a la corrosión de dichos materiales.

Los depósitos suelen ser del mismo material, de plástico reforzado o no reforzado, de materiales con revestimiento plástico o de fibra de vidrio y en algunos casos de plástico reforzado con acero de bajo contenido en carbono.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1) Bombas

La característica principal de las bombas que se emplean en los procesos ED es su resistencia a la corrosión, ya que así se elimina la posibilidad de la introducción de metales pesados en el agua de alimentación y las pérdidas de presión hidráulica a través del equipo. La naturaleza de las disoluciones a tratar en cada aplicación fija la resistencia a la corrosión por el uso de los materiales empleados. Así, es recomendable, para preservar la corrosión de las bombas, no introducir cantidades elevadas de metales pesados en las disoluciones de alimentación. En general, la resistencia de los materiales empleados es buena y su elección dependerá del tipo de agua a tratar.

1.2) Depósitos de almacenamiento

El tamaño de los depósitos (si se emplean) depende del tiempo necesario para interrumpir la operación cuando su nivel es demasiado bajo, o del tiempo necesario para ponerlo en funcionamiento cuando el nivel es demasiado alto (Huffman. 1972 y Bninner. 1990). Los depósitos deben ser lo bastante grandes como para asegurar una fuente de alimentación igual, o al menos muy parecida a la capacidad de bombeo de las bombas empleadas. Su tamaño depende también de la posible agitación del líquido, juntas, costes y en general de las características del proceso de alimentación.

1.3) Suministro de potencia

La C.C. empleada en los procesos ED generalmente está suministrada por equipos de transformadores y rectificadores, aunque en alguna ocasión se han empleado conjuntos de motor-generador (Huffman. 1972 y Brunner. 1990). La potencia puede suministrarse con transformadores que pueden ser monofásicos o trifásicos y pueden haber diodos de silicio dispuestos como rectificadores de onda completa. Se emplean generalmente condensadores con circuitos monofásicos para dar voltaje continuo con poco rizado. Pero con transformadores trifásicos y rectificadores de onda completa, la salida de voltaje tiene una ondulación aceptablemente pequeña sin el uso de condensadores.

2) Pretratamiento de las disoluciones de alimentación

Uno de los problemas más serios de la ED/EDR es el ensuciamiento de las membranas por los compuestos inorgánicos y orgánicos presentes en el agua de alimentación de la pila (Korngold. 1970, Lacey. 1972 y Van Duin. 1973), por ello, es necesario el pretratamiento de la misma. El ensuciamiento producido por los compuestos inorgánicos se debe a la precipitación de sales poco solubles como el CaCO_3 y CaSO_4 en

3. MATERIALES Y MÉTODOS

los compartimentos de salmuera y a la fijación de cationes multivalentes (Fe y Mn) por las membranas catiónicas; mientras que, el orgánico se produce por la precipitación de aniones con carga negativa sobre las membranas aniónicas en los compartimentos de producto. El resultado de éste proceso de ensuciamiento es el aumento de la resistencia de la pila de membranas que a su vez provoca un aumento del consumo de potencia y por consiguiente, un aumento del coste del proceso.

El agua de alimentación debe estar exenta, en mayor o menor extensión, de una serie de materiales que son los responsables del ensuciamiento de la pila, como (Katz. 1982]:

- Trazas de metales pesados como Mn, Fe y Cu.
- Gases disueltos como O₂, CO₂ y H₂S.
- Sílice, tanto disuelta como en forma polimérica.
- Coloides inorgánicos y orgánicos.
- Materia particulada.
- Metales alcalinos como Ca, Sr y Ba.
- Materia orgánica disuelta de origen natural y humano (de composición y pesos moleculares variables).
- Materiales biológicos (virus, bacterias, algas y hongos).

Debemos prever un pretratamiento para las disoluciones de alimentación de la pila ED con el fin de eliminar las partículas de materia y prevenir el crecimiento bacteriano dentro de las pilas cuando se traten disoluciones que puedan dar lugar al mismo. Las partículas de materia se depositan dentro de los compartimentos de la disolución. Algunos depósitos aumentan la resistencia de las celdas electrodiálíticas e interfieren en la propia distribución de las disoluciones dentro de los compartimentos, llegando en casos extremos, a bloquear o reducir el flujo de aquellas hacia los mismos. Esta reducción del flujo puede originar una mezcla inadecuada de la disolución dentro de los compartimentos afectados y dar lugar al fenómeno de la polarización visto anteriormente.

La materia orgánica se elimina mediante filtros de carbono. Los gases disueltos por aireación y el H₂S por oxidación y filtración. Por otra parte, las disoluciones pueden soportar el crecimiento bacteriano mediante la cloración continua de la disolución de la alimentación o por la adición de un tratamiento bactericida; o bien, la pila ED debe tratarse periódicamente, con medios similares, para destruir el crecimiento bacteriano dentro de ella, como por ejemplo, un tratamiento de cloración-descloración, ésta última necesaria para prevenir la oxidación de las membranas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la eliminación de las partículas de materia, el tratamiento usual es la filtración, mediante filtros de cartucho o arena, que depende del tamaño y forma de las mismas (Lacey, 1972 y Brunner, 1990). Las partículas gelatinosas, coloidales y filamentosas causan un grave problema porque se adhieren más fuertemente a la malla de los espaciadores dentro de los compartimentos de la disolución que las partículas granulares. Su eliminación se puede llevar a cabo mediante una limpieza periódica de la pila (membranas y espaciadores) con disoluciones que contengan agentes enzimáticos activos o con disoluciones de fuerza iónica elevada, como por ejemplo NaCl concentrado, que provocan la desaglomeración de los coloides. Por todo ello, es muy recomendable eliminar las partículas de materia tanto como sea posible, un buen método es el empleo de filtros de cartucho de 5 μm

En aquellas aplicaciones en las que la disolución de alimentación contenga pequeñas cantidades de cationes trivalentes o tetravalentes, tales como hierro, manganeso o torio, además de los iones que deben ser transferidos por las membranas, aquellos se deben de eliminar ya que pueden atacar a las cargas negativas fijadas a la resina de intercambio iónico de la membrana intercambiadora catiónica, de tal forma que por este camino se neutralizan, total o parcialmente, las cargas negativas y como consecuencia de ello se produce una disminución del número de transporte de los otros cationes y lógicamente, una disminución de su eficiencia culombiana (Lacey, 1972 y Brunner, 1990). Además, también se puede producir una inversión de carga porque, en apariencia, los iones tetravalentes positivos se autoagregan a las cargas fijadas negativas de forma que al menos una de sus cargas positivas no está neutralizada por las cargas negativas de la matriz. Dando como resultado una carga positiva neta sobre la membrana catiónica que se convierte, de esta forma, en una membrana de intercambio aniónico.

Por otra parte, si en el agua de alimentación se encuentran presentes pequeñas cantidades de iones de hierro y manganeso, y el pH es lo suficientemente alto, se forman hidróxidos insolubles de los mismos sobre la superficie de las membranas y dentro de las mismas, provocando un aumento de su resistencia a menos que sean secuestrados con agentes complejantes tales como el hexametáfosfato sódico. Por tanto, se recomienda la eliminación de las trazas de estos iones metálicos antes de que el agua de alimentación pase por la pila ED, mediante la oxidación, ajuste del pH y filtración con filtros de arena verde. Su concentración en las disoluciones de alimentación no debe superar las 0,05 ppm (Lacey, 1972). Además, puede ser recomendable para eliminar las trazas de algunos metales pesados, el tratamiento de las mismas con H_2S o Na_2S y posteriormente proceder a su filtración.

Por último, si bien el pretratamiento del agua de alimentación en ED/EDR es menos severo que en Osmosis Inversa, sin embargo, es muy recomendable si contiene: Fe >

3. MATERIALES Y MÉTODOS

0,3 mg/l; Mn > 0,1 mg/l; H₂S > 0,3 mg/l; Cl₂ y turbidez > 2 NTU (Manual de Desalación de USAID. 1980).

3) Consideraciones de diseño en una pila ED

3.1) Tipos de etapas en una pila ED

La forma en que se disponen las membranas dentro de la pila configuran las llamadas etapas. Su propósito es proporcionar suficiente área de membrana y tiempo de retención para eliminar la fracción de sal especificada de la corriente de desmineralizado. Se emplean dos tipos de etapas: etapa hidráulica y etapa eléctrica. En una pila con una sola etapa eléctrica y otra hidráulica, cada incremento de masa de agua realiza un paso a través de la superficie de membrana, el cual consiste en entrar, en fluir a través de un espaciador de flujo de agua entre dos membranas y salir a través del orificio de salida. Los dos tipos de etapas están explicados en el apartado 3.1.4.

3.2) Caída de Presión / Espaciadores de Flujo

La caída de presión en una pila de membranas, es la suma de todas las caídas de presión en cada una de las etapas hidráulicas, lo que depende del tipo de espaciador, de la velocidad de flujo por etapa y del número de celdas electrodiálíticas de la etapa. Con el fin de alcanzar una elevada flexibilidad en el diseño, se han desarrollado los espaciadores con diferentes perfiles de presión-velocidad (Mener, 1984).

3.3) Presión diferencial

La presión diferencial es la diferencia de presión hidráulica entre la corriente desmineralizada y la concentrada. Durante el funcionamiento normal de la pila ED, la presión de la corriente de desmineralizado se mantiene de 0,5 a 1,0 psi (0,034 bares a 0,068 bares, 10 a 30 pulgadas de agua) más alta que la de concentrado, con el fin de asegurarnos de que si ocurriese una infiltración, es decir, que si dentro de una o varias celdas electrodiálíticas se produjese la mezcla de las corrientes de desmineralizado y de concentrado (pérdida de cruce), sea la corriente desmineralizada la que se infiltre en la concentrada, ya que lo contrario causaría la contaminación de la primera. La medida de la presión diferencial se realiza en las tuberías de entrada a la pila.

3.4) Transferencia de Agua

Algo de agua se transfiere eléctricamente, pero no hidráulicamente, a través de las membranas acompañando a los iones. La cantidad de agua transferida varía con el tipo

3. MATERIALES Y MÉTODOS

de membrana y con la concentración de la disolución. Normalmente, se transfiere el 0,5% del flujo de corriente desmineralizada por cada 1000 ppm de sal eliminada. Esto representa una limitación del sistema ED/EDR.

3.5) Limite de Temperatura

Las pilas ED comerciales tienen un límite superior de temperatura de operación de 48 °C, que viene determinado por la baja densidad de los espaciadores de polietileno, que tienden a perder su rigidez a temperaturas elevadas. Las membranas de transferencia catiónica y amónica pueden soportar mayores temperaturas, generalmente hasta un rango entre 60 a 70 °C. Se han desarrollado espaciadores que soportan temperaturas más elevadas, aunque su comercialización es todavía escasa.

4) Esquemas operativos y de control

La naturaleza de un sistema de control dependerá de los objetivos de operación de la planta ED. Por tratarse de un proceso muy versátil es de gran importancia fijar los objetivos cuidadosamente antes de diseñar el equipo y el sistema de control. Algunos objetivos exigibles a una la planta ED son (Soriano, 1989):

1°) Producción constante de calidad mínima especificada, independientemente de la calidad de la alimentación.

2°) Producción a concentración constante, independientemente de la concentración y temperatura de la alimentación.

3°) Minimizar los costes del producto con algunas restricciones sobre la calidad y/o cantidad.

4°) Incrementar el producto en pequeñas fracciones volumétricas respecto de la alimentación (grado de recuperación).

5°) Evitar las condiciones operativas con efectos adversos sobre la vida media de algunos componentes.

6°) Maximizar la vida de los componentes.

5) Postratamiento

El agua producto obtenida en un proceso ED/EDR, usualmente no contiene ácidos, por lo que no requiere un ajuste posterior del pH, además sólo elimina el nivel de sales

3. MATERIALES Y MÉTODOS

deseado, por tanto suele ser un agua poco agresiva y el único tratamiento necesario es el tendente a la eliminación de la materia no ionizable que contenga la alimentación como pueden ser la sílice, partículas, bacterias, virus, pirógenos y materia orgánica, en cuyo caso los métodos de eliminación son los característicos de las depuradoras. Se han propuesto métodos de desinfección alternativos como: cloraminas, ozono, peróxido de hidrógeno y dióxido de cloro (Elyanow, 1994).

Por otra parte, el agua suele contener gases como materia disuelta. Los elementos más comunes son el oxígeno y el dióxido de carbono. Para ello se realiza una descarbonatación o desgasificación que consiste en hacer pasar agua por la parte superior mediante difusores haciendo que este resbale sobre el material de una columna de relleno o bien desciende a través de platos perforados. Al mismo tiempo un gas (aire) es inyectado por la parte inferior y a contracorriente. Con esto, se consigue eliminar el dióxido de carbono (90-95%).

6) Eliminación de salmuera

La cantidad de salmuera producida depende de la cantidad de agua de alimentación tratada y de las características del proceso de desalación y contiene los sólidos disueltos a elevada concentración que se deben eliminar de forma que el perjuicio ambiental producido sea el mínimo posible. Algunas de las formas comunes de eliminación de salmuera son (Schutte, 1983 y Andrews, 1993):

6.1) Reciclado de las Aguas de Desecho de la Planta

Es un procedimiento que, como se ha visto en algunos procesos de alta recuperación, puede recuperar más del 95% del agua de desecho de la planta.

6.2) Vertido en el Mar

Es el proceso más económico, siempre que la situación física de la planta lo permita. Se deben observar las normas medioambientales vigentes.

6.3) Evaporación

Es un método efectivo para las zonas áridas interiores con elevadas tasas de evaporación, en donde se dispone en lagunas de amplia superficie. En éste caso hay que prevenir las posibles infiltraciones a acuíferos subterráneos o su derivación a fuentes o corrientes superficiales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

6.4) Pozos de Aguas Salobres

Pueden ser naturales o artificiales y permiten la eliminación de grandes volúmenes de salmuera.

6.5) Inyección en Pozo Profundo

Se inyecta la salmuera en pozos mucho más profundos que los acuíferos subterráneos de la zona con el fin de evitar contaminación por infiltración. Para éste propósito se suelen utilizar minas cerradas.

6.6) Procesos de Evaporación-Cristalización

La salmuera se procesa en evaporadores-cristalizadores, produciéndose un producto prácticamente seco que se puede absorber en cenizas para producir un vertido cero de efluente. Es el método recomendable sobre todo para la eliminación de efluentes industriales contaminantes.

7) Variables de trabajo independientes

Para la evaluación de una planta ED/EDR a pequeña escala, dependiendo del tipo de aplicación posterior, se deben tener en cuenta las siguientes variables de trabajo (Ionics Inc.).

7.1) Concentración de alimentación

Preferentemente es deseable someter al proceso de electrodiálisis disoluciones de alimentación que tengan una concentración a la que su conductividad sea máxima ya que se consume menos energía eléctrica (C.C.) y la densidad de corriente límite es mayor.

Si la corriente de alimentación va a ser concentrada, ésta deberá de estarlo tanto como sea posible, teniendo en cuenta los efectos de retrodifusión, de precipitación de las especies iónicas transferidas, en la membrana y de cortocircuito eléctrico interno, debido a la elevada concentración salina, entre los canales de disolución.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

7.2.) *Corriente de Alimentación de Electrodo*

La corriente de alimentación del electrodo, debería ser una disolución de 0,1 a 0,2 mol/l de Na_2SO_4 acidificada a pH 2 o 3 para evitar la incrustación sobre el mismo. Este hecho no es muy significativo para la evaluación de plantas en laboratorio.

7.3) *Temperatura*

Conforme aumenta la temperatura de trabajo habrá menor necesidad energética y de bombeo ya que la resistencia eléctrica del sistema y la viscosidad del fluido será menor. Por el contrario, no se debe exceder el límite de temperatura tolerado por membranas y espaciadores. En general el aumento de temperatura acorta la vida de las membranas incrementando los gastos de reemplazo, además, el precalentamiento de la alimentación supone un gasto adicional. Como norma se debe evitar la operación a temperaturas superiores a 50 - 60°C

7.4) *Caudal*

Cuanto mayor sea el caudal, más elevada será la densidad de corriente límite. Para una desmineralización dada, el área es inversamente proporcional a la densidad de corriente. Análogamente, a mayor caudal, menor área total de membrana requerida. El caudal máximo permisible viene limitado por la caída de presión hidráulica de la pila, normalmente se opera a valores menores del máximo para evitar el aumento de los costes de bombeo.

7.5) *Membranas*

Las membranas de la pila ED/EDR son de tipo estándar, si se requiere efectuar operaciones especiales se debe recurrir a membranas específicas, cuyas características deberán ser tenidas en cuenta para la realización del proceso.

8) *Variables de trabajo semiindependientes*

8.1) *Densidad de corriente*

Se define como la cantidad de corriente por unidad de área disponible de membrana a través de la cual pasa la corriente eléctrica. A mayor densidad de corriente, menor gasto de inversión y reemplazo de membranas por ser menor el área superficial de la celda electrodiálítica requerida para alcanzar un nivel determinado de transferencia iónica, pero el coste energético será mayor porque el voltaje varía proporcionalmente

3. MATERIALES Y MÉTODOS

a la densidad de corriente. Además, la densidad de corriente, aumenta aproximadamente un 1% por cada 0,55 °C de aumento de temperatura. Para un sistema dado, de concentración fija, la densidad de corriente aumenta con el aumento del caudal.

9) Variables de trabajo dependientes

9.1) Concentración de la Corriente de Producto

La concentración de la corriente de producto, después de un paso por la pila, es función del caudal, de la densidad de corriente y del rendimiento de corriente. La cantidad agua que se transfiere es función de la corriente total pasada y del espesor de la membrana, siendo un valor típico de 200 a 400 ml por equivalente de corriente eléctrica, dependiendo de la concentración iónica.

9.2) Superficie de Membrana

El área superficial de membrana total (tamaño de planta), necesaria para alcanzar un determinado grado de transferencia iónica (también denominado "corte"), depende de la concentración de la corriente de producto después de un paso por el sistema ED/EDR.

Si no se alcanza el corte requerido, tanto en unidades grandes como en pequeñas, se puede operar el sistema en tandas o con etapas en serie adicionales.

9.3) Voltaje

Depende de la densidad de corriente y de la resistencia eléctrica de la pila. Usualmente, el voltaje se varía de forma manual y se mide la corriente resultante en un amperímetro, calculándose la densidad de corriente deseada.

Los voltajes óptimos exhiben valores próximos a los correspondientes al inicio del proceso de polarización, por ello no deben ser excedidos de forma importante.

9.4) Energía de Bombeo

Depende del caudal requerido, viscosidad de los fluidos y número de pasos del fluido de la alimentación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

9.5) Vida de Membrana

Un factor determinante en la vida de las membranas es la agresividad química del agua de alimentación, que puede provocar el ataque químico a la membrana, fenómeno que se ve incrementado con el aumento de temperatura. Este hecho, se pone en evidencia, a veces, cuando después del ataque se produce una rápida disminución de la corriente que puede ser debida al aumento de la resistencia de la corriente a desmineralizar produciendo un depósito de materiales sobre la membrana, debiéndose de eliminar estos materiales del agua de alimentación.

10) Limpieza de membranas y electrodos

Según Patricia Martínez Martínez (2012) el proceso de limpieza química de los electrodos es una rutina de mantenimiento preventivo usado para eliminar las incrustaciones o ensuciamiento del compartimento de los electrodos mediante inyección de ácido en los mismos.

La limpieza y enjuague de membranas y del bastidor hidráulico de posibles incrustaciones o contaminantes, normalmente se realiza con carácter mensual o cuando sea necesario en caso de problemas. Dependiendo el tipo de contaminación se utilizarán disoluciones de HCl y/o NaCl.

Durante el proceso de limpieza de la unidad se suspende la operación normal. La disolución química de limpieza se bombea al interior del sistema desde el tanque de limpieza química con la ayuda de la bomba de salmuera.

El caudal de limpieza fluye a través de la línea de alimentación de salmuera comunicándose los flujos de diluido y concentrado, tanto de entrada como de salida, y estableciéndose un circuito cerrado.

10.1) Limpieza con ácido

Se recomienda una limpieza con ácido periódicamente en todas las unidades. La concentración de ácido a recircular por el sistema debe ser del 5 % aproximadamente. La frecuencia recomendada de limpieza varía entre las 200 a las 2000 horas. En concreto en la planta de Heineken Valencia, se realiza a las 300 horas, aunque actualmente se realizará con más frecuencia por la subida del Set Point de salmuera. El ácido clorhídrico elimina las incrustaciones de carbonato cálcico y dióxido de carbono. El ácido clorhídrico elimina el sulfato cálcico y el estroncio mejorando su solubilidad. Cuando se sospecha de la existencia de graves incrustaciones de sulfato, se recomienda dejar a la unidad con la disolución ácida en su interior durante toda la

3. MATERIALES Y MÉTODOS

noche para conseguir su máxima efectividad. El ácido clorhídrico también ayuda a eliminar los iones de hierro, aluminio, manganeso y otros metales pesados. También ayuda a eliminar depósitos de suciedades ligeras de la superficie de la membrana y polielectrolitos aniónicos y antiincrustantes.

10.2) Limpieza con cloruro sódico

La utilidad de la disolución salina es eliminar los contaminantes orgánicos de las membranas de intercambio iónico. Este tipo de tratamiento se realiza usualmente en unidades que tratan agua procedente de ríos, lagos, fuentes o de tratamientos biológicos de depuradoras urbanas, que contienen carga orgánica. Normalmente una limpieza básica debe ir acompañada posteriormente de una limpieza ácida.

11) Resumen de parámetros para el diseño de una planta ED/EDR

Para el diseño de un planta ED/EDR se precisa la siguiente información básica (Wilson, 1960, Huffman, 1972, Lace, 1972, Meller, 1984 y Brunner, 1990]:

- ✓ Análisis del agua a tratar: incluye los valores promedio y máximos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Fe (total), Fe (disuelto), HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , pH , conductividad, turbidez, contenido en COD y temperatura.
- ✓ Capacidad y calidad requeridas del agua producto.
- ✓ Costes del agua a tratar y de descarga del desecho de agua.
- ✓ Costes de material.
- ✓ Costes energéticos.
- ✓ Diagrama de flujo del proceso y diseño de la pila.
- ✓ Empleo del agua desalada.
- ✓ Localización y forma de llevar a cabo la operación (continua o discontinua).

3.1.6.3. Método estándar de operación de una planta

La operación de una planta ED/EDR requiere el control de determinados parámetros experimentales, que son:

A) pH y Caudal en:

- Agua de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.
- Corriente de recirculado.
- Corriente del lavado de electrodos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

B) Presión en:

- Corriente de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.

C) Temperatura en:

- Agua de alimentación.

D) Parámetros Eléctricos:

- Voltaje y amperaje aplicado a cada etapa.

E) Conductividad en:

- Agua de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.
- Corriente de recirculado.

F) Calidad de Agua en:

- Corriente de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.

El sistema de operación de una planta está constituido por los siguientes materiales:

- ❖ Depósitos de alimentación: también se emplean como tanque de mezclado de agua producto y desecho, cuando es necesario la reutilización como agua de alimentación para ahorro de consumo. Todos los depósitos son de fibra de vidrio.
- ❖ Depósito desaireador: se emplea para la recogida del agua de lavado de electrodos. Consta de un pequeño bidón de plástico, en cuya entrada se sitúa una trompa de vacío que succiona aire para favorecer el desprendimiento de los gases provenientes de los compartimentos electródicos; éste depósito no se llena, sino que conforme cae el agua, ésta pasa al desagüe quedando los gases en la parte superior del mismo de donde son evacuados al exterior.
- ❖ Tuberías: las de conducción son de PVC, y las de conexión a la pila y al depósito desaireador son de goma reforzada.
- ❖ Llaves reguladoras: son llaves de esfera de PVC con diámetro acorde con la tubería.
- ❖ Bombas: una para alimentación y otra para recirculación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- ❖ Filtro de cartucho.

- ❖ Rotámetros: uno de escala para medir el caudal del agua de alimentación, dos de escala para medir los caudales de producto y desecho y otro para medir el caudal de recirculación de desecho.

- ❖ Electroválvulas: situadas a la entrada de la pila, en cada canal de alimentación (son del tipo de las empleadas en las instalaciones de riego por goteo), válvulas motorizadas de acero inoxidable, situadas a la salida de la planta. Tanto unas como otras cambian para conmutar canales de producto y desecho sincrónicamente con los cambios de polaridad. Tanto las válvulas motorizadas como las electroválvulas pueden funcionar de forma manual y automática.

- ❖ Manómetros
 - uno a la salida de la bomba de alimentación, otro a la salida de la bomba de recirculación.
 - uno antes y otro después del filtro de cartuchos.
 - uno a la entrada de cada canal de alimentación a la pila.
 - uno a la salida del canal de producto y otro en la del canal de desecho.
 - Uno situado a la entrada de la corriente de lavado de electrodos.
- ❖ Transmisor de presión, instalado para el control informatizado de la presión de entrada a la pila, situado a la entrada de alimentación a la planta
- ❖ pH-metro digital situado a la salida del canal de desecho.
- ❖ Pila EDR.
- ❖ Cuadro de control y maniobra. Consta de los siguientes elementos:
 - Interruptor de puesta en marcha de la bomba de alimentación.
 - Interruptor de puesta en marcha de la bomba de recirculación.
 - Interruptor que conmuta el funcionamiento manual o automático del sistema eléctrico de la planta.
 - Interruptor para cambio de polaridad cuando se opera la planta en funcionamiento manual.
 - Controles de accionamiento manual de la primera válvula motorizada.
 - Controles de accionamiento manual de la segunda válvula motorizada.
 - Potenciómetro que permite fijar el voltaje aplicado a la primera etapa eléctrica de la pila.
 - Pantalla de visualización de la intensidad por etapa eléctrica de la pila.
 - Pantalla de visualización del voltaje seleccionado por etapa eléctrica de la pila.
 - Potenciómetro que permite fijar el voltaje aplicado a las etapas eléctricas de la pila.
 - Temporizador electrónico que permite la selección de los tiempos de inversión de polaridad cuando se opera en modo automático.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- Interruptor de inicio de los ciclos de inversión de polaridad de la pila cuando se opera en modo automático.
- Interruptor de parada de los ciclos de inversión de polaridad de la pila cuando se opera en modo automático.
- Señal visual (luz roja) indicativa de la falta de agua en los depósitos de alimentación. Actúa tanto en modo de funcionamiento manual como automático. Si se activa, se produce la desconexión de la bomba de alimentación.

El cuadro de control y maniobra permite la lectura, para cada etapa eléctrica de la pila, de la intensidad y el voltaje. En él se encuentra un potenciómetro para cada etapa eléctrica, que posibilitan la selección del voltaje aplicado a cada una de ellas. El cuadro de control y maniobra permite el control sincronizado de las electroválvulas de entrada de alimentación a la pila y de las válvulas motorizadas de salida de producto y desecho de la misma, así como, el control de los tiempos de inversión de polaridad. También contiene las conexiones para la toma de datos informatizada de los voltajes e intensidades para cada etapa eléctrica, de la presión de entrada de alimentación a la pila y del pH de recirculación de desecho.

- ❖ Conductivímetro: para determinación manual, mediante estudio de muestras, de las conductividades del agua de alimentación, producto y desecho.
- ❖ Sistema de adquisición de datos. Consta de los siguientes elementos:
 - Cuatro acondicionadores de señal, destinados a traducir una variable eléctrica en una señal eléctrica proporcional, aislada galvánicamente de la entrada, y enviaría al medidor o controlador.
 - Un módulo de adquisición de señales analógicas y digitales. Este módulo puede funcionar de forma autónoma o supervisada desde un ordenador. Dispone de entradas analógicas configurables, de termopares provenientes de convertidores. Además, dispone de entradas digitales para capturar datos lógicos (pulsadores de reconocimiento de alarmas, contactos, detectores de proximidad, etc.) y de salidas digitales, pudiendo ser utilizadas como salidas de alarmas de las entradas analógicas, o gobernadas por medio de mando remoto por comunicación con la unidad central. Dispone de frontal extraíble con display y teclado para monitorizar las medidas. Se comunica con el ordenador de control.
 - Sistema informático. Ordenador con software para gestión de datos y medidas. Gestiona alarmas, históricos, registradores gráficos y sinópticos. Esta organizado por menús y cada una de sus ventanas posee un tipo de utilidad y/o visualiza la información de forma diferente.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

❖ Sistema de análisis de agua: se efectuó mediante electroforesis capilar, empleando un equipo que incluye el analizador iónico, el ordenador y la impresora, mientras que un detalle del compartimento del analizador iónico aparece en la Figura.

Inciso: La electroforesis es una técnica para la separación de moléculas según la movilidad de estas en un campo eléctrico. La separación puede realizarse sobre la superficie hidratada de un soporte sólido, o bien a través de una matriz porosa (electroforesis en gel), o bien en disolución (electroforesis libre). Dependiendo de la técnica que se use, la separación obedece en distinta medida a la carga eléctrica de las moléculas y a su masa.

Antes de iniciar el proceso de alimentación a la pila, ésta debe estar húmeda con el fin de que membranas y separadores se compacten, para evitar pérdidas de agua por los laterales de la misma cuando esté en funcionamiento. También se tiene que realizar la medida de la conductividad del agua de alimentación con el conductivímetro.

La bomba de alimentación se pone en marcha mediante el interruptor correspondiente situado en el cuadro de control y maniobra. La alimentación se inicia aumentando gradualmente la presión hasta el valor de trabajo. La presión de alimentación se mantiene en éste valor hasta la total desaireación de todas las tuberías exteriores y conductos interiores de la pila, así como, de los compartimentos de lavado de electrodo.

Esta operación se lleva a cabo por un tubo de desaireación colocado en la parte superior de la instalación. Durante la operación de desaireación de la planta no se aplica ningún voltaje a la pila y las corrientes de salida de la pila están conectadas al tanque de mezclado, del cual se vuelve a elevar el agua a los depósitos de alimentación. La duración de éste proceso es de unos 15 minutos aproximadamente. Transcurrido éste tiempo se baja la presión de alimentación, poco a poco, hasta el valor deseado, esperando unos 5 minutos a la estabilización del caudal de alimentación. En éste instante se produce el encendido del sistema de adquisición de datos, mediante la conexión del ordenador con el software de control, produciéndose la toma de datos en intervalos de 30 segundos. Llegados a éste punto se puede operar de tres modos diferentes que se detallan a continuación, de acuerdo con los procesos de trabajo que se persiguen.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Funcionamiento con inversión de polaridad

Cuando se trabaja con inversión de polaridad, hay que efectuar previamente la programación de los ciclos de inversión cada 15 minutos, con ayuda del temporizador situado en el cuadro de control y maniobra.

Las electroválvulas colocadas a la entrada de la pila permanecerán abiertas, para posibilitar la entrada de agua por los dos conductos de alimentación de la pila. Las válvulas motorizadas, situadas a la salida de la pila, se hallan sincronizadas en una posición tal que, canalizan la corriente de salida de producto y de desecho siempre por las mismas conducciones independientemente de la polaridad aplicada a la pila. Estas corrientes de producto y desecho se descargarán en sus respectivos depósitos, o bien, serán enviadas al tanque de mezclado para proceder a su elevación al depósito de alimentación.

En éste punto se conecta el programador temporal de inversiones, situado en el cuadro de control y maniobra, empezando a transcurrir el tiempo de los ciclos de inversión de polaridad. Simultáneamente a la conexión del programador de inversiones, se selecciona con ayuda de los potenciómetros, el voltaje que se ha de aplicar a las etapas eléctricas de la pila (el mismo para todas las etapas). Este voltaje se mantiene constante, al valor seleccionado, para todo el proceso de barrido de presiones, durante toda la experiencia.

Funcionamiento con inversión de polaridad y recirculación

Como ya se ha indicado la inversión de polaridad requiere efectuar previamente la programación de los ciclos de inversión cada 15 minutos . En cada ciclo de inversión de polaridad, de las electroválvulas situadas a la entrada de la pila y conectadas con uno de los canales de alimentación de la pila permanecerán abiertas, mientras que, de las otras que están conectadas con el otro canal, estarán algunas abiertas y otras cerradas. Con ésta disposición de las electroválvulas entra agua por los conductos de alimentación de la pila. Cuando se conecte la recirculación de desecho, ésta corriente entrará por el canal que contenga las electroválvulas abiertas, según el modo de inversión de polaridad en el que este la pila. Las válvulas motorizadas de salida se encuentran sincronizadas de la misma forma que en el caso anterior, descargándose la corriente de salida de producto y la de desecho en sus depósitos respectivos.

En ésta situación se procede a la conexión del programador temporal de inversiones, a la vez que se inicia de la aplicación del voltaje deseado (el mismo para todas las etapas eléctricas de la pila) con ayuda de los potenciómetros situados en el cuadro de control

3. MATERIALES Y MÉTODOS

y maniobra. Este voltaje permanece constante, al valor adecuado, para todo el proceso de barrido de presiones, durante toda la experiencia.

Cuando se haya recogido en el tanque de desecho la cantidad suficiente (transcurrida una hora aproximadamente), desde el cuadro de control y maniobra se conecta la bomba de recirculación de desecho y se regula su presión de entrada a la planta para obtener un caudal máximo (depende de la planta), que no se puede superar debido a las limitaciones de diseño de la pila.

Cuando hay inversión de polaridad (15 minutos) se toman muestras para la medida de conductividades, de producto y desecho, transcurridos de 3 a 5 minutos del cambio de polaridad. Cuando la inversión de polaridad no tiene lugar, el muestreo se efectúa cada 15 minutos, para cada voltaje de trabajo aplicado, empezando a contar el tiempo al cabo de 3 a 5 minutos de fijar el mismo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2. LA REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES REGENERADAS

En este apartado se expone todo lo que está incluido en el marco legislativo acerca de las aguas residuales (Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas elaborado por el Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino, 2010).

Primeramente, se va a indicar cómo un agua llega a ser agua regenerada desde que se capta del Dominio Público Hidráulico:

1. El agua es captada del Dominio Público Hidráulico.
2. Es llevada a una ETAP para potabilizarla y destinarla al consumo humano.
3. Una vez haya sido usada, este agua pasa a ser agua residual, la cual es conducida a una EDAR donde se le realiza un tratamiento para su posterior vertido al Dominio Público Hidráulico ó para otros usos especificados más adelante.
4. Si a esta agua residual, después de haber sido depurada en la EDAR, se lleva a una ERA, donde será sometida a un tratamiento terciario para su regeneración y su posterior uso al cual será destinado, obtendremos agua regenerada apta para ciertos usos.

En este apartado, se van a exponer todos los aspectos importantes relacionados con las aguas depuradas y regeneradas tales como los usos a los que se destina y los criterios de calidad que deben cumplir, entre otros.

3.2.1. El agua residual depurada

3.2.1.1. Usos y restricciones del agua depurada

Aguas depuradas son aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable.

1) Usos del agua depurada

- 1. Usos domiciliarios
 - Riego de jardines privados
 - Descarga de aparatos sanitarios
 - Sistemas de calefacción y refrigeración de aire domésticos
 - Lavado de vehículos
- 2. Usos y servicios urbanos

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- Riego de zonas verdes de acceso público (campos deportivos, campos de golf, parques públicos, etc.)
- Baldeo de calles
- Sistemas contra incendios
- Fuentes y láminas ornamentales
- 3. Cultivos de invernadero.
- 4. Riego de cultivos para consumo en crudo. Frutales regados por aspersión.
- 5. Riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne.
- 6. Riego de cultivos destinados a industrias conserveras y productos que no se consuman crudos. Riego de frutales excepto por aspersión.
- 7. Riego de cultivos industriales, viveros, forrajes ensilados, cereales y semillas oleaginosas.
- 8. Riego de bosques, industria maderera, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público.
- 9. Refrigeración industrial, excepto industria alimentaria.
- 10. Estanques, masas de agua y caudales circulantes, de uso recreativo en las que está permitido el contacto del público con el agua (excepto baño).
- 11. Estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, en los que está impedido el contacto del público con el agua.
- 12. Acuicultura (Biomasa vegetal o animal).
- 13. Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.
- 14. Recarga de acuíferos por inyección directa.

2) Restricciones de uso para el agua depurada

- Industria alimentaria
- Consumo humano
- Moluscos filtradores
- Instalaciones hospitalarias
- Láminas ornamentales
- Agua de baño
- Torres de refrigeración

3.2.1.2. Calidad del agua reutilizada

Las aguas reutilizadas son aguas que, habiendo sido utilizadas por quien las derivó, se han sometido al proceso o procesos de depuración establecidos en la correspondiente autorización de vertido y a los necesarios para alcanzar la calidad requerida para un nuevo uso privativo, en función de los usos a que se van a destinar antes de su devolución al dominio público hidráulico y al marítimo terrestre.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1.2.1. Criterios de calidad biológica

- 1. Huevos de nematodos intestinales: < 1 huevo/L para todos los usos excepto para refrigeración industrial en industrias no alimentarias (uso 9) y masas de agua sin contacto humano (uso 11)
- 2. Escherichia Coli:
 - 0 ufc/100 mL para uso domiciliario (1) y recarga directa de acuíferos (14)
 - < 200 ufc/100 mL para usos 2, 3, 4 y 10
 - < 1000 ufc/100 mL para usos 5, 6, 12 y 13
 - < 10000 ufc/100 mL para usos 7 y 9
 - Sin límite para 8(Riego de bosques) y 11(Estanques, masas de agua)

3.2.1.2.2. Criterios de calidad OMS

- Usos domiciliarios: Riego de jardines privados, descarga de aparatos sanitarios, sistemas de calefacción y refrigeración de aire domésticos, y lavado de vehículos.
 - Nematodos < 1 huevo/L
 - E.Coli 0 ufc/100 ml
 - Sólidos Suspensión < 10 mg/l
 - Turbidez < 2 NTU
- Cultivos de Invernadero.
 - Nematodos < 1 huevo/L
 - E.Coli 200 ufc/100 ml
 - Sólidos Suspensión < 20 mg/l
 - Turbidez < 5 NTU
 - *Legionella Pneumophila* 0 ufc/100 ml
- Riego de cultivos para consumo en crudo. Frutales regados por aspersión.
 - Nematodos < 1 huevo/L
 - E.Coli 200 ufc/100 ml
 - Sólidos Suspensión < 20 mg/l
 - Turbidez < 5 NTU

3.2.1.2.3. Criterios de calidad físico-química

- 1. Sólidos en suspensión:
 - < 10 mg/L para usos domiciliarios (1) y recarga directa de acuíferos (14)
 - < 20 mg/L para usos 2(servicios urbanos), 3 y 4 (Invernaderos, cultivos para consumo en crudo)
 - 35 mg/L para el resto de usos
- 2. Turbidez:
 - < 2 NTU para uso domiciliario (1) y recarga directa de acuíferos (14)
 - < 5 NTU para usos 2, 3 y 4
 - Sin límite para el resto de usos
- 3. Otros criterios de calidad

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- 0 ufc/100 mL de *Legionella Pneumophila* para cultivos de invernadero (3) y refrigeración industrial (9)
 - < 1 huevo/L de *Taenia Saginata* y *Solium* para riego de pastos para consumo de animales productores de leche o carne (5)
 - < 50 mg/L de nitrógeno total para recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno (13)
 - < 15 mg/L de nitrógeno total para recarga de acuíferos por inyección directa (14)
- 4. Concentraciones máximas de metales en las aguas residuales urbanas depuradas destinadas al riego agrícola.
 - • Cadmio: 0.05mg/l.
 - • Cromo:0.1mg/l
 - • Cobre:5.0mg/l
 - • Mercurio:0.1mg/l
 - • Níquel: 2.0mg/l
 - • Plomo: 0.5mg/l
 - • Zinc: 10.0mg/l
 - METODO DE ANALISIS: Absorción atómica
 - FRECUENCIA: Semestral

Se considerará que la calidad de las aguas es conforme con las condiciones requeridas si los análisis de las muestras en un mismo punto, durante un año, cumplen que:

- El 95% de las muestras no exceden del valor límite de los parámetros.
- El 5% de muestras que exceden del valor límite de los parámetros no sobrepasa en más del 50% dicho límite.

3.2.1.2.4. Cuestiones referentes a la calidad de las aguas depuradas

1) Vertidos de depuradoras a acequias o azarbes de riego

Cuando el agua depurada es vertida a un azarbe o acequia de riego que transporta aguas de otro origen se recomienda la instalación de un tratamiento de regeneración que regenere las aguas depuradas y así cumpla los requisitos de calidad exigidos en el RD de reutilización. No obstante, dicho uso no está sujeto a la aplicación del mismo.

2) Usos del agua depurada en EDARs

En las estaciones depuradoras en las que se empleen las aguas depuradas como aguas de proceso y servicios (limpieza o riego de jardines), se deberá instalar un tratamiento de regeneración. Esta acción contribuirá al aumento de la seguridad de los operarios que manipulan esta agua.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.2. El agua residual regenerada

Las aguas regeneradas son aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario, en este caso la EDR, que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

El sistema de reutilización de agua tiene como fin mejorar la calidad del efluente de aguas residuales de la depuradora para cumplir con los requisitos de calidad de las aguas regeneradas. Para ello, es preciso complementar los equipos de tratamiento previamente instalados con procesos de depuración avanzados que reduzcan la carga contaminante. El agua regenerada debe cumplir técnicamente con varios requisitos:

- 1. que satisfaga la calidad de agua para el uso que se le intenta dar.
- 2. que no deteriore o afecte los ambientes a los que llega.
- 3. que no cause problemas de salud a los seres que están en contacto con la actividad a la que se le destine.
- 4. que satisfaga el concepto de sostenibilidad.

Se realizan tratamientos terciarios de las aguas residuales para obtener efluentes de calidad. Esto se consigue mediante un conjunto de instalaciones o equipos necesarios para realizar los Procesos de tratamientos adicionales o complementarios que permiten adecuar las calidades de las aguas regeneradas a los usos a los que se destinan con la finalidad de reducir la contaminación en las aguas residuales depuradas de procedencia.



Figura 53. Líneas de tratamiento de las aguas. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.2.1. Condiciones de uso

1. Criterios medioambientales
2. Criterios de salubridad
3. Criterios de legislativos
4. Criterios de propiedad
5. Criterios económicos
6. Criterios legislativos

1) Criterios medioambientales

Desde el punto de vista ambiental, según la EPA, la reutilización de aguas residuales REGENERADAS ofrecen varios aspectos positivos como:

- Utilización más racional del recurso hídrico.
- Disminuye el desvío de agua dulce de los ecosistemas sensibles.
- Proporciona un mayor grado de depuración del agua finalmente excedente incorporada a los medios acuáticos.
- Disminuye las descargas contaminantes a masas de agua sensibles.
- Reducción de uso de abonos. Permite aprovechar los elementos nutritivos contenidos en el agua depurada para usos agrícolas.
- Permite la utilización del agua para la creación o mantenimiento de hábitat en humedales y ríos.
- Recuperación cuantitativa y cualitativa de los acuíferos.
- El riego, en zonas de escasos recursos hídricos, favorece la recuperación de tierras desérticas.
- Permite mayor fiabilidad en su disponibilidad frente a recursos no tan estables, como puede ser el transvase

2) Criterios sanitarios

- La depuración de las aguas residuales urbanas, mediante adecuados tratamientos, permite reducir la presencia de agentes microbiológicos patógenos y de sustancias químicas nocivas. Ahora bien esta reducción, que no eliminación, ocasiona una situación de riesgo en caso de nueva utilización del agua, tanto para la población en general, como para los trabajadores expuestos en particular.

- En general los riesgos sanitarios que la reutilización de aguas residuales puede ocasionar, requiere la aplicación de medidas para proteger la salud pública que pueden agruparse en cuatro categorías principales:

- Procesos de tratamiento de depuración de las aguas residuales.
- Restricción del cultivo o zona a regar.
- Método de aplicación del agua residual depurada.
- Grado de la exposición humana.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los principales problemas a resolver es el de la desinfección. En la tabla 11 se resume los aspectos más significativos en la desinfección de aguas residuales:

Método	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Agentes químicos:		
Cloro	Barato, fácil de aplicar, mantiene la actividad (cloro activo)	Genera subproductos altamente tóxicos
Ozono	Muy eficaz, sobre todo para bacterias	Caro, debe generarse "in situ", reacciona fácilmente con las sustancias presentes
Agentes físicos:		
Radiación UV	Barato, fácil de aplicar	Ausencia de sólidos en suspensión, reactivación de microorganismos
Medios mecánicos:		
Membranas	Eliminación total de microorganismos, eliminación de otros contaminantes	Técnicas en desarrollo, ensuciamiento de membranas

Tabla 11. Aspectos más significativos de la desinfección de aguas residuales. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3) Criterios legislativos MARM

- Tratado de Regulación de Aguas Residuales:
 - art. 109.1 del TRLA.- Condiciones básicas para la reutilización de las aguas
 - art. 109.2 del TRLA.- Requerimiento de concesión o autorización administrativa para la reutilización de las aguas.
- Reglamentación Dominio Público Hidráulico
 - art. 272 del RDPH: informe de las autoridades sanitarias, que tendrá carácter vinculante.
 - art. 273 del RDPH: trámites para la concesión de reutilización.
- Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Informe sanitario vinculante

Previo a la concesión de reutilización de aguas residuales depuradas por el organismo de cuenca correspondiente es preceptivo un informe sanitario vinculante. Para la emisión de dicho informe se tiene en cuenta, lo siguiente:

- 1.- Tipo y características de la EDAR.
- 2.- Olor y color del efluente a la salida de la EDAR.
- 3.- Tratamientos posteriores de las aguas residuales una vez haya salido de la EDAR, antes de la reutilización.
- 4.- Origen de las aguas residuales: urbanos e industriales (tipo de industrias).
- 5.- Tipo de reutilización: riego agrícola y recreativa (campos de golf, parques y jardines), otras.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- 6.- En el caso de reutilización para riego agrícola, se tendrá en cuenta el tipo de cultivo (hortalizas de consumo en fresco, industriales y forrajeras, árboles frutales, etc).
- 7.- El sistema de riego empleado (goteo, manta, surco, aspersión).
- 8.- Punto de muestreo y parámetros analíticos determinados en el agua residual, que son:
 - Nematodos intestinales patógenos.
 - Coliformes fecales totales.
 - Demanda Química de Oxígeno
 - Demanda Bioquímica de Oxígeno
 - Sólidos en Suspensión
 - Determinación metales pesados y sustancias peligrosas, en su caso.
 - Otros parámetros pertinentes en función de los posibles riesgos.
- 9.- Medidas de prevención de riesgos de los trabajadores y usuarios de las aguas residuales depuradas.
- 10.- Tipo de autocontrol propuesto por los solicitantes de la reutilización.

4) Criterios de propiedad

Primero vamos a definir algunos conceptos relacionados con la autorización o concesión de reutilización de aguas.

Usuario de agua regenerada: persona física o jurídica o entidad pública o privada que utiliza el agua regenerada para el uso previsto.

Titular de la Autorización de vertido: persona física o jurídica o entidad pública o privada que es el titular de la autorización de vertido de aguas depuradas.

Primer usuario: persona física o jurídica que ostenta la concesión para la primera utilización de las aguas derivadas.

Tercer usuario: persona física o jurídica que presenta la solicitud de concesión para reutilización y que no ostenta la condición de concesionario para la primera utilización, ni la de titular de la autorización de vertido de las aguas residuales.

Procedimiento para la autorización o concesión de reutilización de aguas:

Como señala el RD de reutilización, el procedimiento para obtener la concesión de reutilización sigue la tramitación ordinaria de cualquier concesión de aguas públicas. Es preciso que este procedimiento esté acompañado de un informe vinculante de la autoridad sanitaria. Los procedimientos para obtener una concesión son 3 en función de quién sea el solicitante:

3. MATERIALES Y MÉTODOS

1) El solicitante es primer usuario de la concesión de agua

El artículo 8 contempla el caso de quien es ya concesionario de la primera utilización y solicita concesión de reutilización, sin competencia de proyectos. Es conveniente subrayar que en el caso de uso agrícola es necesario acreditar la titularidad de las tierras a regar.

2) El solicitante es titular de autorización de vertido

El artículo 9 está dedicado a peticiones formuladas por quien es titular de una autorización de vertido, en cuyo caso solo se precisa una modificación de autorización de vertido. Como ocurre en el caso anterior, el peticionario deberá presentar el modelo de solicitud incluido en el Anexo II del RD y acreditar la titularidad de las tierras a regar, en caso de que sea necesario.

3) El solicitante es un tercero que no es concesionario de la primera utilización ni titular de la autorización de vertido

Finalmente, en el artículo 10 del RD de reutilización se recoge el caso de quien no es ni concesionario de la primera utilización ni titular de la autorización de vertido, remitiéndose al procedimiento general de tramitación de concesiones establecido en el RDPH. Este procedimiento implica, por tanto, presentar el proyecto de reutilización de aguas cuyo resumen se recogerá en la solicitud según el modelo normalizado del Anexo II del RD de reutilización. En este caso se incluyen todos aquellos generadores de aguas residuales que reciben su agua de la red municipal, en cuanto que no son titulares de concesión administrativa y, por tanto, no pueden acogerse a la vía excepcional de tramitación sin competencia que establece el artículo 8. Junto a la solicitud, cuyo modelo normalizado se recoge en el Anexo II del RD de reutilización, el peticionario deberá presentar un proyecto de reutilización de aguas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

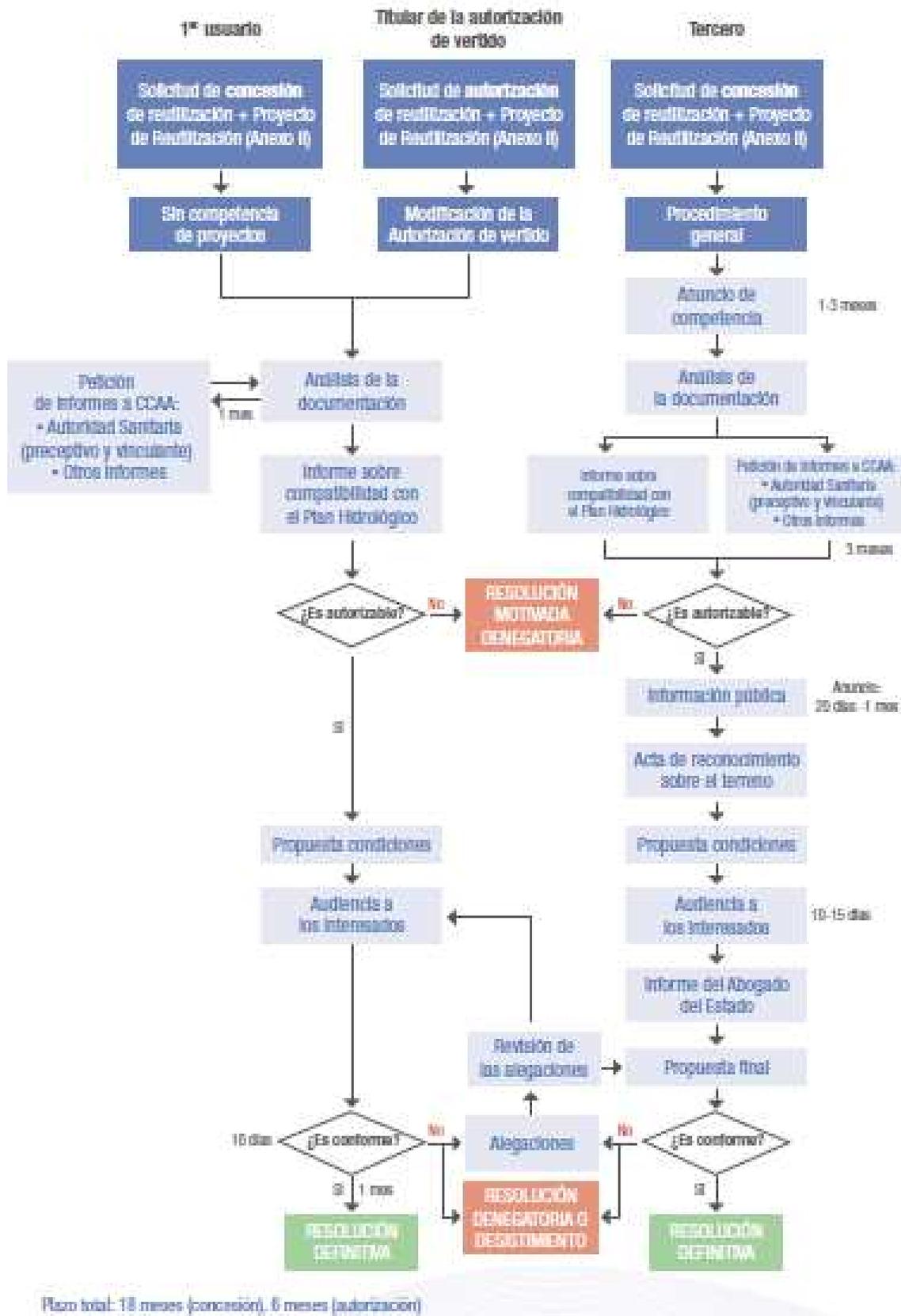


Figura 54. Flujograma de la concesión de la autorización de vertido de aguas residuales. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Usos contemplados en el RD de reutilización, en la OMS y en la USEPA

ESPAÑA Real Decreto 1620/2007 por el que se regula el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Diciembre 2007)	OMS WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater (2006)	USEPA Guidelines for Water Reuse (2004)
Existen 13 usos separados en 5 grupos: URBANOS AGRÍCOLAS INDUSTRIALES RECREATIVOS AMBIENTALES	USOS AGRÍCOLAS: Riego sin restricciones Riego con restricciones Riego localizado	Existen 6 grupos de usos: URBANOS AGRÍCOLAS INDUSTRIALES AMBIENTALES-RECREATIVOS RECARGA DE ACUÍFEROS AUMENTO DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE.

Tabla 12. Usos contemplados de reutilización. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3.2.2.2. Normas de uso del agua regenerada

Los usuarios de agua regenerada, ya sean operarios de las empresas gestoras de aguas regeneradas o usuarios finales de las mismas, deben respetar una serie de normas que aseguren que se está realizando un uso adecuado de la misma con total garantía para la salud pública. Por este motivo las autoridades sanitarias dedican especial atención a las normas de utilización del agua regenerada, tales como las relativas a la seguridad del público o a la propia seguridad de los usuarios.

En este sentido, las empresas y entidades gestoras está obligadas a implantar un Plan de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales) que deberán incluir, entre otros aspectos, las responsabilidades, las funciones, las prácticas, los procedimientos, los procesos y los recursos necesarios para realizar la acción de prevención de riesgo, en los términos que reglamentariamente se establezcan. Así pues, cualquier entidad o empresa que utilice aguas regeneradas deberá garantizar dichas normas.

Se proponen a continuación una serie de recomendaciones y normas de seguridad relativas al uso del agua regenerada encaminadas a proteger al público potencialmente expuesto a la misma. Estas normas deberán ser incluidas en los planes de prevención de riesgos laborales.

3.2.2.2.A) Riego urbano, agrícola y de campos de golf

Las normas de este apartado se refieren al riego de cualquier extensión, es decir, riego agrícola, urbano, incluso de los campos de golf.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los sistemas de riego localizado son los más adecuados para utilizar agua regenerada. Es oportuna la utilización de elementos de riego que disminuyan las pérdidas por evaporación, escorrentía e infiltración (por ejemplo: reguladores de presión, goteros autocompensantes, válvulas antidrenaje, sensores de lluvia, etc.).

Debe minimizarse el riesgo de encharcamiento, además hay que asegurar que la escorrentía superficial queda confinada en el propio terreno. Esto puede conseguirse con la automatización de los sistemas de riego.

En cualquier zona frecuentada por el público, los puntos de suministro de agua regenerada estarán dotados de dispositivos de cierre que eviten el libre acceso del público a la misma.

Si existen estanques, masas de agua y caudales circulantes ornamentales, además de cumplir con los requisitos de calidad previstos las prescripciones técnicas para la red de transporte del RD 1620/2007, la instalación deberá estar adecuadamente señalizada de modo que quede clara la prohibición de acceso al público y el uso de agua regenerada.

Si el riego es de zonas urbanas, los responsables del mantenimiento de las zonas verdes disponen de documentación actualizada de planos y especificaciones de las distintas tuberías existentes en la zona de utilización que facilitan una rápida localización de éstas en caso de averías, mantenimiento, etc.

Si el riego es agrícola y para usos de calidad 2.1 ó 2.2 del Anexo 1.A, el riego se debe interrumpir dos semanas antes de la recolección de la cosecha. En el caso de árboles frutales la fruta no debe ser recogida del suelo. En cualquier caso deben extremarse las medidas de higiene en la recolección y en el manejo de los productos en destino.

A.1) Riego por aspersión

Si el sistema de riego empleado es por aspersión existe posibilidad de aerosolización. En este caso deben cumplirse las siguientes exigencias para evitar o minimizar el contacto de las personas con el agua. El riego debe hacerse preferentemente de noche o cuando las instalaciones estén cerradas al público.

Además, debe programarse de modo que las plantas dispongan del tiempo suficiente para secarse antes de que los usuarios tengan acceso a la zona regada. Se deben utilizar aspersores de tipo emergente bajo el efecto de la presión que permanecen tapados a nivel del suelo cuando están fuera de servicio. Las fuentes de agua potable

3. MATERIALES Y MÉTODOS

deben estar protegidas de los aerosoles de agua regenerada que puedan caer directamente o por acción del viento.

Los aerosoles generados por los aspersores no deben alcanzar de forma permanente a los trabajadores, vías de comunicación asfaltadas o áreas habitadas, estableciendo si es preciso, obstáculos o pantallas que limiten la propagación. Los aspersores a utilizar deben ser de corto alcance o baja presión.

Finalmente, se deben respetar las siguientes distancias de seguridad respecto a núcleos habitados y áreas accesibles al público:

RIESGO DE AEROSOLIZACIÓN	Distancia a áreas accesibles al público		Distancia a núcleos habitados
	30 m	No accesible	
Usos	30 m	No accesible	150 m
Uso urbano de calidad 1.1 a): riego de jardines privados.	✓		✓
Uso urbano de calidad 1.2. a): riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares).	✓		✓
Uso urbano de calidad 2.1. a): riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	✓		✓
Uso recreativo de calidad 4.1. a): riego de campos de golf.	✓		✓
Uso agrícola de calidad 2.2.a): riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior.		✓	✓
Uso agrícola de calidad 2.3.		✓	✓

Tabla 13. Distancias de seguridad respecto a núcleos habitados y áreas accesibles al público. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3.2.2.2.B) Otros usos urbanos

B.1) Baldeo

El baldeo se debe realizar de noche.

B.2.) Descarga de aparatos sanitarios

Los inodoros deben ser descargados periódicamente con algún desinfectante para evitar la formación de una biocapa. En algunos casos, puede ser necesario incluso mantener una cantidad de desinfectante residual. En el caso de que existan elementos metálicos en la instalación habrá que usar inhibidores de la corrosión.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

B.3.) Lavado industrial de vehículos

En el funcionamiento de estas instalaciones hay que tomar todas las medidas que eviten la proliferación de los microorganismos en el agua regenerada. Para ello, hay que evitar prolongados periodos de paro de la instalación de lavado que facilitan el estancamiento del agua. Asimismo, los depósitos de almacenamiento de agua regenerada no deben estar sobredimensionados y no conviene que estén en lugares donde el agua alcance temperaturas elevadas que favorezcan el desarrollo de microorganismos. Por el contrario, si existe un sistema de elevación de la temperatura que permite que el agua supere los 60°C, se minimiza el riesgo de *Legionella* en el circuito.

3.2.2.2.C) Usos industriales

El uso más extendido en la reutilización de uso industrial es el suministro para torres de refrigeración y condensadores evaporativos. Este uso del agua regenerada es exclusivamente industrial y se debe llevar a cabo en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.

Es posible que el agua regenerada contenga mayor cantidad de nutrientes, fosfato y nitrógeno, de los que son habituales en las aguas naturales. Por ello, es preciso estudiar el tratamiento óptimo que pueda asegurar la desinfección. Asimismo debe analizarse en aras de evitar corrosiones, incrustaciones, etc. En esta línea, atendiendo al origen del agua, conviene controlar los sólidos en suspensión.

Es importante controlar la biocapa mediante biodispersantes que limiten la adherencia de las bacterias sésiles a las paredes interiores de la instalación. Conviene potenciar las revisiones en los puntos donde la formación de la biocapa sea más favorable.

3.2.2.2.D) Usos ambientales

En la recarga de acuíferos se recomienda que el tiempo de retención del agua de recarga en la capa freática sea de un año antes de ser extraída.

La calidad del agua subterránea debe ser regularmente supervisada.

Por otra parte, en los lugares de uso habrá que prevenir que el agua regenerada se aplique a una distancia de seguridad adecuada para no afectar a pozos de suministro de agua potable, tal y como se refleja en la siguiente tabla:

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Usos	Distancias de seguridad a pozos de agua potable		
	15 m	90 m	150 m
Calidad 1.1.a) Riego de jardines privados	✓		
Calidad 1.1.b) Descarga de aparatos sanitarios	✓		
Calidad 1.2.a) Riego de zonas verdes urbanas (parques, campos deportivos y similares).		✓	
Calidad 1.2.b) Baldeo de calles.		✓	
Calidad 1.2.c) Sistemas contra incendios.		✓	
Calidad 1.2.d) Lavado industrial de vehículos.		✓	
Calidad 2.2.a) Riego de productos para consumo humano con sistema de aplicación de agua que no evita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles, pero el consumo no es en fresco sino con un tratamiento industrial posterior			✓
Calidad 2.3. Riego cultivos leñosos, viveros y cultivos industriales no alimentarios			✓
Calidad 4.1.a) Riego de campos de golf		✓	
Calidad 4.2.a) Estanques y masas de agua no accesibles al público (si el fondo del estanque no está sellado)			✓

Tabla 14. Distancia de seguridad adecuada para no afectar a pozos de suministro de agua potable.

Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3.2.2.2.E) Normas de seguridad para trabajadores y usuarios

En principio, los trabajadores de los sistemas de reutilización de aguas deberán cumplir las mismas normas de seguridad y prevención de riesgos laborales previstas para los operarios de las estaciones de tratamiento de las aguas residuales. El usuario del agua regenerada debe velar para que se cumpla la normativa vigente en materia de seguridad y prevención de riesgos laborales en el lugar de uso del agua regenerada.

Los empleados deben estar instruidos en el adecuado manejo de este recurso, haciendo hincapié en las condiciones higiénicas a mantener tanto durante la realización del servicio como a la finalización del mismo. Se debe vigilar para que se eviten ciertos vicios que pueden desarrollarse en este ámbito laboral. Por ejemplo, debe prohibirse circular con los pies descalzos durante el riego, baldeo, limpieza, etc. Los empleados deben cambiarse las ropas de trabajo y lavarse detenidamente antes de abandonar la zona de utilización. Debe prohibirse que se lave la ropa de protección con agua regenerada. Los operarios deben disponer de los Equipos de Protección Individual adecuados (EPIs), como guantes, ropa y calzado específico. Para la selección y utilización del material de protección se seguirá lo especificado en la norma UNE-EN

3. MATERIALES Y MÉTODOS

340 (relativa a los requisitos generales para la ropa de protección). Entre otros temas se recuerda que es preciso cumplir con los requerimientos de revisión médica anual y mantener el protocolo de vacunación adecuado.

3.2.2.3. Reutilización del agua

a) Uso en la industria

1) Una estación de aguas regeneradas suministra agua a una industria

En la siguiente figura se puede observar el esquema de este uso:

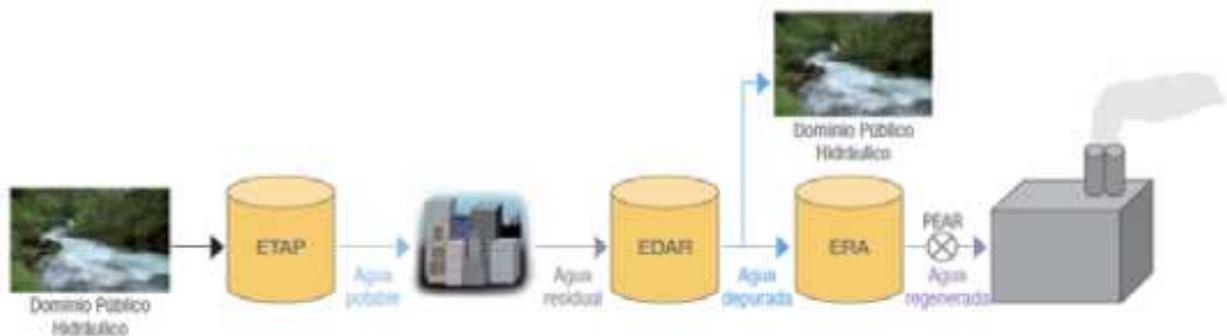


Figura 55. Estación de aguas regeneradas que suministra agua a una industria. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

El punto de entrega de las aguas regeneradas se representa como PEAR. En este caso, el agua suministrada debe cumplir con el RD de reutilización y la calidad exigible es la señalada en el Anexo I.A.3 (usos industriales).

2) Reciclaje de aguas en la industria

Se entiende por agua reciclada al agua utilizada más de una vez en el mismo lugar antes de ser vertida al ciclo hídrico.

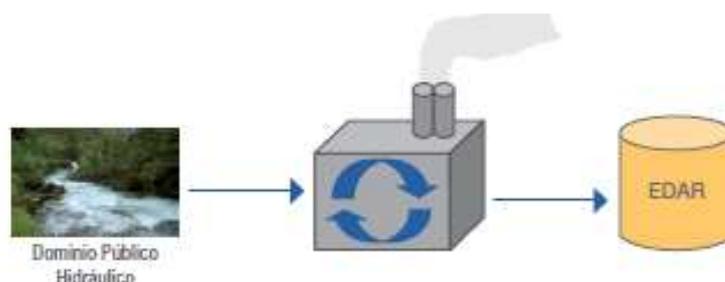


Figura 56. Reciclaje de aguas en la industria. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se puede observar, el agua se recicla dentro del mismo proceso. No se trata de un vertido de aguas depuradas ni están sometidas a la autorización de vertido, por lo tanto, su uso no se regula en el RD de reutilización.

3) *Uso del agua industrial regenerada*

La industria pretende reutilizar las aguas depuradas procedentes de su propia depuradora, por ejemplo, para el riego de sus jardines.

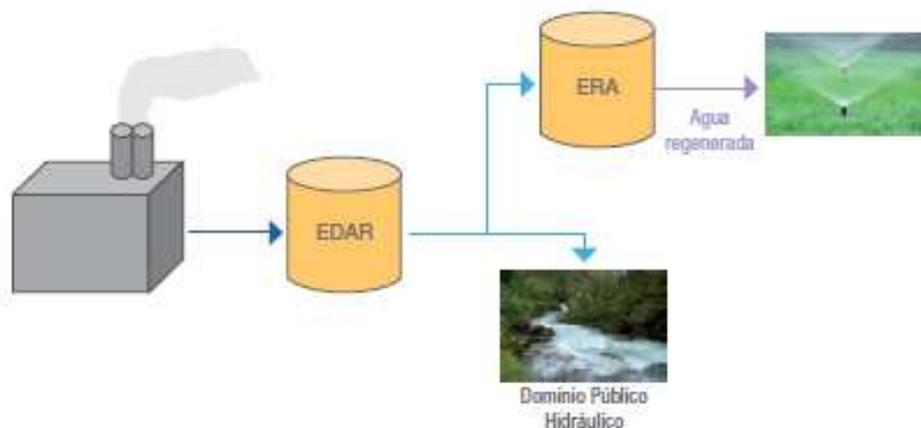


Figura 57. Uso del agua industrial regenerada. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

En este caso el agua regenerada debe cumplir los requerimientos del RD de reutilización.

b) En agricultura

1) *Retornos de riego*

Se entiende por retornos de riego al agua empleada para riego que no es consumida, evaporada ni percolada a un acuífero subterráneo, y se integra nuevamente al ciclo hídrico tanto en su parte superficial como subterránea. Los retornos de riego no son vertidos de aguas residuales que deban tratarse en una estación depuradora o que estén sometidas a una autorización de vertido, por lo tanto, su utilización queda fuera del ámbito de aplicación del RD de reutilización.

2) *Reutilización de aguas residuales no depuradas para riego*

En este caso el origen del agua reutilizada para riego no es agua depurada, por lo que en primer lugar se deberá aplicar la normativa vigente relativa a la depuración de aguas residuales, para después regular la reutilización de las aguas regeneradas mediante el RD de reutilización.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.2.4. Evaluación de calidad de las aguas regeneradas

Con el fin de comprobar que el tratamiento de regeneración cumple con los objetivos de calidad exigidos por el RD de reutilización, el titular llevará a cabo el programa de control analítico o Autocontrol. Dicho programa consiste en la realización de una serie de mediciones de los distintos parámetros, con las frecuencias establecidas para cada uno de ellos y en cada uno de los puntos de control. Los puntos de control establecidos por el RD de reutilización se sitúan en la salida de la estación regeneradora y en cada uno de los puntos de entrega al usuario. De esta forma se comprueba que el efluente regenerado no ha sufrido ningún cambio durante su distribución respecto a la calidad inicial. La realización del control en la salida de la estación regeneradora y en los puntos de entrega al usuario permite identificar si un incumplimiento de la calidad del agua se debe al tratamiento de regeneración o bien ha sido generado durante la distribución del agua. De esta forma se pueden determinar las medidas más adecuadas para solucionarlo.

El diagnóstico de conformidad de la calidad de las aguas regeneradas se obtiene a partir de los datos del autocontrol de un trimestre o fracción, si el periodo de explotación es inferior. El sistema de explotación es conforme si cumple simultáneamente que:

- 1. El 90% de las muestras tiene resultados inferiores a los Valores Máximos Admisibles (VMA) en todos los parámetros especificados en el Anexo I.A.
- 2. Las muestras que superan el VMA del Anexo I.A. no sobrepasan los límites de desviación máxima (LDM) establecidos en el Anexo I.C.
- 3. Se respetan las Normas de Calidad Ambiental (NCA) para las sustancias peligrosas en el punto de entrega de las aguas regeneradas según la legislación propia de aplicación.

Los límites de desviación máxima a los que se refiere el punto 2 son las diferencias entre los valores medidos y los VMA. Estos límites se fijan en el Anexo I.C. del RD de reutilización y cuyos valores resultantes son los siguientes:

3. MATERIALES Y MÉTODOS

PARÁMETRO	VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES	LÍMITE DE DESVIACIÓN MÁXIMA
Nematodos intestinales (huevo/10 L)	1	2
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	0	10
	100	1.000
	200	2.000
	1.000	10.000
	10.000	100.000
<i>Legionella spp.</i> (UFC/L)	100	1.000
<i>Taenia saginata</i> (huevo/L)	1	2
<i>Taenia solium</i> (huevo/L)	1	2
Sólidos en suspensión (mg/L)	5	7,5
	10	15
	20	30
	35	52,5
Turbidez (UNT)	1	2
	2	4
	10	20
	15	30
Nitratos (mg NO ₃ /L)	25	38
Nitrógeno Total (mg N/L)	10	15
Fósforo Total (mg P/L)	2	3

Tabla 15. Valores Máximos Admisibles y Límites de Desviación Máxima de los parámetros a controlar para cumplir la calidad mínima. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3.2.2.4.A. Frecuencias mínimas de muestreo

Las frecuencias mínimas de análisis de cada uno de los parámetros y su posible modificación, según el uso al que se destine (los usos están en el anexo 1A del apartado Anexos) el agua regenerada, se detallan a continuación:

1) *Nematodos intestinales*

Se establece una frecuencia quincenal en la mayoría de usos, excepto para el uso industrial 3.2 y el uso ambiental 5.2 que es semanal. Para el uso industrial 3.1, el uso

3. MATERIALES Y MÉTODOS

recreativo 4.2, y los usos ambientales 5.1, 5.3 y 5.4, no se establece frecuencia de muestreo porque no se fija el límite del parámetro.

2) *Escherichia coli*

Se establece una frecuencia semanal en la mayoría de usos excepto para los usos urbanos 1.1 y 1.2, el uso recreativo 4.1 y el uso ambiental 5.1 cuya frecuencia es dos veces por semana; y para el uso industrial 3.2 y uso ambiental 5.2 que es tres veces por semana. Para el uso ambiental 5.3 no se establece frecuencia de análisis porque no se fija el límite del parámetro.

3) *Sólidos en suspensión*

En el caso de los sólidos en suspensión, la frecuencia mínima de análisis es semanal excepto para el uso industrial 3.2 y el ambiental 5.2 que es diaria. Turbidez Para los usos urbanos 1.1 y 1.2, y el uso recreativo 4.1, la frecuencia mínima de análisis es dos veces por semana. Para el uso agrario 2.1 y el industrial 3.1 la frecuencia es semanal y para el uso industrial 3.2 y el ambiental 5.2, diaria. En el resto de usos al no tener fijado el límite del parámetro no se establece frecuencia de análisis.

4) *Nitrógeno Total y Fósforo Total*

Solamente se establece una frecuencia de análisis semanal para los usos ambientales 5.1 y 5.2, excepto para el uso recreativo 4.2 para el que la frecuencia es mensual. El resto de usos no tiene fijado el límite del parámetro, por tanto, no tiene establecida la frecuencia de análisis.

5) *Legionella spp., Taenia spp., Salmonella spp.*

La frecuencia mínima de análisis es mensual para los usos urbanos 1.1 y 1.2, el uso agrario 2.1 y el industrial 3.1, para el uso agrícola 2.2 es quincenal y para el uso ambiental 5.2 es semanal. Para el uso industrial 3.2 la frecuencia mínima de análisis será de 3 veces por semana y para el uso ambiental 5.4 igual a la frecuencia del uso más similar.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

6) Otros contaminantes

En el caso de otros contaminantes, será el organismo de cuenca el que valorará la frecuencia de análisis en función de la autorización de vertido y del tratamiento de regeneración.

3.2.2.4.B. Responsabilidades en cuanto al aseguramiento de la calidad

Los agentes que intervienen en un sistema de reutilización asumen respectivamente unas responsabilidades determinadas que se resumen a continuación:

- El titular de la autorización de vertido es responsable de la calidad del vertido y de su control hasta el punto de entrega de las aguas depuradas (PEAD).
- El titular de la concesión o autorización de reutilización de aguas es responsable de la calidad del agua regenerada y de su control desde el punto en que las aguas depuradas entran en el sistema de reutilización, es decir, el PEAD, hasta el punto de entrega de las aguas regeneradas (PEAR).
- El usuario del agua regenerada es responsable de evitar el deterioro de su calidad desde el punto de entrega del agua regenerada hasta los lugares de uso.

La calidad del efluente a la salida de la planta depuradora determina en gran manera la eficacia de la regeneración, por ello es importante que en el PEAD el agua cumpla con los requisitos de calidad previstos, en caso contrario deberá notificarse al responsable de la regeneración para que se tomen las medidas oportunas.

Con el fin de sistematizar esta comunicación puede ser interesante establecer protocolos de información. Puede ser también interesante disponer de medidores en continuo como el de turbidez que informen a tiempo real de la calidad del efluente, tanto al titular de la depuradora como de la regeneradora.

3.2.2.4.C. Inspección de los sistemas de reutilización por la administración hidráulica

El RD de reutilización establece que las responsabilidades del titular de la concesión o autorización de reutilización y del usuario se entienden *“sin perjuicio de la potestad de supervisión y control de las autoridades ambientales y sanitarias”*. Esto es, los organismos responsables de la inspección y vigilancia de la producción, distribución y uso de las aguas regeneradas corresponden al organismo de cuenca y a la autoridad sanitaria actuando cada uno en el ámbito de sus competencias. Las competencias de

3. MATERIALES Y MÉTODOS

los organismos de cuenca se fijan en el texto refundido de la Ley de Aguas y son responsables de inspeccionar y vigilar el cumplimiento de las condiciones fijadas en la autorización de vertido y en la autorización o concesión de reutilización. Es decir, es responsable del control de las aguas residuales hasta el punto de entrega de las aguas depuradas y de las aguas regeneradas hasta el punto de entrega de las mismas. En la labor de inspección, y con independencia de los controles impuestos en el condicionado de la concesión o autorización, el organismo de cuenca podrá efectuar cuantos análisis e inspecciones estime convenientes para comprobar las características del agua regenerada y el rendimiento del sistema de reutilización. Para la realización de estas tareas podrá contar con el apoyo de las entidades colaboradoras de la administración hidráulica.

A tal efecto, los titulares o responsables de las instalaciones objeto de vigilancia o inspección están obligados a facilitar el acceso a las mismas a la Administración, así como a prestar colaboración y facilitar la documentación necesaria a su requerimiento para el ejercicio de la labor de inspección.

Todos los resultados derivados del control de la calidad del agua regenerada realizado por el titular de la concesión o autorización, deberán estar recogidos en un sistema de registro que estará a disposición de la Autoridad o Administración competente. Así como las medidas ejecutadas ante incumplimientos de las muestras.

Cuando la Administración o la Entidad colaboradora, tome una muestra para su comprobación hará entrega de una muestra alícuota para su análisis contradictorio al representante o persona que se encuentre en las instalaciones y acredite su identidad. De no hacerse cargo de la muestra, se le comunicará que ésta se encuentra a su disposición en el lugar que se indique.

El resultado de las actividades de inspección quedará reflejado en un acta firmada por el funcionario de la Administración, de la que se dará copia al interesado y que gozará de presunción de veracidad y valor probatorio en cuanto a los hechos consignados en la misma. En el caso de que sean incumplidos tanto los condicionantes establecidos en la autorización de vertido como en la concesión y autorización de reutilización de aguas, el infractor será sancionado según lo contemplado en el Título VII del texto refundido de la Ley de Aguas.

Las autoridades sanitarias son responsables de inspeccionar y vigilar la calidad del agua desde el punto de entrega de las aguas regeneradas hasta el lugar de uso.

Las infracciones cometidas por el responsable del mantenimiento de la calidad desde el punto de entrega de las aguas regeneradas hasta el lugar de uso serán reguladas por

3. MATERIALES Y MÉTODOS

lo establecido en el capítulo VI De las Infracciones y las Sanciones de la Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad.

En la siguiente figura se resume la distribución de responsabilidades en la producción de agua regenerada así como la verificación y control en la producción y aplicación de la misma:

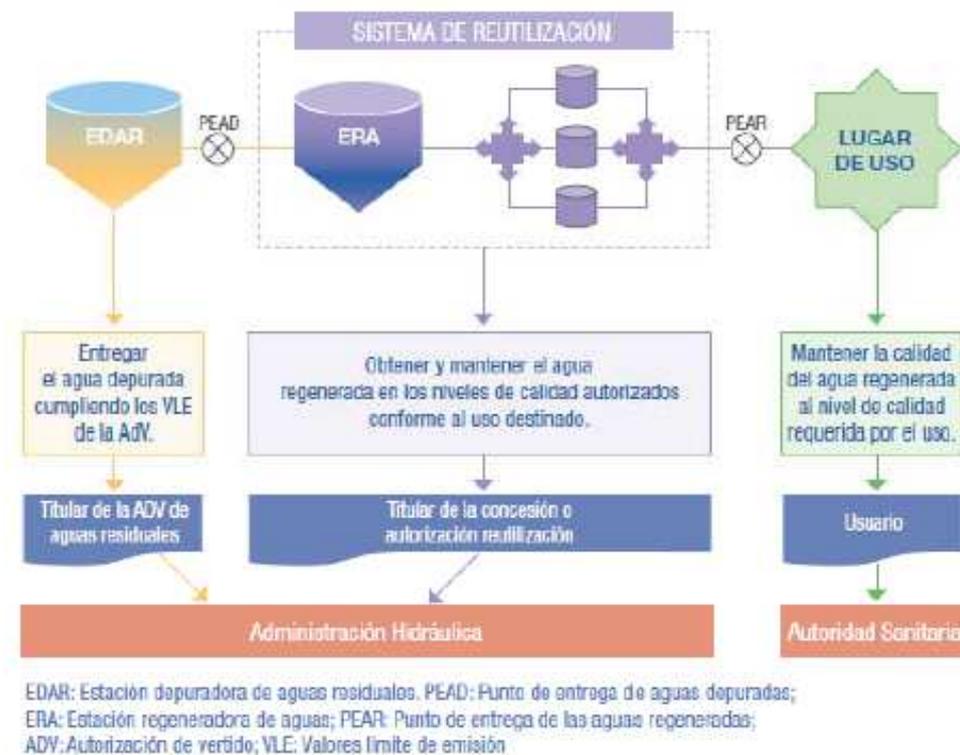


Figura 58. Distribución de responsabilidades en la producción de agua regenerada así como la verificación y control en la producción y aplicación de la misma. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3.2.2.4.D. Supuestos de modificación de la frecuencia

En el Anexo I.B del RD de reutilización (se recogen tres supuestos por los que se puede modificar la frecuencia de análisis, uno de ellos para reducirla y dos para aumentarla. Tras un año de control, si el titular presenta una solicitud motivada que justifique que su presencia en las aguas no es probable, el organismo de cuenca correspondiente puede reducir la frecuencia de análisis de un parámetro hasta un 50%. Tras un trimestre o fracción, en caso de períodos de explotación inferiores, si el número de muestras con concentración inferior al VMA del Anexo I.A. del RD de reutilización es inferior al 90% de las muestras, se duplicará la frecuencia de muestreo para el período siguiente. Si un control supera, al menos en uno de los parámetros, los rangos de desviación, se duplicará durante el resto de este período y el siguiente.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.2.4.E. Detección de patógenos

Para los usos agrícolas 2.1 y 2.2 y el uso industrial 3.1, el RD de reutilización obliga a realizar la detección de patógenos “Presencia/Ausencia”, tras obtener los resultados del muestreo a 3 clases. Como patógeno pone por ejemplo la *Salmonella*, dejando el campo abierto a cualquier otro tipo de microorganismo y, por tanto, a la realización de otras técnicas que se propongan. Según fuentes consultadas los patógenos pueden determinarse a través de los indicadores “*Colifagos*” y “*Clostridium perfringes*”. En el apartado de “Organismos indicadores” aparece una explicación detallada de estos indicadores (más adelante).

3.2.2.4.F. Métodos analíticos de muestreo

En el Anexo I.C. del RD de reutilización se proponen los métodos o técnicas analíticas de referencia a emplear para la determinación de los parámetros microbiológicos y contaminantes. Sin embargo, se podrán emplear métodos alternativos siempre que estén validados y den resultados comparables a los obtenidos por el de referencia. Para el análisis de contaminantes se deberán cumplir los valores de incertidumbre y límite de cuantificación especificados en dicho Anexo. En principio, para validar y demostrar la comparabilidad de métodos alternativos convendrá seguir las especificaciones contenidas en la Norma ISO 17994:2004-Calidad del agua – Criterios para establecer la equivalencia de dos métodos microbiológicos. Los métodos o técnicas analíticas de referencia de los parámetros microbiológicos son los siguientes:

PARÁMETRO	MÉTODOS O TÉCNICAS ANALÍTICAS DE REFERENCIA
Nematodos intestinales	Método Bailinger modificado por Bouhoum & Schwartzbrod. “Analysis of wastewater for use in agriculture” Ayres & Mara OMS (1996)
<i>Escherichia coli</i>	Recuento de Bacterias <i>Escherichia Coli</i> β - Glucuronidasa positiva
<i>Legionella spp.</i>	Norma ISO 11731 parte 1:1998 Calidad del Agua. Detección y enumeración de <i>Legionella</i> .
<i>Taenia saginata</i>	---
<i>Taenia solium</i>	---

Tabla 16. Técnicas de análisis de distintos parámetros. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3.2.2.4.G. Mecanismos de control automáticos

Complementando los análisis en el laboratorio que se han explicado en el apartado anterior, pueden instalarse sistemas automáticos de control en continuo de los procesos de regeneración. Estos equipos permiten prevenir en tiempo real el deterioro de la calidad del agua regenerada, así como del influente. Estos medidores suelen ser

3. MATERIALES Y MÉTODOS

equipos robustos y fiables y no excesivamente caros por lo que son eficaces y baratos. Normalmente, estos mecanismos de control están conectados a un dispositivo automático, como una electroválvula programada, de manera que este sistema puede mandar señales de cierre automático o hacer saltar una alarma en el caso de que se detectara una anomalía. Los parámetros que se miden pueden ser exactamente los que figuran en las condiciones del título de regeneración como la turbidez, o bien indicadores de calidad que proporcionan de modo indirecto información sobre los parámetros de control, o bien de la eficacia de la desinfección, como la materia orgánica, la transmitancia, etc.

1) Turbidez

La turbidez es un parámetro que debe regularse en el condicionado del título de reutilización. Los valores máximos admisibles oscilan entre 2 y 15 UNT según el uso del agua regenerada. Este parámetro refleja el contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, donde suelen alojarse los microorganismos. Una turbidez excesiva puede proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección aplicada en el tratamiento de regeneración, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de cloro a lo largo del sistema de distribución. Los efectos sanitarios de la turbidez en el agua regenerada justifican la implantación de un medidor en continuo o turbidímetro a la salida de la planta de regeneración. Asimismo, es muy útil disponer de un turbidímetro a la entrada de la estación regeneradora del agua con el fin de impedir que agua residual depurada con valores inadecuados –que luego no cumplirían con los criterios de suministro- puedan entrar en el tratamiento de regeneración. De esta manera, se protege el sistema de posibles perturbaciones del tratamiento biológico.

2) Carbono orgánico total (o disuelto)

El carbono orgánico total (TOC) no figura en el RD de reutilización pero es un indicador de la eficacia del tratamiento. Permite conocer la cantidad de materia orgánica presente en la muestra. Suele relacionarse con el contenido de materia de origen natural como los ácidos húmicos y fúlvicos, aunque otros compuestos orgánicos sintéticos puedan ser sensibles a este medidor. Por ello, el valor está relacionado con la Demanda Bioquímica de Oxígeno medida a los 5 días (DBO5) y es posible establecer correlaciones entre ambos parámetros específicos para cada planta de tratamiento. Los medidores comercializados se denominan analizadores de carbono orgánico total (Analizadores TOC) y funcionan a partir de técnicas espectroscópicas como absorción molecular, normalmente a 254 nm, o radiación infrarroja.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3) *Cloro residual*

El cloro residual (libre o combinado) asegura el mantenimiento de un nivel de desinfección adecuado en las infraestructuras de almacenamiento y distribución de las aguas regeneradas así como a la salida de la ERA. Por ello, es interesante disponer de medidores en continuo de este elemento. El medidor detecta, en el caso de que se produzcan, bajadas significativas del cloro residual, lo que permitiría tomar las medidas necesarias para impedir que el agua incumpla los criterios de calidad exigidos por el RD de reutilización. Existen distintos medidores del cloro residual que se basan generalmente en métodos amperométricos. También es posible emplear mediciones indirectas como el potencial REDOX.

4) *Transmitancia a 254 nm*

La transmitancia a una longitud de onda de 254 nm es una medida física relacionada con la absorción de la luz UV y, por tanto, de la eficacia de la desinfección. Las características del agua residual o regenerada que afectan a la transmitancia son la presencia de elementos inorgánicos (cobre, hierro, etc.), sustancias orgánicas (especialmente si contienen anillos bencénicos como los ácidos húmicos, colorantes orgánicos, etc.) y las partículas coloidales ($\leq 0,45 \mu\text{m}$). La experiencia en la explotación de una planta de regeneración permite determinar los valores de transmitancia propios del efluente generado en cada etapa de tratamiento y especialmente el valor deseable a la salida del proceso de desinfección.

3.2.2.4.F. Organismos indicadores

El tratamiento de regeneración debe alcanzar un grado de protección máximo para la salud pública, lo que se asegura con una desinfección de amplio espectro. El número posible de patógenos presentes es muy elevado y la caracterización de cada uno de ellos es compleja, costosa y requiere demasiado tiempo. Por ello, para valorar la calidad microbiológica de los efluentes y la eficacia de la desinfección suelen utilizarse indicadores o índices de organismos.

La OMS diferencia entre organismo indicador e índice de organismos. Un índice de organismos indica la existencia de patógenos en una muestra, mientras que un indicador se utiliza para medir la eficacia de un tratamiento por ejemplo de la desinfección. La medición de *E. coli* se considera el índice más adecuado para determinar la contaminación fecal, y es el parámetro que figura en el RD de reutilización. La Organización Mundial de la Salud, en "*Guidelines for drinking-water*

3. MATERIALES Y MÉTODOS

quality. 3rd Edition, Vol 1. Recommendations (WHO 2004)” señala que un buen indicador no puede ser nunca un organismo patógeno: debe estar presente en las heces de un número elevado de especies animales y en los hombres; no puede multiplicarse en aguas naturales, debe persistir de manera similar a los patógenos fecales y ser más numeroso; además frente al tratamiento del agua debe responder de modo similar a los patógenos fecales; finalmente debe detectarse de forma rápida y con un método barato.

Además de controlar los parámetros señalados en el RD de reutilización puede ser conveniente medir indicadores de la desinfección. Según las opiniones de distintos gestores de aguas regeneradas, son buenos indicadores de tratamiento los Colifagos y *Clostridium perfringes* que se han citado ya en el apartado anterior “Detección de patógenos”.

1) Colifagos

Los bacteriófagos son virus que requieren de las bacterias para replicarse. Por ello son indicadores de contaminación bacteriana, ya que son incapaces de reproducirse fuera del huésped bacteriano. Su presencia implica directamente que hay bacterias. Entre el grupo de bacteriófagos, destacan los colifagos por ser huésped de la bacteria *E. coli* y otras especies cercanas.

Dado que los colifagos se reproducen en el tracto intestinal de humanos y de animales de sangre caliente, su presencia señala la existencia de contaminación fecal que puede ser tanto bacteriana como de virus u otros patógenos. Según la OMS pueden utilizarse como índice de contaminación fecal.

Además, es un indicador de mala desinfección, aunque la ausencia de colifagos no asegura la ausencia de virus entéricos o protozoos parásitos. La determinación de los colifagos es sencilla y rápida (menos de 24h) además de barata. Por ello, puede ser interesante medirlos como indicadores de la buena desinfección.

2) *Clostridium perfringes*

La bacteria *Clostridium perfringes* es de morfología bacilar, Gram positivas, anaerobias estrictas, capaces de formar esporas y con actividad sulfito reductora. Por ser bacterias esporuladas son más resistentes a condiciones adversas que los coliformes fecales. De hecho resisten la luz UV y otros procesos de des-infección como la cloración. También son resistentes a condiciones extremas de pH y temperatura. Las esporas de *Clostridium perfringes* son indicadoras del proceso de filtración, la OMS recomienda

3. MATERIALES Y MÉTODOS

que se utilicen para validar este proceso más que para una medida de rutina. Su presencia refleja la existencia de contaminación fecal intermitente. Pueden utilizarse además como índice de virus entéricos y protozoos en aguas tratadas. Las esporas de *Clostridium perfringens* se determinan a través del recuento del número de colonias de esporas con capacidad sulfito-reductora, desarrolladas en un medio específico, incubadas en condiciones anaeróbicas durante un tiempo y a una temperatura determinada. Además este indicador ofrece la máxima protección frente a los oquistes infectivos de *Cryptosporidium spp.* y los enterovirus.

3.2.2.5. Medidas de gestión frente a incumplimientos

El RD de reutilización obliga a tomar una serie de medidas cuando se detectan anomalías en el sistema de reutilización. En este caso se pueden dar los siguientes supuestos:

- El agua regenerada no es conforme según los criterios primero y tercero del apartado 3.2.5.2 (tabla de los VMA y LDM).

1. Se suspende el suministro y se identifica el origen del incumplimiento.
2. Se reanuda el suministro, una vez tomadas las medidas oportunas para corregir la anomalía y confirmado que el problema se ha solucionado.

- Una muestra individual presenta unos valores fuera de los límites de desviación máxima (LDM).

1. Se repite el control a las 24 horas.
2. Se suspende el suministro si en este segundo control vuelve a detectarse el incumplimiento.
3. Se reanuda el suministro, una vez tomadas las medidas oportunas para corregir la anomalía y comprobado que en 4 controles en días sucesivos el valor obtenido se encuentran dentro de los LDM.
4. Se duplica la frecuencia de control del parámetro anómalo hasta que finalice el período en el que se ha detectado la anomalía (trimestre o fracción) y en todo el período siguiente.

3.2.2.6. Buenas Prácticas en la explotación de una planta de regeneración

En los puntos anteriores se han expuesto una serie de medidas y recomendaciones que permiten asegurar el cumplimiento del RD de reutilización y la protección de la salud pública en el marco de la reutilización. Por tanto, estas prácticas son, en

3. MATERIALES Y MÉTODOS

conjunto, una serie de buenas prácticas para la gestión de las plantas de reutilización. La demostración de que en la actividad de regeneración se están aplicando estas prácticas u otras semejantes puede ser motivo suficiente para que se justifique la reducción del programa de autocontrol obligado en el RD de reutilización. Todo ello sin perjuicio de la potestad de supervisión y control de las autoridades ambientales y sanitarias que tendrán siempre la decisión final.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se recogen a continuación las buenas prácticas para la gestión de una planta de regeneración:

- Disponer de una instalación debidamente diseñada de modo que los elementos existentes, filtros, depósitos, sistemas desinfectantes, etc., aseguren la calidad del agua regenerada. Cuando sea posible, deberá demostrarse mediante las acreditaciones correspondientes.
- Contar con protocolos de explotación específicos para el sistema de reutilización y, si es posible, que hayan sido validados.
- Instalar equipos de medición en continuo para el seguimiento de la calidad de los efluentes de las distintas fases de depuración y regeneración.
- Asegurar la desinfección del efluente mediante un buen sistema germicida por ejemplo, combinando luz UV y cloración.
- Controlar la desinfección a través de indicadores como los Colifagos o *Clostridium perfringes*.
- Realizar mediciones de los parámetros no sólo a la salida del tratamiento de regeneración y en los puntos de entrega del agua regenerada, sino también en otros puntos del sistema de distribución desde la salida de la planta hasta el punto de entrega del agua regenerada.
- Complementar el control de los patógenos presentes, por ejemplo, ampliando el seguimiento de nematodos con otros microorganismos helmintos patógenos.

3.2.2.7. Mantenimiento de la calidad de las aguas regeneradas

El RD de reutilización señala que “*El usuario del agua regenerada es responsable de evitar el deterioro de su calidad desde el punto de entrega del agua regenerada hasta los lugares de uso*”. El usuario debe velar para que el agua suministrada no sufra

3. MATERIALES Y MÉTODOS

cambios relevantes que pongan en riesgo la salud humana y el medio ambiente. De ahí que el mantenimiento de la calidad del agua durante la distribución y el almacenaje sea una preocupación para los suministradores y usuarios del agua regenerada.

En este apartado se pretende proponer medidas que pueden paliar la posible disminución de la calidad del agua regenerada.

3.2.2.7.A. Degradación de la calidad

El agua potable está sujeta a cambios de la calidad del agua durante la distribución y el almacenaje, generalmente bajo la forma de concentraciones residuales de desinfectantes, formación bacteriana de nuevo crecimiento y de limo en la tubería de distribución. Estos cambios aumentan cuando el agua es regenerada debido a que las concentraciones de nutrientes disueltos y de materia orgánica residual son generalmente más altas que para el agua potable. Los cambios en la calidad del agua regenerada pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- Físicos: temperatura, turbidez, sólidos en suspensión.
- Químicos: cambios de pH, disminución del oxígeno disuelto, nitrificación.
- Biológicos: crecimientos de bacterias, algas, etc.
- Organolépticos: olor, color, turbidez.

Debe señalarse que la temperatura no afecta directamente a la calidad del agua pero puede acelerar otros cambios en la misma. La degradación de la calidad del agua depende de si el sistema de almacenamiento está abierto o cerrado. En la siguiente tabla se recoge una relación de problemas de deterioro en relación al tipo de sistema instalado. Se marca con "XX" si el riesgo es importante y con "X" si el riesgo es menor.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

PROBLEMAS DE DEGRADACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA REGENERADA ALMACENADA	SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO	
	ABIERTOS	CERRADOS
Olores	XX	X
Estratificación de la temperatura	X	-
Bajo oxígeno disuelto	X	XX
Crecimiento de algas y fitoplancton	XX	X
Turbidez y color	XX	X
Reproducción de microorganismos	X	X
Pájaros y roedores	X	-
Estancamiento	X	X
Pérdida de cloro residual	XX	X

Tabla 17. Problemas de deterioro en relación al tipo de sistema instalado. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

Se observa que generalmente los sistemas abiertos tienen mayor riesgo de deterioro que los cerrados, ya que se agudizan los problemas derivados de los olores, del crecimiento de las algas y del fitoplancton, así como del aumento de la turbidez y el color. Además es más fácil que experimenten aportes externos que supongan un aumento de la materia orgánica y, por ello, de la turbidez. Asimismo, la fauna natural de la zona puede ser causa de aumento de todo tipo de microorganismos patógenos o no. Hay que tener en cuenta que en el depósito de almacenamiento la concentración de desinfectantes, especialmente el cloro, disminuye al aumentar el tiempo de residencia del agua. Lógicamente este efecto es mayor en los sistemas abiertos. Por lo tanto, el usuario debe prestar especial atención a la calidad del agua en el punto de aplicación ya que sus características han podido cambiar, especialmente si el agua llevaba almacenada bastante tiempo.

3.2.2.7.B. Propuesta de medidas

A continuación se presentan algunas prácticas sencillas que permiten mantener la calidad de las aguas regeneradas durante el almacenamiento.

- Aireación: la instalación de elementos de aireación puede emplearse para mantener condiciones aeróbicas y eliminar la estratificación térmica.
- Recirculación: puede ser utilizada para evitar la estratificación térmica.
- Retirada de sedimentos: los sedimentos acumulados pueden ser retirados anualmente para limitar la formación de depósitos y la generación de sulfuro de hidrógeno.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- Filtración: el agua almacenada puede ser filtrada a través de filtros de arena o de escollera, o incluso a través de gaviones de material de rechazo, de forma que se mantengan los parámetros de calidad exigidos.
- Cloración: se puede utilizar la adición de una mínima cantidad de hipoclorito que permita el mantenimiento de la desinfección al que han sido sometidas las aguas. Debe optimizarse la dosis empleada para evitar la formación de organoclorados.
- Tratamiento con humedales: el agua, desde los sistemas de almacenamiento, puede pasar por un filtro verde como es el de macrofitas flotantes para mejorar su calidad y eliminar las algas. En este caso se debe evitar la plantación de especies invasoras. A continuación, se muestran los rendimientos de depuración de estos sistemas y un esquema del mismo.

Parámetros	Reducción
DQO (mg/L)	92%
DBO ₅ (mg/L)	97%
Microorganismos totales	93%
Coliformes totales	94%
Coniformes fecales	98%

Tabla 18. Rendimientos depuración. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

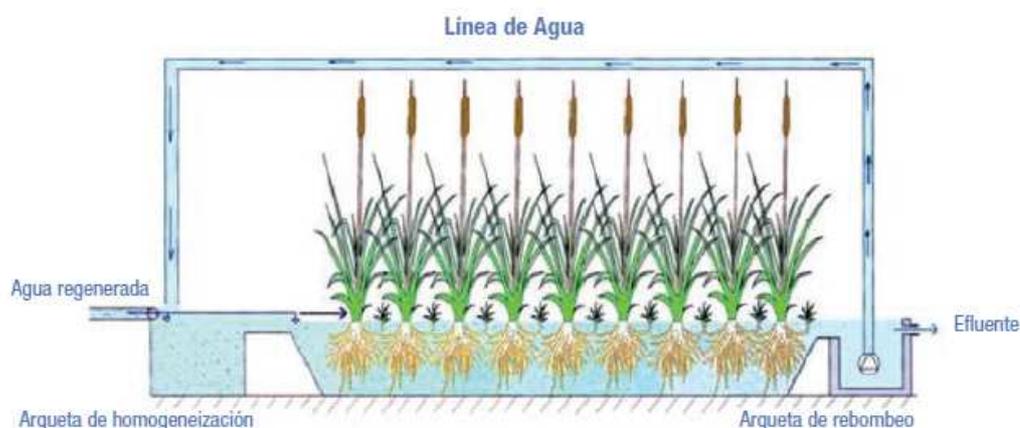


Figura 59. Esquema de medidas para mantener la calidad del agua regenerada. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.2.8. Prescripciones técnicas para el tratamiento de regeneración

El sistema de reutilización de agua tiene como fin mejorar la calidad del efluente de aguas residuales de la depuradora para cumplir con los requisitos de calidad de las aguas regeneradas.

Para ello, es preciso complementar los equipos de tratamiento previamente instalados con procesos de depuración avanzados que reduzcan la carga contaminante residual hasta valores admisibles para el uso al que vaya a destinarse el agua producto (usos urbanos, agrícolas, recreativos, industriales y ambientales). También es importante eliminar todos los microorganismos patógenos para asegurar la adecuada calidad sanitaria del agua. De esta manera el tratamiento de regeneración tiene como objetivo principal el reducir la cantidad de agentes patógenos que hayan sobrevivido a los tratamientos de depuración, así como reducir el nivel de sólidos en suspensión y turbidez, a fin de adaptarse a las calidades mínimas exigidas para su uso.

De naturaleza físico-química o biológica, estos tratamientos requieren un conjunto de instalaciones que normalmente se sitúan a continuación del tratamiento secundario. En la siguiente figura se muestran brevemente las tecnologías más empleadas para la regeneración del agua residual.

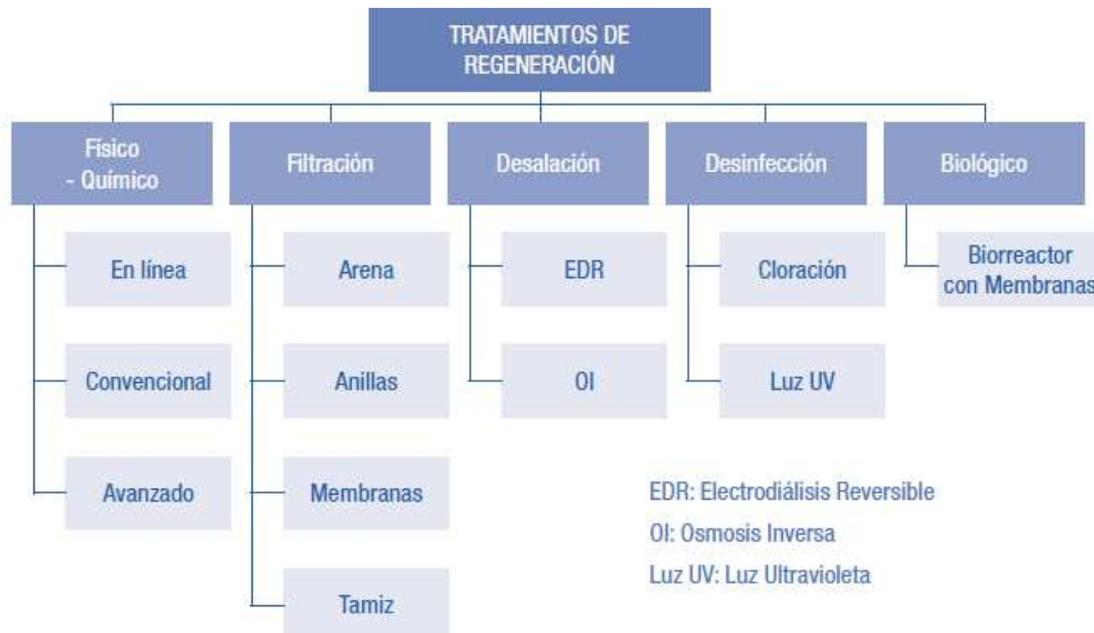


Figura 60. Esquema de los distintos tratamientos de regeneración. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

El tratamiento de regeneración debe ser diseñado en función del uso del agua regenerada debido a que los parámetros de calidad a conseguir son diferentes, según se regula en el RD de reutilización en su Anexo 1.A. Se ha observado que el

3. MATERIALES Y MÉTODOS

condicionante esencial en los tratamientos de regeneración es el nivel de desinfección, por ello en primer lugar se han agrupado todas las calidades recogidas en el RD de reutilización según la calidad bacteriológica exigida. De este modo se han establecido 6 tipos de calidad (A, B, C, D, E y F), teniendo en cuenta fundamentalmente los límites indicados respecto a *Escherichia coli*, nematodos intestinales y *Legionella spp*, de cuales se consigue cumplir mediante EDR los tipos B, C, D y E.

USOS	Tipo de Calidad	<i>Escherichia coli</i> UFC/100 ml	Nematodos	<i>Legionella spp.</i> UFC/100 ml
- Torres de refrigeración y condensadores evaporativos (3.2)	A	Ausencia	Ausencia	Ausencia
- Residenciales (1.1)		Ausencia	< 1 huevo/10L	< 100
- Recarga acuíferos inyección directa (5.2)		Ausencia	< 1 huevo/10L	No se fija límite
- Servicios urbanos (1.2) - Riego agrícola sin restricciones (2.1) - Riego campos de golf (4.1)	B	< 100-200	< 1 huevo/10L	< 100
- Riego de productos agrícolas que no se consumen frescos. - Riego pastos animales productores. - Acuicultura (2.2) - Aguas proceso y limpieza industria alimentaria (3.1)	C	< 1.000	< 1 huevo/10L	No se fija límite
- Recarga acuíferos por percolación a través del terreno (5.1)		< 1.000	No se fija límite	No se fija límite
- Riego cultivos leñosos, viveros y cultivos industriales (2.3) - Masas agua sin acceso público (4.2)	D	< 10.000	< 1 huevo/10L	< 100
- Riego de bosques y zonas verdes no accesible al público (5.3)	E	No se fija límite	No se fija límite	No se fija límite
- Ambientales: mantenimiento humedales, caudales mínimos (5.4)	F	La calidad se estudiará caso por caso		

Tabla 19. Tipos de calidad según calidad bacteriológica exigida. Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

Según los tipos de calidad recogidos en la tabla anterior se propone la siguiente línea de tratamiento para desalación mediante EDR:

3. MATERIALES Y MÉTODOS



Tabla 20. Tratamiento de regeneración propuesto con desalación mediante EDR.
Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

El tratamiento tipo 6 se compone de físico-químico con decantación, filtración, desalación mediante EDR, desinfección con luz ultravioleta y desinfección de mantenimiento. La desalación mediante EDR necesita un tratamiento previo para evitar problemas de funcionamiento. Para ello se recomienda la instalación de un tratamiento físico-químico con decantación lamelar y una filtración que permita limpiezas en continuo.

En general, en todo proceso de tratamiento y regeneración de aguas residuales se identifican 4 etapas básicas de tratamiento:

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento terciario avanzado

Las tres primeras corresponden al proceso de tratamiento de las aguas residuales, mientras que la cuarta sería propiamente el proceso de regeneración. Se podría decir que con las tres primeras etapas el efluente obtenido podría ser vertido, mientras que para poder reutilizarlo es necesario realizar el tratamiento avanzado.

Los tratamientos avanzados se centran principalmente en 4 objetivos (Asano et al., 2007):

3. MATERIALES Y MÉTODOS

- ✓ La eliminación de materia particulada residual.
- ✓ La eliminación de los compuestos disueltos residuales.
- ✓ La eliminación de algunos compuestos tóxicos en cantidades traza.
- ✓ La eliminación o inactivación de patógenos.

Pretratamiento: involucra principalmente unidades de proceso físicas y/o químicas. En aguas residuales urbanas esto significa la separación de materia flotante, arena y manchas de aceite; el pretratamiento se aplica antes de someter el afluente a otro tipo de proceso de separación de contaminantes y consiste en separar las partículas de gran tamaño y uniformizar el caudal del afluente que entra a la planta purificadora. Los equipos más comunes que se emplean en el pretratamiento son: rejillas de desbaste, canales de desarenado, unidades de flotación y homogenización.

Tratamiento primario: tiene como objetivo clarificar el efluente líquido residual sedimentando la materia orgánica flotante en reposo. Para mejorar el rendimiento de este proceso se añaden agentes químicos como sales de hierro, cal ó aluminio que favorecen la coagulación.

Tratamiento secundario: también denominado biológico, consiste en degradar vía biológica la materia orgánica presente en el efluente residual en compuestos no contaminantes como H₂O, CO₂ y lodos. Los principales sistemas de tratamiento secundario son: lodos activados, filtros percoladores, biorreactores, biodiscos, eliminación biológica de nitrógeno y fósforo y sistemas combinados de nitrificación-desnitrificación.

Tratamiento Químico: es el proceso terminal en la purificación de efluentes residuales urbanos e industriales donde se emplean agentes químicos con el objeto de eliminar los microorganismos patógenos contenidos en el agua.

Tratamientos avanzados de las aguas residuales: dependiendo de las metas de calidad del agua para el tratamiento de aguas residuales, puede ser necesario algún proceso adicional. Este tratamiento avanzado de aguas residuales generalmente implica coagulación y floculación química, seguidas por algún aparato especializado de clarificación. Como alternativa, algunos métodos de filtración del agua residual o el procesamiento con membranas podría satisfacer las metas de calidad del agua. Otra opción para el tratamiento avanzado (terciario) del agua residual es la oxidación química de los componentes contaminantes de dicha agua y la adsorción de los contaminantes usando carbón activado. Los procesos de tratamientos secundarios generalmente eliminan más del 85% de DBO, sólidos en suspensión y casi todos los

3. MATERIALES Y MÉTODOS

elementos patógenos. En algunas circunstancias los contaminantes restantes en el efluente secundario constituyen un problema grave.

Los procesos capaces de eliminar contaminantes que no fueron eliminados en el tratamiento secundario se llama procesos de tratamiento avanzado de aguas residuales. Los procesos avanzados se muestran en la tabla 20 (Israel Medina Roa, 2007).

Descripción	Tipo de agua residual tratada	Eficiencia de la eliminación, %								Desecho Final
		SS	DBO	DQO	NH ₃	N org.	NO ₃	PO ₄	TSD	
Operaciones físicas de la unidad										
Remoción de amoníaco con aire	ETB	---	---	---	85-98	---	---	---	---	Ninguno
Filtración										
Multimedia	ETB	80-90	50-70	40-60	---	20-40	---	---	---	Líquido y Lodo
Lecho de diatomeas	ETB	95-99	---	---	---	---	---	---	---	Líquido
Microfiltros	ETB	50-90	---	---	---	20-30	---	---	---	Lodo
Destilación	ETB nitrificado **									
	Filtración	99	98-99	96-98	---	90-98	99	99	95-99	Líquido
Flotación	ETP, ETB	60-90	---	---	---	20-30	---	---	---	Lodo
Aplicación en tierra	ETP, ETB	95-98	90-95	80-90	60-80	80-95	5-15	60-90	---	Ninguno
Osmosis inversa	ETB **, Filtración	95-98	95-99	90-95	95-99	95-99	95-99	95-99	95-99	Líquido
Adsorción de carbono	ETP, ETB	80-90	70-90	60-75	---	50-90	---	---	---	Líquido
Precipitación química	ETB	80-90	70-90	60-70	5-15	30-50	---	90-95	20	Lodo
Precipitación química en:										
Lodo activado	ETP	80-95	90-95	85-90	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	Lodo
Intercambio iónico	ETB**, filtración	---	40-60	30-50	85-98	80-95	80-90	85-98	---	Líquido
Electrodialisis	ETB**, filtración**									
	Adsorción de carbono	---	---	---	30-50	---	30-50	30-50	40	Líquido
Oxidación (Cloro)	ETB	---	80-90	65-70	50-90	---	---	---	---	Ninguno
Reducción	ETB	---	---	---	---	---	NO ₃	NH ₃	---	---
Procesos de unidad biológica										
Asimilación bacteriana	ETP	80-96	75-95	60-80	30-40	30-40	30-40	10-20	---	Lodo
Desnitrificación	Aguas de retorno									
	Agrícola	---	---	---	---	---	60-95	---	---	Ninguno
Recolección de algas	ETB	---	50-75	40-60	50-90	50-90	50-90	50	---	Algas
Nitrificación-desnitrificación	ETP, ETB	---	---	---	---	---	60-95	---	---	Ninguno

*ETP es el afluente del tratamiento primario, ETB es el afluente del tratamiento biológico

**Varia con el tipo de resina

Tabla 21. Tratamientos avanzados para aguas residuales.
Fuente: Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis (2007)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Basado en datos obtenidos de trabajos de diferentes autores, en este apartado se presenta en formato tabla las diferencias más relevantes de las diferentes técnicas de desalación así como su idoneidad en base a criterios energéticos, económicos o basados en el tipo de agua a tratar. También se presenta de igual manera los resultados referentes a la selección de la electrodiálisis para el reuso de agua residual regenerada en base a criterios microbiológicos. Para presentar la aplicabilidad de dicha técnica de ED en la producción de agua regenerada con fines industriales, agronómicos o recreativos se expone en un segundo apartado las características de una planta real.

4.1.- RECOGIDA DE DATOS DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE DESALACIÓN Y DE LA ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE EN PARTICULAR

Así, En la tabla nº22 se exponen las diferencias fundamentales de las diferentes tecnologías de desalación

Características	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
Tipo de energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo energético primario (kj/kg)	Alto (>200)	Alto/medio (150-200)	Medio (150-200)	Bajo (<80)	Bajo (<30)
Costo instalaciones	Alto	Alto/medio	Alto	Medio	Medio
Capacidad producción (m ³ /día)	Alta (>50.000)	Media (<20.000)	Baja (<5.000)	Alta (>50.000)	Media (<30.000)
Posibilidad de ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Fiabilidad de operación	Alta	Media	Baja	Alta	Alta
Calidad del agua desalada (ppm)	Alta (<50)	Alta (<50)	Alta (<50)	Media (<300)	Media (<300)
Superficie del terreno requerida para la instalación	Mucha	Media	Poca	Poca	Poca

Tabla 22. Características de las tecnologías utilizadas en la desalación de agua.
Fuente: Juan Francisco Zúñiga Santana et al., (2004)

De dicha tabla se deduce que, la ED y la OI suponen una ventaja respecto a las demás debido a:

- ✓ Su menor consumo de energía.
- ✓ Su menor coste inicial de las instalaciones que requieren, su fácil posibilidad de ampliación y la poca superficie de terreno necesaria.
- ✓ Su mayor capacidad de producción diaria de agua desalada.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- ✓ Alta fiabilidad de operación.
- ✓ Aunque la calidad de agua obtenida es menor respecto a los demás procesos, cumplen los requisitos para los usos a los cuales se destina el agua a la que se le aplica estos procesos.

Todas estas ventajas suponen un menor costo económico global por parte de la ED y la OI respecto al resto, ya que éstas poseen un mayor consumo energético y un alto costo de instalación y de operación para una producción diaria de agua desalada igual o menor. Por otra parte, hay un tercer proceso que, por sus prestaciones, es utilizado en la desalación de aguas residuales y este es la Nanofiltración. Las diferencias más relevantes entre la ED, la OI y la Nanofiltración se recoge en la tabla nº 23:

	Electrodialisis	Ósmosis Inversa	Nanofiltración
Fuerza impulsora	Potencial eléctrico	Presión hidrostática	Presión hidrostática
Mecanismo de separación	Membrana iónica selectiva	Disolución/difusión, exclusión	Tamizado, disolución/difusión, exclusión
Tamaño de poro (μm)	Na	0,0001-0,001	0,001-0,01
Peso molecular de corte	Na	<300	300-1000
Presión de operación (bar)	3 - 5	12 - 18	3,5 - 5,5
Consumo energético (kwh/m^3)	1,1 - 2,6	1,5 - 2,5	0,6 - 1,2
Coste económico ($\text{€}/\text{m}^3$)	- 0,22 (500 mg/l) a 1,47 (5000 mg/l) (SINIA, 2014)	- 0,32 (500 mg/l) a 0,63 (5000 mg/l) (SINIA, 2014)	- 0,4 (500 mg/l) a 1,5 (5000 mg/l) (SINIA, 2014)
Material	Membranas de intercambio iónico	Celulosa, poliamida aromática o composite	Celulosa, poliamida aromática o composite
Configuración del módulo	Plana	Arrollamiento en espiral, fibra hueca	Arrollamiento en espiral, fibra hueca
Vida útil de las membranas (años)	- 10 (SINIA, 2014)	- 3 a 5 (Wikipedia, 2014) - 2 (SINIA, 2014)	- 5 (SINIA, 2014)
Remoción directa	- Especies cargadas eléctricamente como sales minerales,	- Sales como fosfato, nitrato, sulfato e iones metálicos, bromo, mercurio, durezas, patógenos,	- Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables, Sales minerales, Nitrato, fosfato, Color

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

de sustancias	nitrato, fosfato, sulfato, entre otras (SINIA, 2014).	turbidez, Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO5), compuestos orgánicos, índice de fenol, Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX), Trihalometanos (THM), color, pesticidas, entre otros. (SINIA, 2014)	verdadero, Materia Orgánica, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), índice de fenol, entre otros. (SINIA, 2014)
Coefficiente de rechazo (%)	>90	>95	Entre 50 y 90
Volumen de agua rechazada (%)	13,5 (Martínez, 2012)	Entre 30 y 60 (SINIA, 2014)	Entre 15 y 30 (SINIA, 2014)

Na = No aplicable

Tabla 23. Características generales de los principales procesos de membranas utilizados para la eliminación de compuestos disueltos en aguas residuales para aguas de salinidad entre 1000 y 2500 mg/l. Fuente: Asano et al. (2007)

A la vista de las principales características de OI/NF, resulta evidente que las calidades del agua obtenida son suficientes para poder ser reutilizadas en las condiciones más exigentes. Pero para que estos procesos sean competitivos y tengan una mayor presencia en el tratamiento de aguas urbanas e industriales, será necesario un mayor desarrollo del sector con el fin de fabricar membranas más baratas, que permitan menores presiones de trabajo y reduzcan los problemas de ensuciamiento.

Un estudio realizado por Belén Gutiérrez López (2013) sobre la OI pone de manifiesto problemas de ensuciamiento de la membrana, el caudal de paso a través de la misma disminuye con el tiempo y este efecto se ve incrementado con el aumento de la temperatura del agua. Este fenómeno deriva en una modificación del pretratamiento de la ósmosis directa añadiendo un sistema de ultrafiltración que ha permitido que la membrana presente un comportamiento estable en el tiempo.

Por todo esto la NF se utiliza más como pretratamiento para una posterior OI del agua residual, por lo que a continuación se va a comparar únicamente los dos principales procesos para la desalación de efluentes industriales como tratamiento de regeneración.

En la tabla nº24 se presentan las diferencias más significativas entre ED y OI basado en estudios que comparan ambas tecnologías:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades	Electrodialisis	Ósmosis Inversa
Aplicación y rendimiento (%)	- Se puede producir agua de bajo costo a partir de agua salobre con menos de 3000 mg/l de STD. Una planta de ED de dos etapas rechaza un 85% de las sales disueltas (Medina Roa, 2007). 90% (Ros Moreno, 2011). 90% (SINIA, 2014). 80 a 95% (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006). 87% (Martínez, 2012)	- Puede tratar muchas clases de suministros de agua, con hasta 60000 mg/l de STD. Las membranas de OI rechazan hasta un 98,5% de las sales disueltas (Medina Roa, 2007) - > 90% (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006)
Calidad del agua tratada: Paso de material desde el suministro de agua al producto (% rechazo)	Sales disueltas > 90 Bacterias = 0 Virus = 0 Pirógenos = 0 Materia orgánica = 0 Partículas = 0 Sílice = 0 (Medina Roa, 2007)	Sales disueltas > 90 Bacterias = 100 Virus = 100 Pirógenos = 100 Materia orgánica = 100 Partículas = 100 Sílice > 90 (Medina Roa, 2007)
Gasto energético (kwh/m³)	- 1 (1000 mg/l) a 10-15 (5000 mg/l) (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006) - 1 a 2 (5000 mg/l) (Ros Moreno, 2011) - 0,5 a 1,1 + 0,7 por cada 1000 ppm de STD eliminados (Valerdi, 1999) - 1,1 (1000 mg/l) - 2,6 (2500 mg/l) (Álamo et al. 2007)	- No muy sensible al grado de desalinización, variando de 1,7 (concentración 3000 mg/l) a 6,7 (concentración 35000 mg/l) (Medina Roa, 2007). - 2,9 (Wikipedia, 2010) - 2 a 2,8 (Jorge Lechuga et al., 2007) - 2,9 a 3,1 (Estevan et al., 2007) - 1,5(1000 mg/l) -2,5(2500 mg/l) (Álamo et al. 2007)
Coste económico (€/m³)	- 0,35 a 0,45 (Universidad de La Laguna, 2011) - 0,15 a 0,20 (Grupo Aguas de Valencia, 2014) - 0,22 (500 mg/l) a 1,47 (5000 mg/l) (SINIA, 2014)	- 0,38 a 0,56 (Rodríguez Fernández-Alba, 2006) - 0,41 a 0,63 (Martínez Vicente, 2002) - 0,448 (Jorge Lechuga et al., 2007) <i>*Precios para concentración de 5000 mg/l</i> - 0,32 (500 mg/l) a 0,63 (5000 mg/l) (SINIA, 2014)
Vida útil de las membranas (años)	10 (SINIA, 2014)	- 3 a 5 (Wikipedia, 2014) - 2 (SINIA, 2014)
Recuperación de agua de rechazo (%)	95 (Valerdi, 1999)	95 (Wikipedia, 2014)

Tabla 24. Comparativa entre EDR y OI

Como se puede observar la EDR está especialmente indicada en usos en donde no se requiera una elevada calidad final del agua regenerada. Es la tecnología de elección, frente a OI, en el caso de soluciones acuosas de 500 mg/L - 3000 mg/L de sal, ya que los costes de operación son menores.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El consumo de energía y los costes económicos son menores que en la OI para salinidades menores de 3000 mg/l, mientras que para salinidades mayores la OI es más recomendable. Además, la mayor vida útil de las membranas supone un mayor ahorro económico debido a su mayor vida útil y sus menores problemas de ensuciamiento. En resumen la EDR es más viable económicamente para la desalación de agua residual cuando:

- ✓ El efluente industrial posee una salinidad comprendida entre 500 y 3000 mg/l.
- ✓ Se quiere conseguir agua apta para los usos especificados en la tabla 24 por un menor costo.

En la tabla 25 se recogen los usos del agua residual regenerada mediante EDR y los valores límite de *Echerichia Coli*, Nematodos y *Legionella spp.* (RD 1620/2007):

USOS	Tipo de calidad	Scherichia Coli UFC/100 ml	Nematodos	Legionella spp. UFC/100 ml
- Servicios urbanos. - Riego agrícola sin restricciones. - Riego campos de golf.	B	< 100-200	< 1 huevo/10L	< 100
- Riego de productos agrícolas que no se consumen frescos. - Riego pasto animales productores. - Acuicultura.	C	< 1000	< 1 huevo/10L	No se fija límite
- Aguas proceso y limpieza industria alimentaria. - Riego cultivos leñosos, viveros y cultivos industriales. - Mas de agua sin acceso público.	D	< 10.000	< 1 huevo/10L	< 100
- Riego de zonas verdes no accesible al público	E	No se fija límite	No se fija límite	No se fija límite

Tabla 25. Usos del agua residual regenerada por EDR.

Fuente: Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (2010)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haber visto las condiciones en las que la EDR es la mejor opción para regenerar agua industrial, se van a exponer los parámetros más significativos de este proceso en cuanto a funcionamiento se refiere (tabla nº26) según un estudio realizado por Ramón Valerdi Pérez (1999).

Densidad de corriente permitida (%)	60 a 80% de la corriente límite
Tiempo de inversión de polaridad óptimo (minutos)	15
Temperatura límite del agua a tratar (°C)	48
Diferencia de potencial eléctrico (V) para aguas de baja salinidad	70 en cada etapa
Porcentaje de separación para aguas de baja salinidad	95,40
Diferencia de potencial eléctrico (V) para aguas de media salinidad	60 en cada etapa
Porcentaje de separación para aguas de baja salinidad	98,19
Intensidad de corriente límite (A) para aguas de baja salinidad	Entre 0,91 y 1,86
Intensidad de corriente límite (A) para aguas de media salinidad	Entre 1,26 y 2,66
Caída de potencial por celda (V)	De 1 a 2
Extracción por etapa (%)	De 40 a 60

Tabla 26. Parámetros de funcionamiento de una planta de EDR. Fuente: Valerdi (1999)

En la siguiente imagen están recogidos los contaminantes que se eliminan por ED/EDR.

Contaminantes			
Sodio	Níquel	Cloruro	Fluoruro
Potasio	Cromo	Sulfato	Cromato
Calcio	Cobre	Nitrato	Acetato
Magnesio	Zinc	Fosfato	Oxhidrilo
Amónio	Estroncio	Cianuro	Conductividad
Arsénico	Hierro	Plata	STD
	Aluminio		

Figura 61. Contaminantes típicos que pueden eliminarse con ED/EDR.

Fuente: CIDTA (2011)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.-EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE EDR PARA REUSO INDUSTRIAL, AGRÍCOLA O RECREATIVO

A continuación se va a exponer un ejemplo teórico de funcionamiento de una planta de EDR para desalar aguas salobres. Los datos de partida para el diseño de dicha planta proceden del trabajo de Sanjana Hareh Sadhwani (2009) que diseñó la planta de EDR en la isla de Gran Canaria con fines agrícolas. En dicho trabajo se plantea la optimización del funcionamiento de la planta en base a: calidad del efluente, tipo de membranas, modelo de la pila de EDR y calidad del permeado.

La planta del presente trabajo tendrá una alimentación de 2000 m³/día y reducirá los STD desde 5183,66 ppm hasta 432 ppm, obteniendo un caudal de permeado de 1500 m³/día.

Las membranas a utilizar son membranas permselectivas de transferencia aniónica y catiónica. Asimismo, estas serán homogéneas. El sistema estará constituido por 4 pilas en serie compuestas por 1 etapa hidráulica y 1 etapa eléctrica cada una, con una eliminación de sales por etapa del 50%.

4.2.1.-Determinación de los parámetros del agua a tratar que determinan el diseño de la planta

Para poder calcular los parámetros de la instalación, es necesario conocer los siguientes datos:

- Características generales del agua de alimentación (a tratar)
- Características reales del agua de alimentación
- Calidad requerida del agua tratada según el uso que se le va a dar

4.2.1.a.- Características del agua de alimentación

A la hora de evaluar la calidad de un agua, es preciso conocer ciertos parámetros fundamentales que influyen en el proceso y rendimiento de las membranas:

- Salinidad y conductividad
- Composición química
 - Calcio y Magnesio
 - Amonio
 - Sodio
 - Carbonatos y Bicarbonatos

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Cloruros
- Sulfatos
- Fluoruros
- Nitratos, nitritos y amoniacó
- Fosfatos
- Sílice
- Hierro y Manganeseo
- Bario y Estroncio
- Aluminio
- Gases disueltos
 - ❖ Dióxido de Carbono disuelto
 - ❖ Oxígeno disuelto
 - ❖ Ácido sulfhídrico

a.1) Salinidad y conductividad

La salinidad se define como el contenido total de sales disueltas en un agua. En un análisis suele caracterizarse por S.T.D (sólidos totales disueltos) y sus unidades de medida son mg/l o ppm.

El contenido de sales es un parámetro fundamental que caracteriza al agua. En función de su valor podrá ser utilizado para unos fines u otros. Así, un agua destinada al riego no requerirá las mismas características de salinidad que un agua para el consumo humano. La clasificación dada por la *International Desalination Association* (IDA) en función de los TDS (o STD, sólidos totales disueltos) es la siguiente:

Agua pura	TDS < 500 mg/l
Agua salobre	3 000 mg/l < TDS < 20 000 mg/l
Agua marina	20 000 mg/l < TDS < 50 000 mg/l
Salmuera	TDS > 50 000 mg/l

Tabla 27. Clasificación de un agua en función de los STD.
Fuente: IDA (2009)

Asimismo, la conductividad es un parámetro que está íntimamente ligado a la salinidad. Esta se define como la capacidad de conducir la electricidad y se mide en S/m, aunque la unidad más frecuente es $\mu\text{S}/\text{cm}$. Puesto que la corriente eléctrica se transporta por medio de iones en disolución (las sales se encuentran en el medio en

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

forma iónica), la conductividad aumenta con el incremento de la salinidad. A continuación se muestran en la tabla nº28 las conductividades de algunos tipos de agua:

Tipo de agua	Conductividad (S/m)
Agua ultra-pura	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Agua potable	0,005 – 0,05
Agua de mar	5

Tabla 28. Conductividades de algunos tipos de agua. Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

a.2) Composición química

El agua, en condiciones normales no es del todo pura. Suele contener ciertos compuestos químicos disueltos en ella, los cuales pueden ser beneficiosos o perjudiciales según su naturaleza y concentración. De este modo, existe una gran variedad de clases de agua, que, según su procedencia, contendrán unos componentes u otros.

A continuación, se hablara brevemente de algunos de estos componentes.

a.2.1) Calcio y Magnesio

Estos elementos están presentes en todas las aguas en mayor o menor medida. La concentración de ambos constituye una medida de la dureza del agua. Así, se define un agua dura como aquella que contiene un elevado nivel de sales de magnesio y calcio. Este tipo de agua se caracteriza por la incapacidad de formar espuma dificultando el lavado, además de presentar sabores que pueden resultar desagradables.

Ambos elementos tienden a producir incrustaciones cuando se supera su límite de solubilidad en el agua, lo cual está condicionado por factores como la temperatura, presión y pH. Esto puede producir ensuciamientos de membranas.

Según el destino del agua, se establecen unos valores máximos de estos compuestos. Así, para el agua de riego, es importante que no sea dura, puesto que la cal actúa aumentando el pH (las plantas necesitan pH ligeramente ácidos) y las plantas no podrán absorber los minerales que necesitan (cobre, manganeso, hierro, zinc, boro,...).

a.2.2) Amonio

El amonio es indicativo de contaminación con fertilizante y heces. Este compuesto es el responsable de que el agua tome un color verdoso oscuro, baje la cantidad de

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

oxígeno en el agua y deje un olor desagradable. Cuanto menor sea su presencia en el agua, mayor será la calidad de la misma y mayor presencia de vida acuática habrá.

a.2.3) Sodio

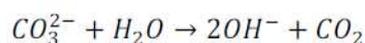
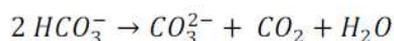
El sodio es un mineral que se encuentra naturalmente en el agua en cantidades variables con promedios de 40 mg/l en aguas potables. Todos los compuestos que forma son solubles en agua (cloruro de sodio, carbonato y bicarbonato de sodio) por lo que no precipitan y no influyen en el ensuciamiento de las membranas aunque si tienden a elevar el pH.

En las aguas de regadío, el sodio afecta a la permeabilidad del suelo y causa problemas de infiltración, debido a que el sodio, cuando está en el suelo, es intercambiable por otros iones. El exceso de sodio también puede generar incrustaciones de semillas, malas hierbas, erosión del suelo, escasez de oxígeno y nutrientes disponibles para la planta.

a.2.4) Carbonatos y bicarbonatos

Los carbonatos y bicarbonatos son los principales causantes de la alcalinidad en las aguas, que se encuentra tanto en las naturales como en las tratadas.

Se encuentran en forma de iones CO_3^{2-} y HCO_3^- y se asocian a elementos como el Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Las reacciones que producen en el agua son:



Cabe mencionar que el equilibrio estará desplazado hacia la derecha en condiciones de elevadas temperaturas y pH, lo que dará lugar a iones carbonatos e hidroxilos que precipitaran en forma hidróxidos tanto el calcio como el magnesio o precipitaciones de MgCO_3 y CaCO_3 . Por ello, debemos intentar mantener el pH ácido y así desplazar el equilibrio hacia la izquierda. No obstante, también habrá que tener precauciones puesto que el sulfato cálcico precipita a estos valores de pH.

En cuanto al regadío, ya se comentó anteriormente lo perjudicial que puede ser la utilización de aguas alcalinas en plantas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a.2.5) Cloruros

Las aguas naturales tienen contenidos muy variables en cloruros dependiendo de las características de los terrenos que atraviesen, pero, en cualquier caso, esta cantidad siempre es mejor que las que se encuentran en las aguas residuales.

El aumento de los cloruros de un agua puede tener diversos orígenes. Si se trata de una zona costera puede deberse a infiltraciones de agua de mar. En el caso de una zona árida, el aumento se puede deber al lavado de los suelos producidos por fuertes lluvias. La última posibilidad es la contaminación del agua por aguas residuales.

Los contenidos en cloruros en aguas naturales no suelen sobrepasar los 50-60 mg/l. Asimismo, aunque el contenido de cloruros no suele plantear problemas de potabilidad de las aguas de consumo, un contenido elevado puede dañar conducciones y estructuras metálicas además de perjudicar el crecimiento vegetal.

a.2.6) Sulfatos

El sulfato se encuentra en casi todas las aguas naturales. La mayor parte de los compuestos sulfatados se originan a partir de la oxidación de las mentas de sulfato, la presencia de esquistos y la existencia de residuos industriales.

Las bacterias que atacan y reducen los sulfatos, hacen que se forme ácido sulfhídrico. El nivel máximo de sulfato recomendado por la Organización Mundial de la Salud es de 500mg/l aunque las directrices de la Unión Europea (más recientes) sugieren un máximo de 250mg/l.

El sulfato llega a las aguas subterráneas debido al paso de estas por formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados como el sulfato de magnesio, sulfato de sodio y el sulfato de calcio.

a.2.7) Fluoruros

En aguas subterráneas aparecen en concentraciones muy bajas. Los fluoruros de metales alcalinos son solubles en aguas mientras que los fluoruros de los elementos alcalinotérreos como el calcio y el bario son poco solubles. En la naturaleza podemos encontrarlo en forma de fluorita.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debemos tener cuidado con su presencia puesto que elevadas concentraciones convierten el agua en toxica. Hasta 1,5 mg/l el fluoruro no provoca efectos adversos pero para concentraciones mayores de 4 mg/l comienzan a ser peligrosos.

a.2.8) Nitratos, nitritos y amoniaco

Son factores de suma importancia, puesto que la presencia y cantidad de estas sustancias es indicio de contaminación. En principio, el agua potable no debe contenerlos. Los nitratos a veces no suponen peligro salvo que sea agua para niños pero los nitritos y amoniaco son fuente de contaminación.

Los niveles naturales de nitratos en aguas superficiales y subterráneas son generalmente de unos pocos mg/l. En muchas aguas subterráneas se ha observado un incremento de los niveles de nitrato debido a la intensificación de las prácticas agrícolas y ganaderas. Según la OMS, la concentración de los nitratos no debe superar los 50mg/l, mientras que los nitritos superiores a 0,5 mg/l se consideran tóxicos.

a.2.9) Fosfatos

Los fosfatos son compuestos que se encuentran generalmente en las aguas naturales. También se añaden a fertilizantes y detergentes que pueden llegar al agua. Estos compuestos son nutrientes para las plantas por lo que favorece el crecimiento de las plantas y algas. La calidad del agua según el nivel del fosfato (tabla nº29) será:

Nivel de fosfato (ppm)	Calidad del agua
0,0-1,0	Excelente
1,1-4,0	Buena
4,1-9,9	Aceptable
10,0 o más	Mala

Tabla 29. Calidad de un agua según el nivel de fosfato.
Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

a.2.10) Sílice

Suelen estar presentes en aguas naturales como partículas en suspensión, en estado coloidal y como ácidos silícicos o iones silicatos. La sílice proviene de la degradación de las rocas que contiene este elemento. El contenido en agua natural suele oscilar entre 1 y 30 mg/l aunque es posible encontrar concentraciones más elevadas de incluso 1000 mg/l en algunas aguas salobres.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a.2. 11) Hierro y Manganeso

La presencia de hierro es un problema muy común en las aguas. Este provoca precipitación y coloración no deseada. Los niveles máximos de hierro y manganeso son, respectivamente, 0,3 mg/l y 0,05mg/l. Pequeñas cantidades de hierro, por lo regular se encuentran en el agua debido a la gran cantidad de hierro presente en la tierra y porque el agua corrosiva recoge hierro de las tuberías. También, la ropa lavada en agua con contenido en hierro puede presentar manchas marrones. En el caso del manganeso, también produce manchas marrones (más intensas y difíciles de eliminar) dejando partículas negras en accesorios de plomería

Tanto el hierro como el manganeso afectan al sabor de bebidas. En el caso del hierro, nos lo podemos encontrar en forma ferrosa y férrica. El primero de ellos, no es visible y se encuentra en agua que no contiene oxígeno como aguas de pozos profundos y aguas debajo de la tierra. El dióxido de Carbono reacciona con el hierro formando bicarbonato de hierro, soluble en agua, el cual en el agua, produce iones férricos. El hierro férrico (agua roja) es hierro ferroso el cual ha estado expuesto a oxígeno, combinado con el hierro para formar los iones férricos. Estas partículas son insolubles y visibles.

También, podemos encontrarnos con el llamado hierro bacterial o biofouling de hierro. Este constituye un problema complejo y extenso. Ataca a los pozos y sistemas de agua en todo tipo de ambiente acuífero. En algunos lugares, esto causa gran daños, mientras que en otros, se considera una molestia menor. En el caso del manganeso, tenemos la forma de bicarbonato manganeso (soluble en agua) que al reaccionar con oxígeno da lugar al hidróxido de manganeso (insoluble).

Para eliminar la precipitación tanto del hierro como del manganeso, lo más efectivo es impedir la oxidación. Esto se consigue evitando su contacto con el aire mediante algún sistema determinado.

En el caso de ensuciamientos de membranas por estos compuestos, pueden eliminarse fácilmente disminuyendo el pH por debajo de 3 con compuestos como el ácido acético, cítrico y nítrico.

a.2. 12) Bario y Estroncio

El Bario se puede encontrar en dos formas, en sulfato de bario y carbonato de Bario, los cuales se encuentran en depósitos minerales subterráneos y por tanto, en el agua que rodee la zona. También puede estar presente en el agua potable y alimentos de

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

forma natural. Debido a que los sulfatos y carbonatos de bario no son muy solubles, las cantidades presentes serán bajas. También puede presentarse en forma de acetato, cloruro, hidróxido, nitrato y sulfuro de Bario, los cuales son más solubles pero no son muy comunes y su presencia suele ser debida a contaminación de agua por estos compuestos.

El estroncio es un elemento natural que se puede encontrar en dos estados de oxidación: 0 y +2. Normalmente, este elemento se encuentra en forma de minerales (celestita y estroncianita). Existen dos tipos, los que se disuelven en agua y los insolubles en el. En el agua subterránea, la mayoría de las formas del estroncio están disueltas. Este proviene de rocas y suelos sobre o a través de los cuales fluyen corrientes de agua. Solamente una pequeña porción deriva de la deposición de polvo de estroncio en el aire. Cierta cantidad se encuentra suspendida en el agua.

a.2.13) Aluminio

No se encuentra de manera natural en ningún agua, por lo que su presencia supone indicios de contaminación industrial o debido a un vertido. Este elemento tiende a precipitar en forma de hidróxido de aluminio. Es fundamental tener en cuenta el pH puesto que su solubilidad disminuye a pH bajos (menores de 5). El tratamiento que se le da a las membranas en caso de ensuciamiento es acidificación y posterior filtración para eliminar la precipitación.

a.2.14) Gases disueltos

Suelen estar presentes en las aguas en cantidades variables. Aunque no se suele determinar en los análisis corrientes, su presencia puede ser muy significativa.

Los gases disueltos intervienen en problemas de corrosión y precipitación puesto que su solubilidad disminuye con aumentos de temperatura y aumenta con la presión.

a.2.14.1. Dióxido de Carbono

La existencia de dióxido de carbono en el agua está relacionada con el contenido en materia orgánica.

La liberación de dióxido de carbono provoca una disminución de los valores de pH del agua y aumenta su corrosividad.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a.2.14.2. Oxígeno disuelto

El nivel de oxígeno disuelto es un indicador de la calidad del agua. Normalmente, un nivel más alto de oxígeno disuelto indica un agua de mejor calidad, mientras que los niveles bajos, indican que los organismos y peces no pueden sobrevivir en él. Las aguas subterráneas suelen contener poca cantidad de oxígeno disuelto.

Por otro lado, la cantidad de oxígeno disuelto depende de la temperatura. El agua más fría guarda más oxígeno en ella que el agua caliente. Los niveles típicos suelen variar entre 0 y 18 ppm aunque la mayoría de los ríos y riachuelos contienen entre 5-6 ppm.

Asimismo, cabe mencionar que la presencia de oxígeno en el agua actúa corroyendo los metales rápidamente, cuya velocidad depende del valor del pH (la velocidad es mayor a bajos pH). Otro factor importante es la conductividad eléctrica, ya que para altos valores, el agua se vuelve agresiva.

También, la presencia de oxígeno disuelto favorece la proliferación de bacterias que contaminarían las membranas.

a.2.14.3. Ácido sulfhídrico

Es un gas incoloro de sabor dulce y olor a huevos podridos. Es soluble en agua. Normalmente, los niveles en el aire y el agua son bajos. En aguas subterráneas, las concentraciones son generalmente menores de 1 ppm, sin embargo, las concentraciones que se han medido en aguas superficiales y residuales han variado entre algo menos de 1 ppm hasta 5 ppm. Pueden producir precipitados que resultan en un ensuciamiento de las membranas difíciles de limpiar.

Puede aparecer también por acción bacteriana, las cuales se desarrollan en medios que carecen de oxígeno y elevados contenidos de sulfato que transforman a sulfhídrico.

a.2.15) Otros parámetros

Existen otros muchos factores que influyen en la calidad del agua. Algunos de ellos son el olor, sabor, color, turbidez, pH, temperatura, residuo seco a 110°, etc.

La temperatura es un parámetro que varía considerablemente en según el tipo de agua (superficial, subterránea, de mar, etc.), la zona, época del año, etc.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este factor va a influir en la solubilidad (aumenta con la temperatura), viscosidad (disminuye a altas temperaturas) y actividad biológica (las altas temperaturas favorecen la proliferación de bacterias). Por lo tanto, es importante tener en cuenta lo anterior para evitar precipitaciones y ensuciamientos de membranas.

4.2.1.b- Composición real del agua de alimentación de la planta

A continuación, se muestra un análisis con la composición química del agua que va a ser tratada en la planta. Basándonos en los valores paramétricos analizados, se establecerán los pre-tratamientos requeridos para conseguir un óptimo trabajo de las membranas, evitando el ensuciamiento (incrustaciones) y consiguiendo, por tanto, alargar su vida útil. Se ha marcado los valores más importantes a tener en cuenta con un recuadro amarillo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

C.A.C.C. CICLO INTEGRAL DEL AGUA Carretera del Centro, nº138.L.P.O.C. TFNO: 929 454 272 FAX: 929 454 279		INFORME DE RESULTADOS		
PETICIONARIO:		MUESTRA TOMADA:	INTERESADOS	
EMPRESA:		OBJETO A ENSAYAR:	AGUA NATURAL	
IDENTIF. MUESTRA:		ENVASE DE LA TOMA:	BOTELLA PLÁSTICO 1.5 L	
N.I.F.:		FECHA DE ENTRADA :	30-mar-01	
DOMICILIO:		FECHA DE MUESTREO:	29-mar-01	
TFNO.:		SALIDA INFORME:	03-may-01	
FAX.:		CODIGO INTERNO:	AA-108-01	
PNT-ANA	PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	FECHA REALIZACIÓN
55	olor	índice dilución	NORMAL	
58	aspecto		NORMAL	
17	turbidez	U.N.F.	0.30	27/04/01
10	temperatura	°C	23.20	30/03/01
32	pH	Unidad pH	7.99	30/03/01
01	cond.25°C	µS , cm-1	7.690.00	30/03/01
57	color	(mg/l Pt/Co)	<5	27/04/01
04	calcio	mg/l Ca	93.47	27/04/01
05	magnesio	mg/l Mg	140.41	27/04/01
15	amonio	mg/l NH4	0.00	27/04/01
28	sodio	mg/l Na	1.504.00	27/04/01
29	potasio	mg/l K	25.01	27/04/01
06	bicarbonatos	mg/l HCO3	451.47	27/04/01
06	carbonatos	mg/l CO3	0.00	27/04/01
07	cloruros	mg/l Cl	1.842.67	27/04/01
08	sulfatos	mg/l SO4	1.075.00	03/05/01
11	fluoruros	mg/l F	3.25	27/04/01
09	nitratos	mg/l NO3	48.38	30/03/01
13	nitritos	mg/l NO2	0.00	27/04/01
12	fosfatos	mg/l PO4	0.07	27/04/01
14	silice	mg/l SiO2	38.20	27/04/01
06	TA	°F	0.00	27/04/01
06	TAC	°F	37.00	27/04/01
03	TH	°F	81.09	27/04/01
21	S.T.D.ESTIMADOS	mg/l	5.183.66	
31	FAC.LUM.		0.67	
46	S.A.R.		22.97	
22	I.S.		0.88	
66	CO2 total estimado	mg/l CO2	331.58	
30	ERROR	%	-0.26	
	TH perm	°F		
	pH equilibrio	Unidad pH	7.11	
OBSERVACIONES:				
FIRMA: CARGO: JEFE LABORATORIO				
<small>Los resultados obtenidos, se corresponden con análisis realizados en el laboratorio. Los análisis de campo poseen un asterisco(*) en su casillero correspondiente. Los ensayos acreditados por ENAC, están marcados por la palabra A. Este informe solo afecta al objeto sometido a ensayo.</small>				

Figura 62. Características del agua de alimentación de la planta de EDR.

Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

4.2.1.c.- Calidad a conseguir del agua tratada

La calidad del agua obtenida en la planta debe cumplir con lo establecido en el Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas. Se ha escogido que el destino del agua será para uso agrícola, industrial o recreativo por lo que la planta de EDR se diseña para cumplir las

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

condiciones más exigentes que conllevan los usos destinados. Estas condiciones se indican en la tabla 30.

Valor máximo admisible				
Nematodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión	en Turbidez	Otros criterios
1 huevo/10L	10.000 UFC/100ml	35mg/L	No se fija límite	Otros contaminantes. Si son sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. Legionella spp. 100 UCF/L

Tabla 30. Normativa de calidad para la utilización del agua.

Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

Además de las exigencias anteriores de tipo sanitario y administrativo, el agua que se utilice como agua de riego tiene dos efectos importantes: a corto plazo influye en la producción calidad y tipo de cultivo, mientras que a largo plazo puede perjudicar el suelo de tal manera que puede convertirlo en totalmente inservible para la agricultura.

Para poder evaluar la calidad de un agua de riego se suelen estudiar los valores de una serie de parámetros indicadores.

c.1) Parámetros indicadores de calidad del agua para riego

El conjunto de parámetros a considerar en la evaluación de la calidad del agua de riego han de contemplar el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que definen su adecuación. Habitualmente, las determinaciones que se realizan al agua de riego son:

- Salinidad
 - ❖ Conductividad eléctrica
 - ❖ Sólidos totales disueltos
- Permeabilidad
 - ❖ Sodio (SAR)
 - ❖ Conductividad eléctrica
- Toxicidad
 - ❖ Cloruros
 - ❖ Sodio
 - ❖ Boro
- Misceláneos
- Microelementos
- Otros parámetros
 - ❖ pH
 - ❖ Temperatura

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

c.1.1) Salinidad

Este término representa la cantidad y tipo de sales disueltas en el agua de riego y su valor se determina mediante la medida de la conductividad eléctrica de la disolución. Esta aumenta al aumentar la salinidad de la solución.

El aumento de la salinidad favorece la aparición de problemas en el suelo, agua o cultivo agrícola. Estos problemas pueden estar relacionados con el contenido total de sales, con el contenido de uno o varios tipos de sales o con concentraciones excesivas de uno o varios microelementos. Por ello, la salinidad constituye un parámetro fundamental para determinar la calidad del agua.

A la hora de aportar sales al suelo, se debe tener en cuenta la acumulación de estas, que depende de la cantidad aportada por el agua de riego y la cantidad eliminada por el lavado del suelo, las cuales se deben igualar a largo plazo. Para resolver el problema de la salinidad se deberá establecer un flujo descendente de aguas y sales a través de la zona radicular.

c.1.2) Permeabilidad

c.1.2.1) Sodio

El sodio puede ser muy tóxico para los cultivos, puesto que sustituye al calcio en los suelos de zonas áridas. Este elemento afecta a la estructura y la infiltración al agua.

Sin embargo, la cantidad de sodio por sí sola provee poca información acerca de la calidad del agua y su comportamiento depende más bien de los niveles de calcio y el magnesio. Para prever la degradación que puede provocar una determinada agua de riego se calcula el índice de SAR (Riesgo de acumulación de sodio). Hace referencia a la proporción relativa en que se encuentran el ion sodio y los iones calcio y magnesio. Si estos valores son altos, atenuarán el efecto dañino del sodio.

$$SAR = \frac{Na}{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Para valores de S.A.R superiores a 10, el agua será alcalinizante, siendo mayor este riesgo cuanto mayor sea el valor. Para valores pequeños, el agua será de escaso poder de sodificación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

c.1.2.2) Conductividad

Un agua con una salinidad (conductividad eléctrica) muy baja (muy pura), no podrá penetrar en el suelo como las aguas que contienen sales. Por lo tanto, para poder evaluar los posibles problemas de permeabilidad se usan la SAR y la CE conjuntamente.

c.1.3) Toxicidad

Los problemas de toxicidad están referidos a los constituyentes (iones) en el suelo o agua que pueden ser tomados y acumulados por las plantas hasta concentraciones altas, causando daño a los cultivos o una disminución en su rendimiento. El grado del daño depende de la asimilación y sensibilidad del cultivo.

c.1.3.1) Cloruros

Se acumula en las hojas, cuando excede la tolerancia del cultivo, produciéndose daños en las mismas. En casos extremos, puede haber necrosis y caída de hojas.

c.1.3.2) Sodio

Su toxicidad no es tan fácilmente diagnosticada como el cloro, aunque se han reportado casos usando aguas con alta concentración de sodio (alto RAS). Produce quemadura y muerte de tejidos. Se puede corregir aumentando suficientemente el calcio.

c1.3.3) Boro

Constituye un elemento esencial para el desarrollo de la planta y es necesario en cantidades relativamente pequeñas. Sin embargo, si existen cantidades mayores, causa toxicidad. Los síntomas son amarilleamiento o secado de las hojas, de las puntas y bordes hacia dentro.

En el caso de cultivos sensibles a esta toxicidad es de difícil corrección y se debería variar el tipo de cultivo, suministro de agua, técnica de riego utilizada, etc. Este problema se acentúa mas en condiciones climáticas de elevada temperatura.

En la tabla nº31 se detalla la sensibilidad de algunos cultivos en función de la concentración de Boro:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Muy sensibles (<0,5 mg/l)	■ Limón ■ Mora
Sensibles (0,5-1,0 mg/l)	■ Aguacate ■ Pomelo ■ Naranja ■ Melocotón
Moderadamente sensibles (1,0-2,0 mg/l)	■ Pimiento rojo ■ Guisante ■ Zanahoria
Moderadamente tolerantes (2,0-4,0 mg/l)	■ Lechuga ■ Apio ■ Nabo
Tolerantes (4,0-6,0 mg/l)	■ Tomate ■ Alfalfa ■ Remolacha
Muy tolerantes (6,0- 15,0 mg/l)	■ Algodón ■ Espárragos

Tabla 31. Sensibilidad de los cultivos en función de la cantidad de boro.
Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

c.1.4) Misceláneos

Pueden existir otros problemas importantes relacionados con la calidad del agua de riego. Esto incluye altas concentraciones de nitratos y amonio, lo cual causa problemas de exceso desarrollo vegetativo, detenimiento y retraso de la madurez.

c.1.5) Microelementos

Son aquellos elementos químicos presentes normalmente en un agua de riego en concentraciones inferiores a unos cuantos mg/l y, normalmente en concentraciones inferiores a µg/l. Algunos de estos elementos son esenciales para el crecimiento de las plantas; en cambio, en cantidades excesivas reducen el crecimiento, provocan acumulaciones indeseables en los tejidos y alteran el metabolismo vegetal irreversiblemente.

El exceso de estos microelementos eventualmente contamina los suelos, reduciendo su productividad o produciendo cosechas inaceptables.

c.1.6) Otros parámetros

c.1.6.1) pH

Indica el carácter ácido o básico del agua. Este parámetro está comprendido entre 1 y 14 aunque para aguas de riego debe oscilar entorno a 7.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

c.1.6.2) Temperatura

La variación de la temperatura tiene incidencia sobre diferentes parámetros fisicoquímicos que, a su vez, pueden afectar la calidad de las aguas de riego.

La solubilidad de las sales varía en función de la sal de que se trate. La solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura. Sin embargo, en algunos sulfatos y carbonatos alcalinotérreos, un cambio en las formas cristalinas y estables conduce a una disminución de solubilidades con el aumento de la temperatura. Consideramos, por últimos, que los bicarbonatos son inestables y se descomponen con el aumento de temperatura del agua, dando lugar a carbonatos y dióxido de carbono. Asimismo, La temperatura del agua influye en la infiltración superficial.

4.2.1.d.- Valores específicos de cada uno de los parámetros

d.1) Salinidad

En la tabla siguiente se clasifica la salinidad del agua en función de la conductividad eléctrica y STD:

Salinidad	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (ppm)
Baja	<250	<160
Media	250-750	160-480
Alta	760-2250	480-1440
Muy alta	>2500	1440

Tabla 32. Salinidad de un agua en función de la CE y STD.

Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

d.2) Cationes y aniones

A continuación, se especifican los valores que deben tener cada uno de los iones mas importantes:

Íon	Concentración (mg/l)
Calcio	0-400
Magnesio	0-60
Sodio	0-900
Carbonatos	0-3
Bicarbonatos	0-600
Cloruros	0-1100
Sulfatos	0-1000

Tabla 33. Rango de valores que debe tener cada ion.

Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

d.3) Otros

La tabla siguiente muestra otros parámetros fundamentales:

Parámetro	Valor límite
Boro (mg/l)	0-2
pH	6,5-8,5
SAR	0-15

Tabla 34. Valores límite del boro, pH y SAR. Fuente: Sanjana Hareesh Sadhwani (2009)

3.2.4) Microelementos

En la siguiente tabla, se muestran los valores límites de cada uno de los microelementos:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Microelemento	Límite para el que se espera un efecto desfavorable	Concentraciones que tendrá el suelo al regar el esa agua	Observaciones
Aluminio	5,0	20,0	Falta de productividad en suelos ácidos y en alcalinos precipitará el ión.
Arsénico	0,10	2,0	Fitotoxicidad variante (<0,5-12 mg/l)
Berilio	0,10	0,5	Fitotoxicidad variante (0,5-5mg/l)
Cadmio	0,01	0,05	Límites conservadores
Cobalto	0,05	5,0	Inactivado por suelos neutros y alcalinos.
Cromo	0,1	-	Límites conservadores
Cobre	0,2	15,0	Tóxico para varias plantas entre 0,1 y 10 mg/l.
Fluoruros	1	15,0	Inactivado por suelos neutros o alcalinos
Hierro	5	20,0	Tóxico para suelos aireados pero puede contribuir a la acidificación del mismo y disminución del P y Mo
Litio	2,5	2,5	Tolerado por la mayoría hasta 5mg/l
Manganeso	0,2	10,0	Tóxico principalmente en suelos ácidos.
Molibdeno	0,01	0,05	No es tóxico para las plantas pero sí para el ganado.
Níquel	0,2	0,2	Tóxico entre 0,5 y 1,0 mg/l aunque disminuye a pH bajos y alcalinos.
Plomo	5	10,0	Inhibe el crecimiento
Selenio	0,02	0,02	Tóxico en concentraciones pequeñas
Estaño	Las plantas lo rechazan de forma eficaz; su tolerancia específica es desconocida.		
Titanio	Comportamiento similar al estaño		
Tungsteno	Comportamiento similar al estaño		
Vanadio	0,1	1,0	Tóxico en concentraciones bajas.
Zinc	2	10,0	Tóxico en concentraciones variables.

Tabla 35. Valores límite de los microelementos presentes en el agua.

Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.2.- Selección de membranas

Teniendo en cuenta los valores paramétricos a conseguir en el proceso de tratamiento del agua se realiza la selección del tipo de membrana. Las membranas seleccionadas en nuestro caso de electrodiálisis son homogéneas. Las especificaciones técnicas del fabricante se detallan en la tabla nº36:

Nombre	Nepton	
Fabricante	Ionics Inc	
Tipo de membrana	Catiónica	Aniónica
Codificación	AZL 183	BZL 183
Espesor del espaciador (mm)	0,60	0,60
Longitud de la membrana (cm)	102	102
Ancho de la membrana (cm)	46	46
Espesor de la membrana (cm)	0,06	0,06
Capacidad de cambio (meq/gr)	2,7	1,8
Selectividad (%)	91,0	96,0
Resistencia eléctrica (W·cm ²)	11,0	11,0
Presión de ruptura (bar)	8,0	9,0

Tabla 36. Membranas escogidas. Fuente: Sanjana Haresh Sadhwani (2009)

Para garantizar un funcionamiento óptimo de las membranas, es necesario conocer que sales están presentes en el agua a tratar y a qué concentraciones. Para ello se realiza el cálculo de las sales limitantes para control de las incrustaciones.

En un proceso de electrodiálisis, los iones pasan a través de la membrana (en presencia de campo eléctrico), por lo que un lado de la misma se irá concentrando cada vez más en sales. Puede ocurrir que si se supera el límite de solubilidad, alguna de las sales presentes en el concentrado precipite sobre las membranas.

El análisis del agua de alimentación nos indica que contiene:

- pH = 7,99
- Ca²⁺=93,47 ppm
- Mg²⁺=140,41 ppm
- Na⁺=1.504,00 ppm
- K⁺=25,01 ppm
- HCO₃⁻=451,47 ppm
- Cl⁻=1.842,67 ppm
- SO₄²⁻=1.075,00 ppm
- F⁻=3,25 ppm
- NO₃⁻=48,38 ppm
- PO₄³⁻=0,07 ppm → Es una concentración muy pequeña, se desprecia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- $\text{SiO}_2 = 38,20$ ppm
- STD estimados = 5.183,66 ppm

Observando los iones presentes en el agua, las sales que pueden formarse son las siguientes:

- NaCl y KCl → No van a afectar a las membranas.
- *Aunque el pH inicial del agua a tratar es de 7.99, y hay ausencia de carbonatos en el agua, al añadir al inicio del proceso reactivos antiincrustantes y sosa (condicionador de pH) se produce un incremento del pH del agua a tratar que produce sales tipo : CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 , MgSO_4 → Pueden afectar a las membranas*
- CaF_2 → Pueden a afectar a las membranas
- SiO_2 → Afectará a las membranas

4.2.3.-Cálculo de las sales limitantes para control de las incrustaciones.

El interés de este estudio, es conocer que sales presentes dentro de la pila de EDR (en las condiciones habituales de trabajo) van a afectar o no, al rendimiento de las membranas por formación de incrustaciones.

El potencial de ensuciamiento de la membranas, se expresa como el porcentaje del límite máximo admisible para los distintos índices de sobresaturación (ISS) o de ensuciamiento. Valores superiores al 100% significan que el potencial de incrustación o de ensuciamiento es mayor que el límite máximo admisible de los ISS e índices de ensuciamiento, por lo que los compuestos insolubles formarán incrustación en la superficie de la membrana.

La empresa ADIQUIMICA (2009) ha desarrollado un sistema de seguimiento en línea para el control de la dosificación del producto inhibidor de la incrustación, denominado *Sistema del análisis del principio activo*, que ofrece en tiempo real la cantidad de antiincrustante a añadir en base a las características físico químicas del agua de alimentación y la sal incrustante que genera el problema de ensuciamiento (se puede ver el esquema de este proceso en el anexo 5). Mediante un software informático se calculan estos parámetros y se determina qué sales presentes dentro de la pila de EDR en las condiciones habituales de trabajo van a afectar o no, al rendimiento de las membranas por formación de incrustaciones, así como la cantidad exacta en mg/l de antiincrustante necesario para la protección de las membranas. En nuestro caso, se calcularía la cantidad necesaria en mg/l de fosfonato a añadir. Con esa cantidad, previamente calculada, se garantiza la protección del sistema contra la deposición de compuestos insolubles como el carbonato de calcio, fluoruro de calcio y óxido de silicio, y además supone una ventaja económica al utilizar la cantidad justa

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

de antiincrustante. Sin dosificación de inhibidor de la incrustación, el potencial de ensuciamiento de carbonato de calcio (la sal con mayor potencial de ensuciamiento) calculado era del 753.6%. Con la dosificación adecuada de inhibidor, se pretende que el potencial de ensuciamiento sea inferior al 100%, de forma que el sistema queda completamente protegido. Resultados de la eficiencia de dicho sistema de control de antiincrustante en tiempo real de ADIQUIMICA han sido demostrados en plantas de ósmosis inversa (J. Aumatell, *et al* 2009).

Previamente se realiza el estudio teórico con cada una de las sales supuestamente incrustantes (apartado 4.2.2.1.a) por separado (determinar si la sal es incrustante o no). Posteriormente se estudia la capacidad incrustante, teniendo en cuenta el total de sales presentes en el agua , mediante un análisis teórico matemático de iteración que nos dá nuevos valores de $Y_{obtenido}$ a partir de valores de $Y_{supuesto}$. Estos valores nos sirven para conocer el porcentaje de rechazo de dicha sal en relación a las características de la membrana utilizada. El menor rechazo implica una menor K_s constante de solubilidad de dicha sal. Menor concentración de la misma en el rechazo y mayor cantidad de ensuciamiento cristalino sobre la membrana

4.2.3.a.-Estudio del $CaCO_3$

El procedimiento a seguir es el siguiente:

1. De los datos del agua a tratar se obtiene la concentración de Ca^{2+} y HCO_3^- .
2. Se calcula la concentración de CO_3^{2-}

$$[CO_3^{2-}] = \frac{K_a * [HCO_3^-]}{[H^+]} \text{ donde}$$

$[CO_3^{2-}]$ = concentración de carbonato

$[HCO_3^-]$ = concentración de bicarbonato

$[H^+]$ = concentración de hidrógeno = 10^{-pH}

K_a = Constante de acidez = $1,41 * 10^{-10}$

3. Cálculo de X

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}]}{x} * \frac{[CO_3^{2-}]}{x} \text{ donde}$$

$[Ca^{2+}]$ = concentración de calcio

K_s = consante de solubilidad de la sal

X = variable dependiente de la constante de solubilidad de la sal y de la concetración de los aniones. Define la capacidad antiincrustasnte

4. Cálculo de Y

$$Y = 1 - x \text{ donde}$$

Y = Capacidad de rechazo de la membrana sin que se produzcan incrustaciones en base a la solubilidad de las sales presentes en el efluente a tratar

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. Interpretación de los resultados en función de X

Valor de X	Valor de Y	Resultado
$X > 1$	$Y < 0$	La sal se incrusta. Cuanto más negativo sea el resultado de Y mayor cantidad de sal se incrusta
$X = 1$	$Y = 0$	La sal no se incrusta
$X < 1$	$Y > 0$	La sal no se incrusta

Tabla 37. Interpretación de los resultados en el estudio de la incrustación de una sal.

Fuente: Sanjana Hareesh Sadhwani (2009)

Ahora se va a proceder a la resolución de las fórmulas expuestas anteriormente para comprobar si la sal es incrustante:

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$[Ca^{2+}] = 93,47 \text{ ppm} = 2,3 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$[HCO_3^-] = 451,47 \text{ ppm} = 7,40 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$pH = 7,99 = -\log[H^+] \rightarrow [H^+] = 10^{-7,99}$$

La reacción de descomposición del bicarbonato es:



En el equilibrio tenemos:

$$K_a = \frac{[CO_3^{2-}] + [H^+]}{[HCO_3^-]} \text{ de donde se despeja la concentración de } [CO_3^{2-}]$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{K_a * [HCO_3^-]}{[H^+]} = \frac{1,41 * 10^{-10} * 7,40 * 10^{-3}}{10^{-7,99}} = 1,020 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$K_s CaCO_3 = 3,36 * 10^{-9}$$

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}]}{x} * \frac{[CO_3^{2-}]}{x} \rightarrow 3,36 * 10^{-9} = \frac{2,3 * 10^{-3} * 1,020 * 10^{-4}}{x^2} \rightarrow x = 8,346$$

$$Y = 1 - x = 1 - 8,356 = -7,356 \rightarrow \text{Es una sal incrustante}$$

Esto significa que si tuviésemos una disolución con solo esta sal, se producirían incrustaciones de la misma sobre las membranas. Sin embargo, observando la analítica, se sabe que no es la única sal presente, por lo que habrá que calcular el

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

porcentaje de recuperación con el que se podrá trabajar sin que se forme incrustación alguna, teniendo en cuenta la influencia que puedan ejercer el resto de las sales presentes.

Se va a suponer un porcentaje de recuperación de modo que el resultado obtenido al final ha de coincidir con el supuesto para saber que el cálculo es correcto.

Selectividad: s = 96%

Recuperación: Y = 60%

TDS: 5183,66

$$STDrechazo: 0,96 * \frac{5183,66}{1-0,6}$$

$$\sum Ks: 2,5 * 10^{-5}$$

$$\mu = \sum Ks * STDrechazo$$

$$\mu = 2,5 * 10^{-5} * STDrechazo = 2,5 * 10^{-5} * 0,96 * \frac{5183,66}{1-0,6} = 0,311$$

$$\log \gamma = -0,5 * z^2 * \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} \rightarrow \log \gamma = -0,5 * 2^2 * \frac{\sqrt{0,311}}{1 + \sqrt{0,311}} = -0,716$$

$$p\gamma = -\log \gamma = 0,716$$

$$Ks = [Ca^{2+}] * [CO_3^{2-}] \rightarrow \log(Ks) = \log[Ca^{2+}] * \log[CO_3^{2-}]$$

$$pK's = pKs - p\gamma Ca^{2+} - p\gamma CO_3^{2-} = -\log 3,36 * 10^{-9} - 2 * 0,716 = 7,042$$

$$K's = 10^{-7,042} = 0,96 * \left[\frac{2,3 * 10^{-3} * 1,020 * 10^{-4}}{x^2} \right] \rightarrow x = 1,575$$

$$Y = 1 - x = 1 - 1,575 = -0,575 \rightarrow 57,5\% \neq 60\% \text{ que se supuso}$$

Como la Y obtenida no coincide con la supuesta, se repetirá el procedimiento pero tomando el nuevo valor de Y.

Selectividad: s = 96%

Recuperación: Y = 57,5%

$$\mu = 2,5 * 10^{-5} * STDrechazo = 2,5 * 10^{-5} * 0,96 * \frac{5183,66}{1 - (-0,575)} = 0,079$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$$\log \gamma = -0,5 * z^2 * \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} \rightarrow \log \gamma = -0,5 * 2^2 * \frac{\sqrt{0,079}}{1 + \sqrt{0,079}} = -0,439$$

$$p\gamma = -\log \gamma = 0,439$$

$$K_s = [Ca^{2+}] * [CO_3^{2-}] \rightarrow \log(K_s) = \log[Ca^{2+}] * \log[CO_3^{2-}]$$

$$pK's = pK_s - p\gamma Ca^{2+} - p\gamma CO_3^{2-} = -\log 3,36 * 10^{-9} - 2 * 0,439 = 7,596$$

$$K's = 10^{-7,596} = 0,96 * \left[\frac{2,3 * 10^{-3} * 1,020 * 10^{-4}}{x^2} \right] \rightarrow x = 2,981$$

$$Y = 1 - x = 1 - 2,981 = -1,981$$

Por lo tanto, hay que volver a iterar. A continuación se muestra una tabla con los resultados:

Y supuesto	μ	$\log \gamma$	$p\gamma$	$pK's$	$K's$	x	Y obtenido
0,6	0,311	-0,716	0,716	7,042	$10^{-7,042}$	1,575	-0,575
-0,575	0,079	-0,439	0,439	7,596	$10^{-7,596}$	2,981	-1,981
-1,981	0,042	-0,340	0,340	7,794	$10^{-7,794}$	3,744	-2,744
-2,744	0,033	-0,307	0,307	7,860	$10^{-7,860}$	4,039	-3,039
-3,039	0,031	-0,299	0,299	7,876	$10^{-7,876}$	4,114	-3,114
-3,114	0,030	-0,295	0,295	7,884	$10^{-7,884}$	4,152	-3,152
-3,152	0,030	-0,295	0,295	7,884	$10^{-7,884}$	4,152	-3,152

Tabla 38. Resultados en la iteración en el estudio del $CaCO_3$.

Fuente: Sanjana Hareh Sadhwani (2009)

La iteración se detiene puesto que se puede observar que Y supuesta coincide con la obtenida. Cabe destacar que los porcentajes de recuperación son negativos. *Esto significa que sea cual sea la recuperación con la que trabe el sistema, la sal va a precipitar. Por ello, es imprescindible el uso de un anti-incrustante que evite dichas incrustaciones sobre las membranas.*

4.2.3.b.- Estudio del $CaSO_4$

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$K_s CaSO_4 = 4,93 * 10^{-5}$$

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}]}{x} * \frac{[SO_4^{2-}]}{x} = 4,93 * 10^{-5}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$$[Ca^{2+}] = 93,47 \text{ ppm} = 2,3 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$[SO_4^{2-}] = 1075 \text{ ppm} = 0,0112 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$4,93 * 10^{-5} = \frac{2,3 * 10^{-3}}{x} * \frac{0,0112}{x} \rightarrow x = 0,723$$

$$Y = 1 - x = 1 - 0,723 = 0,277$$

Esto significa que el $CaSO_4$ no es una sal incrustante.

4.2.3.c.-Estudio del $MgCO_3$

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$Ks \text{ } MgCO_3 = 6,82 * 10^{-6}$$

$$[Mg^{2+}] = 140,41 \text{ ppm} = 5,77 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$[CO_3^{2-}] = 1,020 * 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$Ks = \frac{[Ca^{2+}]}{x} * \frac{[CO_3^{2-}]}{x} = 6,82 * 10^{-6}$$

$$6,82 * 10^{-6} = \frac{5,77 * 10^{-3}}{x} * \frac{1,020 * 10^{-4}}{x} \rightarrow x = 0,294$$

$$Y = 1 - x = 1 - 0,294 = 0,706$$

Esto significa que no es una sal incrustante.

4.2.3.d.-Estudio del CaF_2

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$Ks \text{ } CaF_2 = 3,45 * 10^{-11}$$

$$[Ca^{2+}] = 93,47 \text{ ppm} = 2,3 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

$$[F^{-}] = 3,25 \text{ ppm} = 0,171 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}]}{x} * \frac{[CO_3^{2-}]}{x} = 3,45 * 10^{-11}$$

$$3,45 * 10^{-11} = \frac{2,3 * 10^{-3}}{x} * \frac{0,171 * 10^{-3}}{x} \rightarrow x = 1,249$$

$$Y = 1 - x = 1 - 1,249 = -0,249 \rightarrow \text{Es una sal incrustante}$$

Realizados los cálculos y las iteraciones, teniendo en cuenta el conjunto de las sales presentes en el agua a tratar, los resultados para el CaF₂ se exponen en la tabla nº37. Dichos resultados indican que será posible trabajar con una recuperación de hasta el 29,2% para el CaF₂ sin que se produzcan incrustaciones sobre las membranas de esta sal.

Y _{supuesta}	μ	Log γ (Ca ²⁺)	Log γ (F ⁻)	pγ (Ca ²⁺)	pγ (F ⁻)	pK's	K's	x	Y _{obtenida}
0,6	0,311	-0,716	-0,179	0,716	0,179	9,567	10 ^{-9,567}	0,628	0,372
0,372	0,198	-0,616	-0,154	0,616	0,154	9,692	10 ^{-9,692}	0,692	0,308
0,308	0,180	-0,596	-0,149	0,596	0,149	9,717	10 ^{-9,717}	0,705	0,295
0,295	0,176	-0,591	-0,148	0,591	0,148	9,723	10 ^{-9,723}	0,708	0,292
0,292	0,176	-0,591	-0,148	0,591	0,148	9,723	10 ^{-9,723}	0,708	0,292

Tabla 39. Resultados en la iteración en el estudio del CaF₂.

Fuente: Sanjana Hareesh Sadhwani (2009)

4.2.3.e.- Estudio del SiO₂

La concentración máxima de sílice está determinada por la solubilidad de dicho compuesto en el agua. Cuando se encuentra en un agua pura a 25°C, la solubilidad se encuentra entre 110-125 ppm, variando linealmente con la temperatura. Por lo tanto, situando 150 ppm como el valor límite, cuando se superan este valor, el sílice puede producir precipitados. La concentración límite de sílice en el caso presente es:

$$[SiO_2] = \frac{38,20 * 0,96}{1 - 0,75} = 146,688 \text{ ppm}$$

Se puede observar que el valor se encuentra muy próximo al valor límite (150 ppm) por lo que será necesario utilizar anti-incrustantes para proteger a las membranas.

4.2.4.- Cálculo de las etapas del proceso y balance de materia

La instalación EDR tiene que tratar un vertido industrial que es el agua de alimentación, caracterizado por una salinidad de 5.183,66 ppm, para obtener un

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

agua tratada contenga una concentración que oscile entre 160-480 ppm (salinidad media) para los usos a los que se pretende destinar. Considerando que la eliminación de sal de cada etapa es del 50%, nos harán falta 4 pilas de 1 etapa hidráulica y 1 eléctrica cada una, es decir, un total de 4 etapas hidráulicas, obteniendo una salinidad final de 432 ppm (se puede ver un esquema de la eliminación de sales en cada etapa hidráulica en el anexo 5).

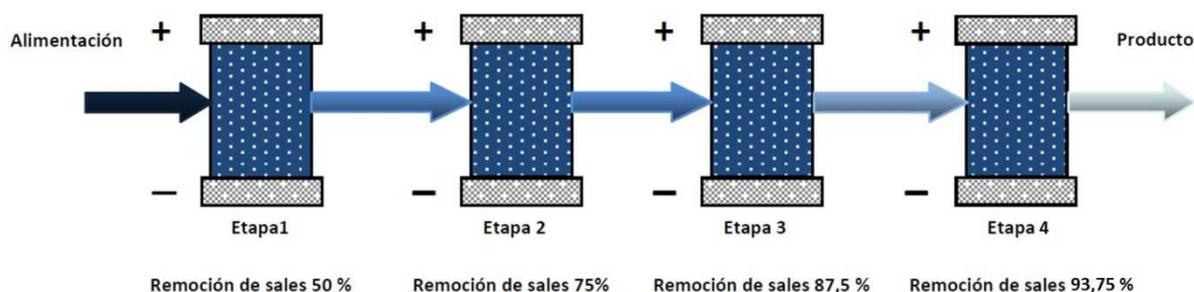


Figura 63. Esquema pilas EDR de 1 etapa hidráulica y 1 etapa eléctrica cada una

A continuación, se va a calcular la eliminación de cada uno de los iones presentes en el agua de alimentación en las diferentes etapas. Aunque realmente entra una sola corriente de alimentación, en electrodiálisis se dice que entra la corriente de concentrado y permeado. Así, la corriente de concentrado es la que va a ir enriqueciéndose de iones y el permeado los va a ir perdiendo.

4.2.4.1.- Balance de la primera etapa

Como el agua de alimentación contiene 5183,66ppm y el flujo diario de este es de 2.000 m³/día, se tendrán:

$$STD = 5183,66 \frac{mg}{l} * 2 * 10^6 l * \frac{1 Kg}{10^6 mg} = 10367,32 \frac{kg}{día}$$

Para conocer el valor de cada uno de los componentes iónicos presentes, se realiza el mismo calculo anterior con los diferentes valores de concentraciones. Los resultados son los siguientes:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elementos	Alimentación (ppm)	Alimentación (kg)
STD	5183,66	10367,32
Ca ²⁺	93,47	186,94
Mg ²⁺	140,41	280,82
Na ⁺	1504	3008
K ⁺	25,01	50,02
HCO ₃ ⁻	451,47	902,94
Cl ⁻	1842,67	3685,34
SO ₄ ²⁻	1075	2150
F ⁻	3,25	6,5
NO ₃ ²⁻	48,38	96,76
PO ₄ ³⁻	0,07	0,14
SiO ₂	38,2	76,4

Tabla 40. Valor de cada componente en kg/día. Fuente: Sanjana Haresh Sadhwani (2009)

Teniendo en cuenta que la eliminación de sales de cada una de las etapas es del 50%, los resultados obtenidos en la primera etapa serán:

Elementos	Alimentación (kg)	Concentrado (kg)	Permeado (kg)
STD	10367,32	5183,66	5183,66
Ca ²⁺	186,94	93,47	93,47
Mg ²⁺	280,82	140,41	140,41
Na ⁺	3008	1504	1504
K ⁺	50,02	25,01	25,01
HCO ₃ ⁻	902,94	451,47	451,47
Cl ⁻	3685,34	1842,67	1842,67
SO ₄ ²⁻	2150	1075	1075
F ⁻	6,5	3,25	3,25
NO ₃ ²⁻	96,76	48,38	48,38
PO ₄ ³⁻	0,14	0,07	0,07
SiO ₂	76,4	38,2	38,2

Tabla 41. Eliminación de sales en la primera etapa. Fuente: Sanjana Haresh Sadhwani (2009)

Estos son los valores obtenidos de STD y de cada uno de los iones presentes tras la primera etapa.

4.2.4.2.- Balance de materia de la segunda etapa

Se repite el proceso anterior cogiendo la corriente de salida de la primera etapa como la de alimentación de la segunda. Como se puede observar, a la cantidad de concentrado de la etapa se le suma el concentrado obtenido en la anterior debido a que se acumula de cada etapa en el compartimento de concentrado. Esta suma se hará

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

también en las siguientes etapas. Los resultados obtenidos fueron los siguientes. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Elementos	Alimentación (kg)	Concentrado (kg)	Permeado (kg)
STD	5183,66	7775,49	2591,83
Ca²⁺	93,47	140,205	46,735
Mg²⁺	140,41	210,615	70,205
Na⁺	1504	2256	752
K⁺	25,01	37,515	12,505
HCO₃⁻	451,47	677,205	225,735
Cl⁻	1842,67	2764,005	921,335
SO₄²⁻	1075	1612,5	537,5
F⁻	3,25	4,875	1,625
NO₃²⁻	48,38	72,57	24,19
PO₄³⁻	0,07	0,105	0,035
SiO₂	38,2	57,3	19,1

Tabla 42. Eliminación de sales en la segunda etapa. Fuente: Sanjana Haresh Sadhwani (2009)

4.2.4.3.- Balance de materia de la tercera etapa

Se repite el procedimiento anterior, obteniendo como resultados:

Elementos	Alimentación (kg)	Concentrado (kg)	Permeado (kg)
STD	2591,83	9071,405	1295,915
Ca²⁺	46,735	163,5725	23,3675
Mg²⁺	70,205	245,7175	35,1025
Na⁺	752	2632	376
K⁺	12,505	43,7675	6,2525
HCO₃⁻	225,735	790,0725	112,8675
Cl⁻	921,335	3224,6725	460,6675
SO₄²⁻	537,5	1881,25	268,75
F⁻	1,625	5,6875	0,8125
NO₃²⁻	24,19	84,665	12,095
PO₄³⁻	0,035	0,1225	0,0175
SiO₂	19,1	66,85	9,55

Tabla 43. Eliminación de sales en la tercera etapa. Fuente: Sanjana Haresh Sadhwani (2009)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.4.4.- Balance de materia de la cuarta etapa

Elementos	Alimentación (kg)	Concentrado (kg)	Permeado (kg)
STD	1295,915	9719,3625	647,9575
Ca ²⁺	23,3675	175,25625	11,68375
Mg ²⁺	35,1025	263,26875	17,55125
Na ⁺	376	2820	188
K ⁺	6,2525	46,89375	3,12625
HCO ₃ ⁻	112,8675	846,50625	56,43375
Cl ⁻	460,6675	3455,00625	230,33375
SO ₄ ²⁻	268,75	2015,625	134,375
F ⁻	0,8125	6,09375	0,40625
NO ₃ ²⁻	12,095	90,7125	6,0475
PO ₄ ³⁻	0,0175	0,13125	0,00875
SiO ₂	9,55	71,625	4,775

Tabla 44. Eliminación de sales en la cuarta etapa. Fuente: Sanjana Hareesh Sadhwani (2009)

La concentración que va a tener la salmuera final ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para 500 m^3 de concentrado será:

$$\frac{9719,36 \text{ kg}}{500 \text{ m}^3} = 19,438 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 19438 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Para un factor de conductividad de $F=0,5$ por predominancia de Cl^- la concentración de la salmuera queda:

$$STD = \text{conductividad}(\mu\text{S}) * \text{Factor} \rightarrow 19438 = \text{conductividad}(\mu\text{S}) * 0,5$$

$$\text{Conductividad} = 38876 \frac{\mu\text{S}}{\text{cm}}$$

El resultado de la concentración (o conductividad) de la salmuera determina que ésta se asemeja a la concentración del agua de mar y sobrepasa los límites para su vertido al alcantarillado, por lo que la salmuera será conducida al mar o se recuperaran las sales para otros fines.

Suponiendo una recuperación teórica del 75%, por cada 2000 m^3 tratados del efluente se obtendrán 1500 m^3 de permeado:

$$2000 \text{ m}^3 * 0,75 = 1500 \text{ m}^3$$

La composición salina expresada en peso o concentración del agua obtenida será:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elementos	Producto (kg)	Producto (ppm)
STD	647,9575	431,9717
Ca ²⁺	11,68375	7,7892
Mg ²⁺	17,55125	11,7008
Na ⁺	188	125,3333
K ⁺	3,12625	2,0842
HCO ₃ ⁻	56,43375	37,6225
Cl ⁻	230,33375	153,5558
SO ₄ ²⁻	134,375	89,5833
F ⁻	0,40625	0,2708
NO ₃ ²⁻	6,0475	4,0317
PO ₄ ³⁻	0,00875	0,0058
SiO ₂	4,775	3,1833

Tabla 45. Concentración de sales del agua de recuperación. Fuente: Sanjana Haresh Sadhwani (2009)

Riesgo de acumulación de sodio (S.A.R):

Uno de los iones que más favorece la degradación del suelo es el sodio que sustituye al calcio en los suelos de zonas áridas. Esta sustitución da lugar a una dispersión de los agregados y a una pérdida de la estructura, por lo que el suelo pierde rápidamente su permeabilidad. Una acción contraria a la señalada para el sodio es la que desempeñan calcio y magnesio.

Para prever la degradación que puede provocar una determinada agua de riego se calcula el índice S.A.R. que es la relación de absorción de sodio. Hace referencia a la proporción relativa en que se encuentran el ion sodio y los iones calcio y magnesio. En la tabla 45 se recoge el riesgo por SAR según el valor de este.

Riesgo de sodio	
SAR	Riesgo
0 - 10	Bajo
10 - 18	Medio
18 - 26	Alto
más de 26	Muy Alto

Tabla 46. Interpretación del cálculo del valor del SAR.
Fuente: recomendaciones de interpretación de aguas.doc

Vamos a calcular el S.A.R. del agua producto:

$$[Na^+] = 125,33 \rightarrow \frac{meq}{l} = \frac{m * val}{PM} = \frac{125,33 * 1}{22,99} = 5,45 \frac{meq}{l}$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$$[Ca^{+}] = 7,79 \rightarrow \frac{meq}{l} = \frac{m * val}{PM} = \frac{7,79 * 2}{40,08} = 0,38 \frac{meq}{l}$$
$$[Mg^{+}] = 11,70 \rightarrow \frac{meq}{l} = \frac{m * val}{PM} = \frac{11,70 * 2}{24,31} = 0,96 \frac{meq}{l}$$
$$S.A.R. = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}} = \frac{5,45}{\sqrt{\frac{(0,38 + 0,96)}{2}}} = 6,66$$

Por lo tanto, el agua producto va a tener escaso poder de sodificación.

4.2.5.- Descripción general del proceso

Una planta de electrodiálisis está constituida principalmente por las siguientes fases:

- Captación de agua
- Pretratamiento físico-químico
- Unidad de electrodiálisis (con los electrodos)
- Limpieza de membranas y electrodos
- Postratamiento del agua obtenida

En la figura 64 se representa mediante un esquema reducido los pasos principales del diagrama de flujo del proceso que se explican a detalle a continuación en este documento. En el Anexo nº5 se representa dicho diagrama de forma detallada.

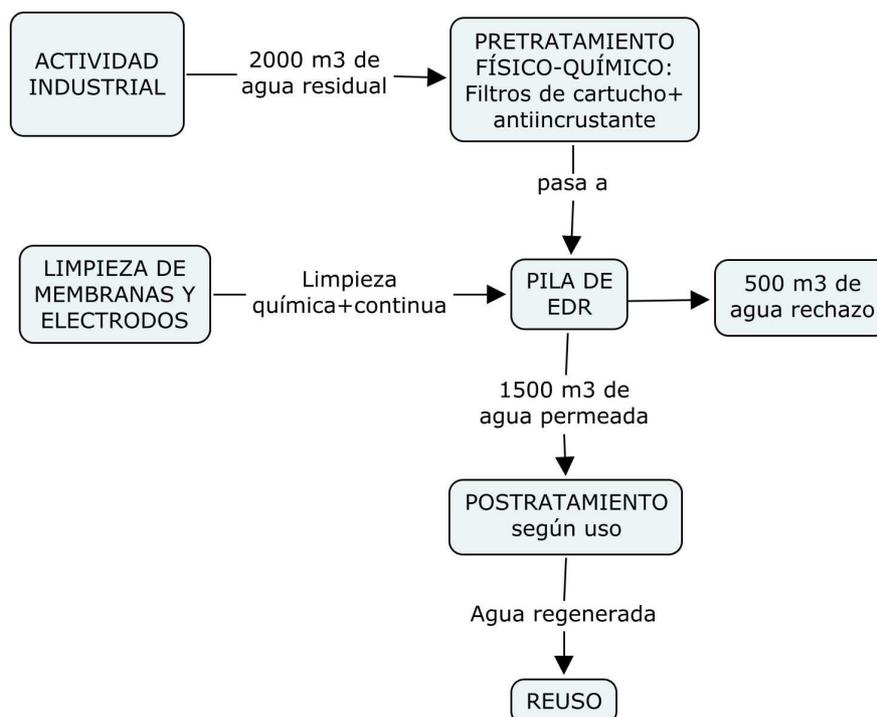


Figura 64. Esquema diagrama proceso(Anexo5)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.5.1.- Captación de agua

El proceso de la planta EDR comienza por la captación de agua, que va a ser la alimentación del sistema. Dicha captación puede ser de dos tipos según el equipamiento necesario para el transporte del agua desde el depósito al pretratamiento:

- Captación desde un depósito a una altura igual o inferior a la del pretratamiento.
- Captación desde un depósito a una altura superior a la del pretratamiento (depósito aéreo).

La diferencia entre ambos tipos de captación es que la primera opción requiere bombas para impulsar el agua desde el depósito, mientras que la segunda el transporte se realiza por gravedad por lo que no es necesaria ninguna bomba en este caso. La segunda opción supone una ventaja económica al no tener que utilizar equipo de impulsión.

En nuestro caso, la captación del agua se realiza desde un depósito aéreo de PVC de una capacidad de 2.500 m³ que se conecta directamente al pretratamiento físico mediante una tubería de PVC. El caudal se regula mediante una válvula.

El PVC es tiene una características químicas apropiadas para el transporte y almacenamiento del agua residual debido a:

- ✓ Es un material inerte
- ✓ Alta resistencia a la corrosión, a los ataques químicos debido a soluciones salinas, ácidos y alkalis fuertes, alcoholes, y muchos otros químicos.
- ✓ Es confiable en aplicaciones corrosivas y no transmiten ningún sabor u olor ni reaccionan con los fluidos que conduce ni actúa como un catalizador.
- ✓ Resistencia a la corrosión externa
- ✓ No existe ninguna posibilidad de contaminación adicional al agua residual
- ✓ Bajas pérdidas por fricción y proporcionan movimiento de flujos altos.
- ✓ No se oxida con el tiempo por lo que se puede garantizar que se mantendrá el caudal inicial por toda la vida útil del sistema de tubería.

4.2.5.2.- Pretratamiento físico-químico

Los pretratamientos son una serie de procesos aplicados al agua cruda (de alimentación), que comprenden un cierto número de operaciones mecánicas, físicas y/o químicas, que tienen por objeto separar del agua la mayor cantidad posible de

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

materias, que por su naturaleza o tamaño puedan ser motivo de posteriores problemas en la instalación.

Cabe mencionar que en el caso de la electrodiálisis, no se requiere de pretratamientos excesivos, puesto que las membranas de este proceso son bastante resistentes a los oxidantes y al ensuciamiento orgánico. Los pretratamientos se pueden clasificar de manera global en físicos y químicos. El pretratamiento que se debe aplicar va a depender de las características de nuestra agua.

4.2.5.2.- 1) Pretratamiento físico

Tienen por objeto eliminar partículas sólidas que el agua puede arrastrar consigo. Dentro de este grupo se encuentran las partículas de diversos tamaños (arenas y partículas coloidales), algas y materia orgánica. Los más destacados y utilizados son los siguientes:

- Filtros de arena
- Filtros de cartucho
- Filtros pre-capas
- Microfiltración
- Ultrafiltración

4.2.5.2.- 1.1) Filtros de arena

Los filtros de arena o grava están constituidos por tanques metálicos o de plástico reforzado, capaces de resistir las presiones estáticas y dinámicas, las cuales están llenas de arena o grava tamizada de un determinado tamaño. La operación de filtrado se lleva a cabo cuando el agua atraviesa la arena (desde la parte superior del filtro), reteniendo las impurezas que la acompañan.

Cabe mencionar que los filtros de grava son muy efectivos reteniendo grandes cantidades de sustancias orgánicas antes de que sea necesaria su limpieza. Los factores que afectan al funcionamiento de un filtro de arena son:

- Calidad del agua
- Características de la arena
- Caudal
- Caída de presión admisible

Los filtros de arena se pueden clasificar de acuerdo con la fuerza que causa la filtración, en filtros de gravedad, presión o vacío.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los filtros por gravedad consisten en un lecho de arena que dispone de sistemas de inyección (distribuyendo el agua lo más uniformemente posible) y recolección de agua en su interior. Los caudales típicos son de 120 l/min y por metro cuadrado de sección y trabaja con bajas velocidades de filtración. Este tipo de filtro también, además de materias en suspensión, también es capaz de retener algas y bacterias que puedan estar presentes en el agua. Este tipo se utiliza en plantas depuradoras, puesto que presentan un buen rendimiento.

Por otro lado, los filtros de presión o de vacío son los que más se utilizan en la industria, con preferencia a los de gravedad. La fuerza impulsora es la presión o vacío, que es, muchas veces mayor que la de gravedad, lo que permite velocidades de filtración y rendimientos más elevados. El tipo más común es el filtro prensa, del que hay diferentes subtipos. Se caracteriza por que dispone de una elevada superficie filtrante en poco espacio, lo que hace que su eficacia sea enorme.

Asimismo, es importante tener en cuenta que los filtros, independientemente del tipo, se ensucian y se obstruyen con el uso, disminuyendo su eficacia. Por ello, es fundamental realizar limpiezas periódicas, que suelen ser semanales o mensuales.

Por último, cabe mencionar que en los filtros, las granulometrías pueden ser muy variadas formando varias capas. Sin embargo, para la captación de aguas de pozos se suele utilizar una capa sencilla.

4.2.5.2.- 1.2) Filtros de cartucho

La filtración por cartuchos consiste en hacer circular mediante presión, un fluido por el interior de un portacartuchos en el que se encuentran alojados los cartuchos filtrantes. El fluido atraviesa el cartucho filtrante dejando en este retenidos todos los contaminantes seleccionados. Esta técnica es la más aconsejada para aplicaciones cuyas exigencias en cuanto a la calidad y seguridad sean elevadas. Estos filtros eliminan los sedimentos en el agua en diferentes tamaños de partículas, los cuales varían en función del tamaño del poro, que va desde 1 hasta 50 micras, dependiendo del uso que se le quiera dar.

En cuanto a los cartuchos filtrantes, estos pueden estar fabricados en diferentes materiales como polipropileno, polietersulfona, ptfé, celulosa, nylon, etc. en función de las características del fluido a filtrar y de la calidad final del mismo deseada.

Para nuestro diseño, se va a utilizar únicamente este tipo de pretratamiento físico. Este va a constar de un filtro con 3 cartuchos de la siguientes características:

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- ✓ Capacidad de retener partículas de $1\ \mu\text{m}$
- ✓ Caudal de filtrado de $70\ \text{m}^3/\text{h}$ cada uno, por lo que, para un funcionamiento 10 horas al día de la planta, son capaces de filtrar $2100\ \text{m}^3/\text{día}$.
- ✓ Superficie de filtrado = $11,9\ \text{m}^2$
- ✓ Longitud del filtro = $1524\ \text{mm}$



Figura 65. Filtros de cartucho. Fuente: Fluytec (2014)

4.2.5.2.- 1.3) Filtros de pre-capa

Son filtros de alta eficiencia para la remoción de sólidos en suspensión. Esta filtración es especialmente efectiva en soluciones que requieren un alto grado de pureza, soluciones con bajo contenido en sólidos (menor del 2-3%) y en sólidos de naturaleza pegajosa que son propensos a tapar medios filtrantes de otros tipos de filtros.

Al igual que en el caso de los filtros de arena, los hay abiertos y cerrados (5-10 micras). Ambos funcionan bajo el mismo principio, que consiste en un elemento de filtración que actúa como soporte y sobre el que se deposita una carga de material filtrante muy fino (carbón activo, diatomeas,...).

4.2.5.2.- 1.4) Microfiltración y Ultrafiltración

El principio es la separación física y es una operación dependiente de la temperatura. El tamaño del poro de la membrana determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la microfiltración, las membranas tienen un tamaño de poro comprendido entre 0,1-10 μm . Son capaces de retener todas las bacterias y parte de la contaminación viral (acoplada a las bacterias). Se utiliza en muchos tipos diferentes de tratamientos de agua.

Por otro lado, con la ultrafiltración se consigue la eliminación completa de los virus. Los poros de las membranas pueden retirar partículas de 0,001-0,1 μm .

Cabe mencionar que cuando la microfiltración y ultrafiltración se utilizan como pretratamiento de un agua, es muy importante el pre-tratamiento del agua, puesto que el ensuciamiento de la membrana puede perjudicar fácilmente el proceso de purificación.

4.2.5.2.- 2) Pretratamiento químico

Este tipo de pretratamiento está basado en la adición de unos reactivos determinados al agua de alimentación para variar sus propiedades y permitir una mejor operación. En nuestro caso se va a emplear un antiincrustante como pretratamiento químico, que se añadirá en el depósito donde se almacena el vertido industrial.

4.2.5.2.- 2.1) Desinfección

La desinfección del agua tiene por finalidad la eliminación de microorganismos, para evitar que estos proliferen en el resto de la instalación. Se encuentran presentes en el agua en grandes cantidades. Existen varios compuestos que se pueden añadir para lograr este fin, pero destaca el hipoclorito de sodio (NaOCl), el cual se añade en cantidades variables en función de la calidad del agua de alimentación. Este compuesto es una solución clara de ligero color amarillento y color característico. La incorporación de este al medio acuoso, actúa aumentando el pH, debido a la presencia de la soda caustica. Cuando se disuelve en agua, se generan dos sustancias que juegan el papel de oxidantes y desinfectantes. Estos son el ácido hipocloroso y el ion de hipoclorito (menos activo). El pH del agua determina la cantidad de ácido hipocloroso que se forma. Cuando se utiliza hipoclorito de sodio, se suele utilizar ácido acético para disminuir el pH. Sin embargo, se puede utilizar también el ácido sulfúrico como alternativa, además de obtener una menor producción de gases dañinos. El trabajar con hipoclorito de sodio presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas cabe destacar:

- Fácilmente transportado y almacenado
- Almacenamiento seguro
- Igual de efectivo que el gas cloro para desinfección

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desventajas:

- Es una sustancia peligrosa y corrosiva
- Hay que evitar el contacto con el aire, pues se produce la desintegración

No obstante, cuando el agua de alimentación es obtenida de pozos a gran profundidad, la contaminación biológica suele ser escasa, por lo que podemos omitir este paso realizarlo periódicamente cada 1-2 semanas, añadiendo dosis determinadas. Cabe mencionar que se producirá la acidificación del agua, disminuyendo los precipitados de carbonato pero aumentando la concentración de sulfatos (debido al ácido sulfúrico). Esto habría que tenerlo en cuenta en el tema de las incrustaciones que puedan producir en las membranas.

4.2.5.2.- 2.2) Coagulación

Es un tratamiento que se realiza para evitar la precipitación de compuestos orgánicos coloidales y sustancias inorgánicas en suspensión. Básicamente consiste en la adición de un reactivo químico denominado coagulante, el cual actúa desestabilizando las partículas. Dicha desestabilización hace que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Tras este proceso, será necesario, retener los aglomerados mediante un lecho filtrante.

4.2.5.2.-.2.3) Decloración

La decloración es una práctica que consiste en eliminar parcial o totalmente el cloro combinado residual presente en el agua. Esto se consigue neutralizando el cloro libre con un reactivo específico como puede ser el bisulfito sódico. Sin embargo, en el caso de nuestra instalación, no será necesario, puesto que las membranas son bastante resistentes.

4.2.5.2.- 2.4) Anti-incrustantes

Los anti-incrustantes son compuestos químicos que se caracterizan por evitar que las sales del agua poco solubles precipiten (se depositen) sobre cualquier superficie. En nuestro caso, debemos evitar la deposición fundamentalmente en las membranas. Generalmente estas sales son carbonatos, silicatos y sulfatos de calcio. Los compuestos anti-incrustantes suelen reaccionar con el calcio y el magnesio de manera que no puedan formar precipitados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los primeros anti-incrustantes utilizados fueron los basados en hexametáfosfatos. Estos solo evitan incrustaciones de sulfato de calcio, mientras que no son efectivos ante carbonato de calcio y tienen muchos problemas de estabilidad en solución acuosa. Por ello, se comenzaron a utilizar los basados en polímeros acrílicos. Sin embargo, los de última generación están basados en fosfonatos y poliacrilatos en solución estabilizada.

Para este diseño se va a emplear fosfonato, cuya aplicación se realizará en el depósito de almacenamiento de agua residual bruta proveniente de la actividad industrial. Este producto evitará la incrustación debida al carbonato cálcico, óxido de sílice, entre otros, en las membranas. Además, los fosfonatos evitan la incrustación de fluoruro de calcio e inhibe la deposición de metales como el hierro, aluminio y sílice.

Mediante un estudio realizado a partir de simulaciones con un software informático, se determina la cantidad necesaria de inhibidor de la incrustación para proteger el sistema. El software calculó el potencial de ensuciamiento de las sales con posibilidad de incrustación en las membranas y en base a los datos obtenidos determina las dosis óptima sin que se pierda rendimiento en las membranas. La dosificación variara en función de la calidad del agua a tratar.

4.2.5.3.- Unidad de Electrodialisis

La instalación diseñada estará constituida por 4 pilas en serie compuestas por 400 pares de célula por pila. Cada pila posee una etapa hidráulica y una eléctrica (figura 66).

La presión de trabajo será de 5 bares proporcionados por una bomba a la entrada de cada pila de EDR. Como se puede comprobar en las características de las membranas la presión de trabajo no supera la presión de ruptura de la membrana catiónica de 8 bares ni de la aniónica de 9 bares.

La máxima extracción de sales de una etapa hidráulica oscila entre un 40 y 60%, normalmente del 50%. Cada etapa hidráulica trabajara con una eliminación de sales del 50%. Esto quiere decir que en la etapa 1 la remoción de sales será el 50 %, en la etapa 2 es del 75 %, en la etapa 3 es del 87,5 % y en la etapa 4 es del 93,75 %.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Figura 66. Esquema etapas hidráulicas

Con una recuperación del 75%, la producción será de $1500\text{m}^3/\text{día}$. Hay que diferenciar entre porcentaje de recuperación y porcentaje de remoción de sales. El primero se refiere al rendimiento de la planta, es decir, la cantidad de agua producto respecto al agua de alimentación, mientras que el segundo se refiere a la calidad del agua, es decir, a la cantidad de sales que son eliminadas del agua de alimentación.

Una etapa eléctrica consta de un ánodo y un cátodo, cada uno en un extremo de la pila como muestra la figura 67:

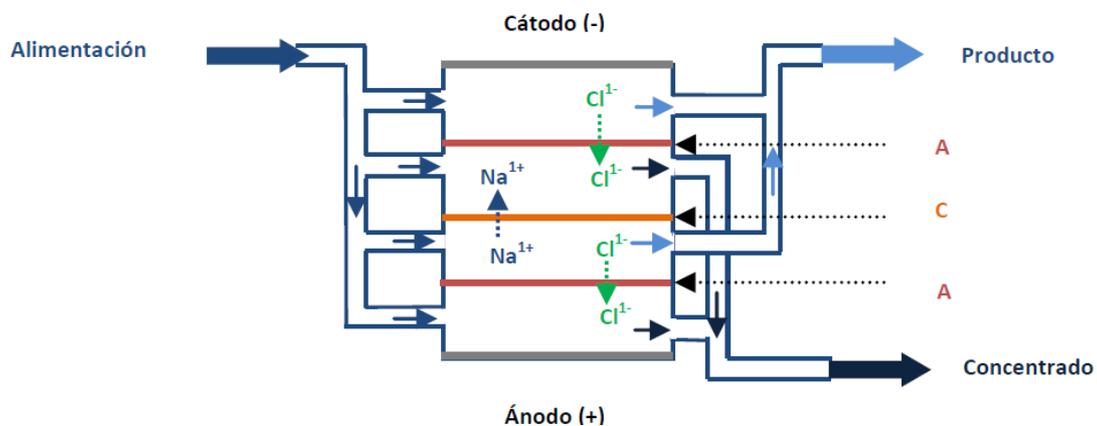


Figura 67. Pila con una etapa eléctrica

En la figura 68 se esquematiza una unidad de electrodiálisis de dos compartimientos con objeto de ilustrar el funcionamiento del proceso de electrodiálisis. Consta de un conjunto de membranas de intercambio iónico dispuestas alternativamente entre dos electrodos, de tal forma que dan lugar a dos compartimientos. Por el compartimiento diluido (D) circula la disolución cuyos iones se desean extraer, y por el concentrado (C), la disolución en la que dichos iones se van a concentrar.

Hay un tercer compartimento que es el de los electrodos, por donde fluye la solución con ácido clorhídrico para la limpieza de estos (apartado 4.2.5.4).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

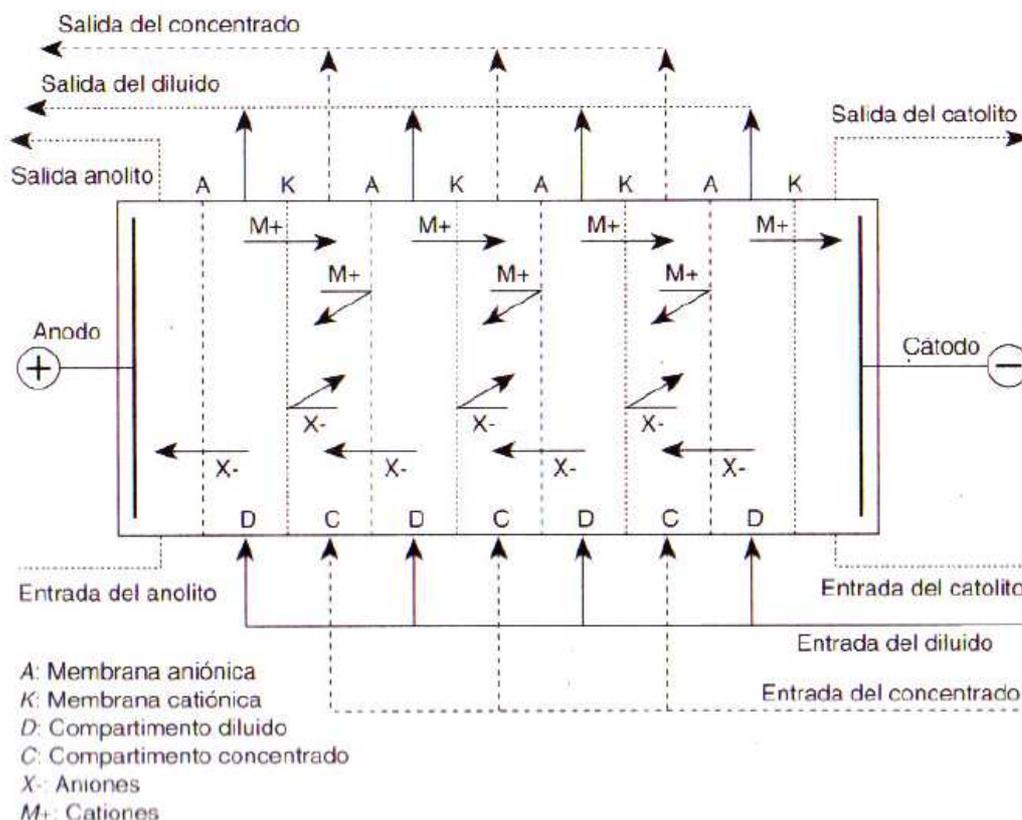


Figura 68. Esquema de funcionamiento de cada etapa hidráulica en la pila de EDR

De este modo, la salida del concentrado de una etapa es la entrada del concentrado de la siguiente, y la salida del diluido de una etapa es la entrada del diluido en la siguiente, hasta que la salida de la última etapa es el agua producto con una remoción de sales del 93,75 %. En la primera etapa el agua proveniente del pretratamiento se distribuye por ambos compartimentos y, a partir de esta primera etapa, es cuando se diferencia diluido (D) de concentrado (C) durante todo el proceso.

Como se ha dicho, las membranas deben ir de forma alternada, es decir, una membrana catiónica luego una aniónica, nuevamente una catiónica y así sucesivamente formando lo que se conoce como el módulo de electrodiálisis. Entre cada par de membranas se coloca un separador o espaciador que consiste de una malla plástica que proporciona canales de flujo a través de los cuales fluyen las soluciones, creando turbulencia lo que mejora la transferencia de iones, y además sirve de soporte a las membranas.

El espaciador de electrodo tiene seis hojas frente a uno normal que tiene dos. Esto le da un espesor de alrededor 3 mm y capacidad de pasar un gran caudal de agua por su interior, reduciendo incrustaciones y desgastes en el electrodo. La membrana gruesa se usa para compensar la ligera presión diferencial entre el compartimento de electrodo y el flujo principal de la pila.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El espaciador de electrodo tiene canales preformados que evitan que el agua del compartimiento de electrodos entre en los flujos principales de la pila.

En la figura 69 se ofrece una visión general de lo que ocurre en cada pila:

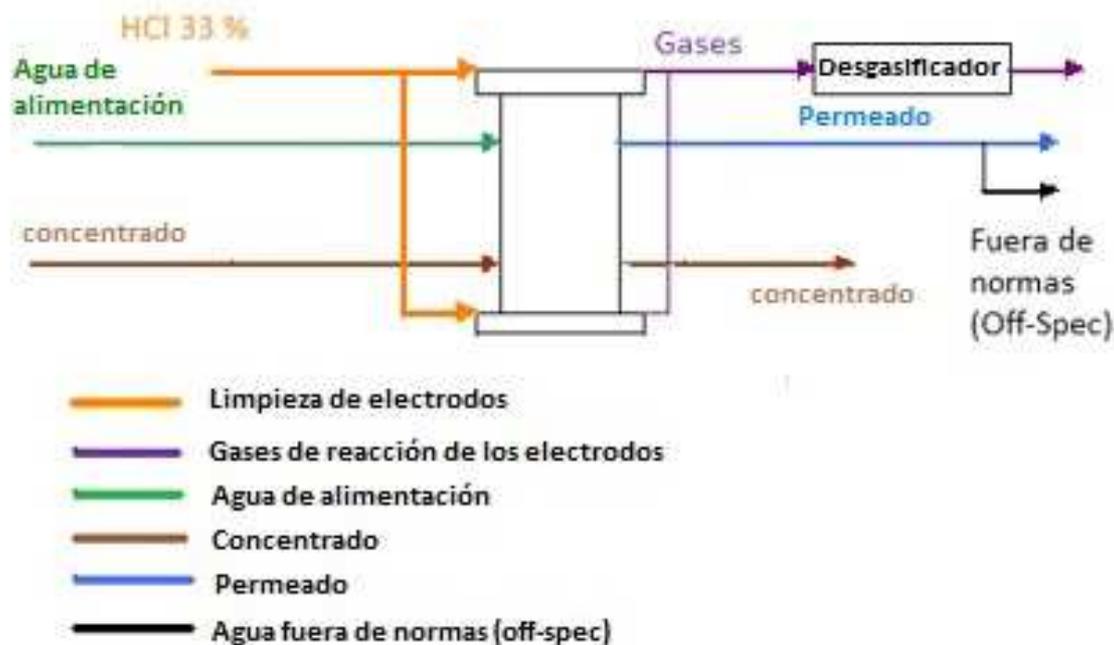


Figura 69. Esquema de una etapa hidráulica dentro una pila de EDR.

Fuente: modificado de Patricia Martínez Martínez (2012)

El cambio de polaridad invierte la dirección del movimiento de iones dentro de la pila de membranas, controlando de este modo la formación de la película de suciedad y la formación de incrustaciones. Con la inversión de polaridad se consigue que los flujos que anteriormente ocupaban compartimentos desmineralizados, se conviertan en flujos concentrados y los que anteriormente ocupaban los compartimentos de concentrado, ahora llegan a ser desmineralizados. Por tanto, en la inversión, válvulas automáticas cambian los dos flujos de entrada y salida, de modo que el agua de alimentación entrante fluya en los nuevos compartimentos desmineralizados, y el flujo de concentrado circula en los nuevos compartimentos de concentrado. El efecto de esta inversión crea un breve periodo de tiempo en el cual la salinidad del flujo de desmineralizado (agua producto) es mayor que el nivel especificado. Esta cantidad de agua de salinidad superior a la deseada se llama producto fuera de normas (*Off-Spec*) y es desechada junto con la salmuera.

En los compartimentos de los electrodos tienen lugar reacciones de oxidación-reducción, lo que provoca que el afluente del compartimiento del ánodo (electrodo positivo), contenga oxígeno gas (O_2), iones hidrogeno (H^+), y en el caso de aguas que contengan cloro, gas cloro (Cl_2). Los iones de hidrógeno reducen el pH del agua en este

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

compartimiento, creando una atmósfera ácida. El afluente del cátodo (electrodo negativo), contiene hidrógeno gas (H_2), e iones hidroxilo (OH^-). Estos iones OH^- , aumentan el pH del agua en este compartimiento, creando una atmósfera incrustante o alcalina.

Después de salir de la pila, los dos flujos de electrodos son enviados a un separador de gas para eliminar y sacar al exterior, de un modo seguro, los gases producidos en la reacción de los electrodos

El proceso puede realizarse en continuo, no siendo imprescindible el depósito para su almacenamiento, y siendo esta técnica la más utilizada cuando lo que se aprovecha directamente es el permeado. Por otro lado, el permeado puede almacenarse en un depósito de PVC para cuando el uso para el que esté destinado el agua sea intermitente como, por ejemplo, el riego de cultivos.

4.2.5.4.- Limpieza de membranas y electrodos

El agua de alimentación puede contener sustancias que se depositen sobre las membranas o que queden retenidas provocando la polarización de las mismas. Esto produce un aumento brusco de la resistencia eléctrica de la celda, dando lugar a un mayor consumo específico de energía en el proceso. También disminuye la eficacia de la corriente, aumentando de nuevo el consumo específico de energía, requiere un área de membrana mayor para una producción determinada y supone mayores costes fijos y variables. Podemos encontrarnos con tres tipos de polarización: por concentración, envenenamiento y por incrustación. Este último produce la oclusión de los poros en las membranas aniónicas y precipitación en las catiónicas.

Por ello, para mantener el buen funcionamiento de las membranas, es fundamental llevar a cabo limpiezas de las pilas. Nos podemos encontrar con tres formas de limpieza:

- Continuamente por cambio de polaridad
- Periódicamente por limpieza química
- Ocasionalmente, desmontando y limpiando las membranas manual e individualmente.

En el caso de la presente instalación la limpieza de las membranas se realiza de dos maneras:

- ✓ De forma continua debido al cambio de polaridad de los electrodos por medio de válvulas motorizadas las cuales intercambian las salidas del acumulador de

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

membrana del agua potable producto y del agua residual. Los iones son transferidos así en direcciones opuestas a través de las membranas. Este cambio de polaridad limpia las membranas debido a que:

1. Rompe la capa de polarización 3 ó 4 veces cada hora, evitando incrustaciones y polarizaciones.
 2. Rompe incrustaciones recientes y las elimina antes de que puedan crecer y dar lugar a problemas.
 3. Reduce la suciedad o formaciones similares sobre la superficie de las membranas por inversión eléctrica del movimiento de las partículas coloidales.
 4. Elimina la complejidad de problemas prácticos asociados a la necesidad de alimentación continua de ácidos u otros productos químicos
 5. Limpia automáticamente los electrodos con ácido formado durante la etapa anódica.
- ✓ Limpieza química mediante la recirculación de la salmuera. La recirculación con salmuera consiste en hacer circular disoluciones de NaCl con lo que se consigue desregular el equilibrio osmótico entre los microorganismos presentes y el medio. Se realizará cada 4 semanas (a no ser que el fabricante especifique periodo de tiempo) o cuando sea necesario por problemas de funcionamiento.

Además, se recomienda una limpieza con ácido clorhídrico periódicamente en todas las unidades. La concentración de ácido a recircular por el sistema debe ser del 5 % aproximadamente. La frecuencia recomendada de limpieza varía entre las 200 a las 2000 horas. En concreto, para esta planta será cada 1000 horas de funcionamiento.

Durante el proceso de limpieza de la unidad se suspende la operación normal. La disolución química de limpieza se bombea al interior del sistema desde el tanque de limpieza química.

El ácido clorhídrico posee las siguientes características:

- ✓ elimina las incrustaciones de carbonato cálcico y dióxido de carbono
- ✓ elimina el sulfato cálcico mejorando su solubilidad.
- ✓ Cuando se sospecha de la existencia de graves incrustaciones de sulfato, se recomienda dejar a la unidad con la disolución ácida en su interior durante toda la noche para conseguir su máxima efectividad.
- ✓ ayuda a eliminar los iones de hierro, aluminio, manganeso y otros metales pesados. En nuestro caso el agua a tratar carece de estos iones o se tienen una concentración baja.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de limpieza química de los electrodos es una rutina de mantenimiento preventivo usado para eliminar las incrustaciones o ensuciamiento del compartimento de los electrodos mediante inyección de ácido clorhídrico del 33% de concentración en los mismos.

4.2.5.5.- Postratamiento del agua obtenida

El agua producida mediante el proceso de electrodiálisis se caracteriza por tener bajos niveles alcalinidad y de calcio. Estos valores tan bajos hacen que el agua se convierta en corrosiva, no siendo apta por la normativa.

Para la planta en cuestión se realizará el postratamiento en función del uso al que se destine el agua tratada:

- Uso agrícola: el postratamiento viene definido en el RD 1620/2007
- Uso recreativo: el postratamiento viene definido en el RD 1620/2007
- Uso industrial: recuperación de la alcalinidad

Los postratamientos más comunes son:

- Descarbonatación o desgasificación
- Recuperación de la alcalinidad
- Desinfección

4.2.5.5.-.1) Descarbonatación o desgasificación

El agua suele contener gases como materia disuelta. Los elementos más comunes son el oxígeno y el dióxido de carbono. Esta técnica consiste en hacer pasar agua por la parte superior mediante difusores haciendo que este resbale sobre el material de una columna de relleno o bien desciende a través de platos perforados. Al mismo tiempo un gas (aire) es inyectado por la parte inferior y a contracorriente. Con esto, se consigue eliminar el dióxido de carbono (90-95%).

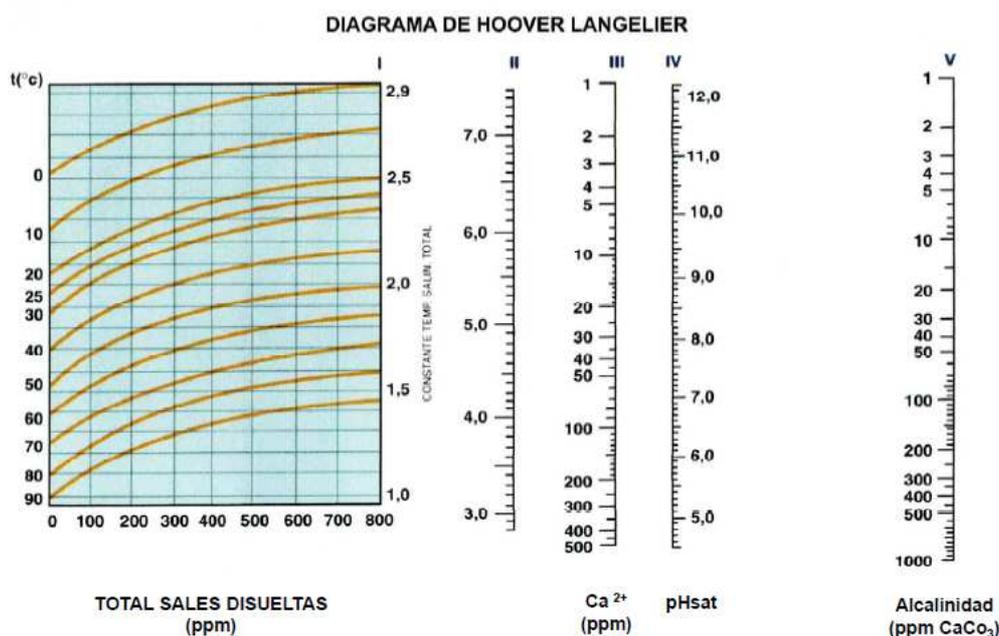
No obstante, en el caso del presente trabajo, no será necesario, puesto que el dióxido de carbono se produce por adición de ácidos en el pretratamiento, lo cual no se ha llevado a cabo. Por lo tanto, el dióxido de carbono que está presente en el agua es el que contenía el agua de alimentación y la eliminación del mismo convertiría el agua en agresiva. Para ello, antes de realizar el barrido con aire, se aumenta su pH con cal. No se aconseja utilizar NaOH, pues como ya se indicó anteriormente, el sodio provoca problemas de permeabilidad, infiltración e incrustaciones en los suelos de cultivos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2.5.5.-2) Recuperación de alcalinidad

Para conseguir equilibrar el agua, se utilizan ciertos productos químicos como el carbonato de calcio y el dióxido de carbono, que actúan regulando el pH y aumentando el contenido de calcio en el agua. Para esta regulación se suele acudir al índice de Langelier con el objetivo de conocer si el agua es agresiva o incrustante.

Los datos de partida necesarios son: STD (ppm), Ca^{2+} (ppm), alcalinidad (ppm de CaCO_3), temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$). Estos datos se aplican al diagrama de Hoover Langelier para obtener el pH de saturación. Por último al pH del agua se le resta este pH_{sat} . Si el resultado es mayor de 0,5 el agua será incrustante y si es menor será agresiva.



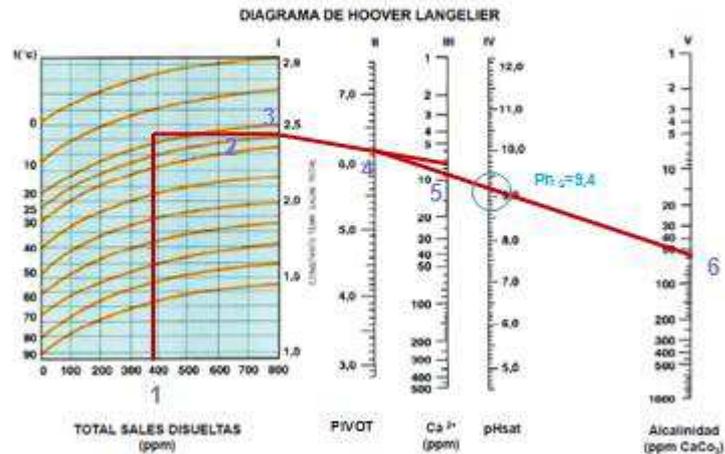
Elementos	Producto (kg)	Producto (ppm)
STD	647,9575	431,9717
Ca^{2+}	11,68375	7,7892
Mg^{2+}	17,55125	11,7008
Na^+	188	125,3333
K^+	3,12625	2,0842
HCO_3^-	56,43375	37,6225
Cl^-	230,33375	153,5558
SO_4^{2-}	134,375	89,5833
F^-	0,40625	0,2708
NO_3^{2-}	6,0475	4,0317
PO_4^{3-}	0,00875	0,0058
SiO_2	4,775	3,1833

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$$I_{Lang} = pH_{real} - pH_{sat}$$

CÁLCULO DEL INDICE LANGELIER
MÉTODO DIRECTO: DIAGRAMA DE HOOVER & LANGELIER
TDS: 431 mg/l; Temperatura 20°C ; Ca 8 mg/l; Alcalinidad 40 mg/l; pH 7

$$pH_{sat} = pCa + pAlc + C(TDS, T^A)$$



pH agua=7

$$I_{Lang} = pH_{real} - pH_{sat} = 7 - 9,4 = -2,4$$

En cuanto al carbonato de cálcico, este debe ser amorfo (calcita). Es importante que dicho compuesto carezca de hierro, ya que produce precipitaciones que conllevan al ensuciamiento. Por último, la cantidad de dióxido de carbono necesario vendrá determinado por factores como el pH, dureza, índice de Langelier, etc.

4.2.5.5.-.3) Desinfección

Si hubiese sido importante en caso de ser utilizada como agua de abasto, donde habría que cumplir con la normativa sanitaria. Cabe mencionar que la toxicidad más común a partir de agua de riego en las plantas es debido al cloro, pues no es absorbido por el suelo, por lo que va circulando por la superficie hasta que lo absorbe la planta y se acumula principalmente en sus hojas. Como ya se ha indicado en apartados anteriores, si las cantidades acumuladas sobrepasan la tolerancia de la planta, se producen quemaduras de las hojas y necrosis. Eso hay que tenerlo en cuenta sobre todo en aquellos cultivos que sean muy sensibles (las tolerancias varían en función de la sensibilidad del cultivo).

5. CONCLUSIONES

El trabajo realizado permite obtener las siguientes conclusiones:

- La Electrodiálisis reversible EDR, es un proceso de membranas con un alto porcentaje de rechazo de sales (en torno al 90%), que se puede variar en función del número de etapas hidráulicas del proceso. Su bajo porcentaje de agua rechazada (en torno al 15%) indica su eficiencia, transformando el 85% del agua bruta en agua producto (permeado) siendo el resto la salmuera concentrada.
- La desalación de efluentes industriales mediante electrodiálisis reversible, es un tratamiento avanzado que ofrece un amplio abanico de posibilidades de reuso del agua producto conforme a las exigencias legislativas actuales de reutilización de agua residual y producción de agua regenerada.
- La desalación de efluentes industriales mediante electrodiálisis reversible es la opción más viable tanto energética como económicamente respecto a los demás procesos cuando la salinidad del agua está entre 500 a 3000 mg/l. Esto es debido principalmente a que las membranas de la EDR son más baratas, tienen menos problemas de ensuciamiento y más vida útil que las de OI.
- Se considera un proceso idóneo, cuando el efluente industrial posee especies cargadas eléctricamente, como sales minerales tipo nitratos, fosfatos, sulfatos, y cloruros, entre otras. Su optimización se consigue mediante el control de las sales incrustantes, utilizando un software que calcula la adición de productos antiincrustantes en tiempo real.

6.ANEXOS

Anexo 1. Tablas del RD 1620/2007

Anexo 1A. Tabla de usos y las calidades de agua del Real Decreto 1620/2007 (BOE, 2007).

Tabla 1: Comparación entre los usos y criterios de calidad del agua a reutilizar según el Real Decreto 1620/2007 para España y los usos recogidos por Levine y Asano (2004) según la adaptación de la Environmental Protection Agency de USA

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA	
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos
Uso Urbano			
1.1 Residencial: riego de jardines privados y descarga de aparatos sanitarios	Nematodos intestinales < 1 huevo/10 L Escherichia coli = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU	Sin restricción de acceso: Riego de jardines, sistemas contra incendios, construcción, fuentes, usos en edificios (lavabos, aire acondicionado)	DBO ≤ 10 mg/L Turbidez ≤ 2 NTU CF = ND Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9
1.2 Servicios: Riego de zonas verdes urbanas, baldos de calles, sistemas contra incendios, lavado industrial de vehículos	Nematodos intestinales < 1 huevo/10 L Escherichia coli <200 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Riego de zonas con acceso restringido: Campos de Golf, cementerios, usos residenciales, cinturones verdes	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9
Riego agrícola			
2.1 Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco	Nematodos intestinales < 1 huevo/10 L Escherichia coli <100 UFC /100 mL* Sólidos en suspensión <20 mg/L Turbidez ≤ 10 NTU	Cultivos comestibles: Cultivos para consumo humano sin cocinar	DBO ≤ 10 mg/L TSS ≤ 2 mg/L CF ≤ ND/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9

6. ANEXOS

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA	
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos
2.2 Riego de productos para consumo humano con tratamiento industrial posterior Riego de pastos Acuicultura	Nematodos intestinales < 1 huevo/10 L Escherichia coli <1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L	Cultivos no comestibles o que necesitan procesamiento: Forrajes, fibras, cultivos de semillas, pastos, viveros comerciales, granjas de cásperd, acuicultura	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl ₂ residual = 1 mg/L pH 6-9
2.3 Riego de cultivos leñosos que impida el contacto del agua con los frutos, flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo, cultivos industriales no alimentarios, forrajes, cereales y semillas oleaginosas	Nematodos intestinales < 1 huevo/10 L Escherichia coli <10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L		
Uso Industrial			
3.1 Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria y otros usos industriales.	Nematodos intestinales - Sin límite Escherichia coli <10000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L Turbidez ≤ 15 NTU	Sistemas de refrigeración, aguas de proceso, aguas de caldera, actividades de construcción y aguas de limpieza	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L
Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	Nematodos intestinales - 1 huevo/10 L Escherichia coli <1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <35 mg/L		
3.2 Torres de refrigeración y condensadores evaporativos	Nematodos intestinales - 1 huevo/10 L Escherichia coli = 0 UFC /100 mL Sólidos en suspensión <5 mg/L Turbidez ≤ 1 NTU		

6. ANEXOS

Real Decreto 1620/2007 – España		Levíne y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA	
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos
Usos Recreativos			
4.1 Riego de campos de golf	<p>Nematodos intestinales - 1 huevo/10 L</p> <p>Escherichia coli = 200 UFC /100 mL</p> <p>Sólidos en suspensión < 20 mg/L</p> <p>Turbidez ≤ 10 NTU</p>	Incluidos en el riego de zonas con acceso restringido	<p>DBO ≤ 30 mg/L</p> <p>TSS ≤ 30 mg/L</p> <p>CF ≤ 200/100 mg/L</p> <p>Cl₂ residual = 1 mg/L</p> <p>pH 6-9</p>
4.2 Estanques, masas de agua y caudales circulares ornamentales en los que está impedido el acceso al público	<p>Escherichia coli = 10000 UFC /100 mL</p> <p>Sólidos en suspensión < 35 mg/L</p>	Pesca, remo y otras actividades recreativas sin contacto directo con el cuerpo humano	<p>DBO ≤ 30 mg/L</p> <p>Turbidez ≤ 2 NTU</p> <p>CF ≤ ND mg/L</p> <p>Cl₂ residual = 1 mg/L</p> <p>pH 6-9</p>
Prohibido en España		Masas de agua sin restricciones en el contacto con el cuerpo humano (natación, etc.)	<p>DBO ≤ 10 mg/L</p> <p>TSS ≤ 30 mg/L</p> <p>CF ≤ 200/100 mg/L</p> <p>Cl₂ residual = 1 mg/L</p> <p>pH 6-9</p>
			Secundario y Desinfección
			Secundario y Desinfección
			Secundario, Filtración y Desinfección

6. ANEXOS

Real Decreto 1620/2007 – España		Levine y Asano (2004) – Aplicaciones típicas, adaptadas de US EPA		
Usos del agua	Criterios de calidad	Uso del agua regenerada	Objetivos	Tratamientos
Usos ambientales:				
5.1 Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno	Escherichia coli = 1000 UFC /100 mL Sólidos en suspensión < 0 mg/L	Recarga de acuíferos, recuperación, control de la intrusión marina y control de la subsistencia	Específicos para cada caso	
	5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa			
5.3 Riego de bosques, zonas y de otro tipo no accesible al público Silvicultura	Turbidez ≤ 2 NTU			
5.4 Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares)	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso	Humedales artificiales, mejora de humedales naturales y sostenimiento de cauces	DBO ≤ 30 mg/L TSS ≤ 30 mg/L CF ≤ 200/100 mg/L Cl2 residual = 1 mg/L pH 6-9	Secundario, Desinfección

ND = No detectados

UFC = Unidades formadoras de colonias

TSS = Total de sólidos disueltos

CF = Coliformes fecales

* realizando un muestreo a tres días con valores fijados

6. ANEXOS

Anexo 1B. Tabla de frecuencia mínima de muestreo y análisis de cada parámetro.

El control deberá realizarse a la salida de la planta de regeneración, y en todos los puntos de entrega al usuario.

La frecuencia de análisis se modificará en los siguientes supuestos:

- i. Tras 1 año de control se podrá presentar una solicitud motivada para reducir la frecuencia de análisis hasta un 50%, para aquellos parámetros que no sea probable su presencia en las aguas.
- ii. Si el número de muestras con concentración inferior al VMA del Anexo I.A es inferior al 90% de las muestras durante controles de un trimestre (o fracción, en caso de periodos de explotación inferiores), se duplicará la frecuencia de muestreo para el periodo siguiente.
- iii. Si el resultado de un control supera al menos en uno de los parámetros los rangos de desviación máxima establecidos en el Anexo I.C, la frecuencia de control del parámetro que supere los rangos de desviación se duplicará durante el resto de este periodo y el siguiente.

Las frecuencias mínimas de análisis se especifican en la tabla siguiente:

USO	CALIDAD	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SS	TURBIDIZ	N y PT	OTROS CONTAMINANTES	OTROS CUESTOS	
1.- USO URBANO	1.1 y 1.2	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana	---		Mensual	
	2.1	Quincenal	Semanal	Semanal	Semanal	---		Mensual	
	2.2	Quincenal	Semanal	Semanal	---	---		Quincenal	
2.- USO AGRARIO	2.3	Quincenal	Semanal	Semanal	---	---		---	
	3.1	---	Semanal	Semanal	Semanal	---		Mensual	
	3.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	---	El Organismo de cuenca valorará la frecuencia de análisis sobre la base de la autorización de vertido y del tratamiento de regeneración.	Legionella spp. 3 veces semana	
4.- USO RECREATIVO	4.1	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana	---		---	---
	4.2	---	Semanal	Semanal	---	Mensual		---	---
5.- USO AMBIENTAL	5.1	---	2 veces semana	Semanal	---	Semanal		---	---
	5.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	Semanal		---	Semanal
	5.3	---	---	Semanal	---	---		---	---
	5.4								Frecuencia igual al uso más similar

Anexo 1C. Tabla de evaluación de la calidad de las aguas regeneradas

La calidad de las aguas regeneradas se valorará mediante el análisis de muestras tomadas sistemáticamente en todos los puntos de entrega de las mismas y con las frecuencias mínimas previstas en el Anexo I.B.

CRITERIOS DE CONFORMIDAD

La calidad de las aguas regeneradas se considerará adecuada a las exigencias de este real decreto si en los controles analíticos de un trimestre, o fracción cuando el periodo de explotación sea inferior, cumple simultáneamente:

- I. El 90% de las muestras tendrá resultados inferiores a los VMA en todos los parámetros especificados en el Anexo I.A.,
- II. Las muestras que superen el VMA del Anexo I.A. no sobrepasen los límites de desviación máxima establecidos a continuación
- III. Para las sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las Normas de Calidad Ambiental en el punto de entrega de las aguas regeneradas según la legislación propia de aplicación

PARÁMETRO	LÍMITE DE DESVIACIÓN MÁXIMA*
Nematodos intestinales	100% del VMA
<i>Escherichia coli</i>	1 unidad logarítmica
<i>Legionella spp</i>	1 unidad logarítmica
<i>Taenia saginata</i>	100% del VMA
<i>Taenia solium</i>	100% del VMA
Sólidos en suspensión	50% del VMA
Turbidez	100% del VMA
Nitratos	50% del VMA
Nitrógeno Total	50% del VMA
Fósforo Total	50% del VMA
*Se entiende por desviación máxima la diferencia entre el valor medido y el VMA	

MEDIDAS DE GESTIÓN FRENTE A INCUMPLIMIENTOS

- 1º. Se procederá a la suspensión del suministro de agua regenerada en los casos en los que no se cumplan los criterios de conformidad I e II anteriores.
- 2º. Si en un control se superan en un parámetro los límites de desviación máxima de la tabla anterior, se procederá a realizar un segundo control a las 24 horas. En el caso de persistir esta situación se procederá a la suspensión del suministro.
- 3º. El suministro se reanudará cuando se hayan tomado las medidas oportunas en lo relativo al tratamiento para que la incidencia no vuelva a ocurrir, y se haya constatado que el agua regenerada cumple los VMA del Anexo I.A. durante cuatro controles efectuados en días sucesivos.
- 4º. En los casos de incumplimiento descritos en los apartados 1º, 2º y 3º será de aplicación la modificación de frecuencias de control prevista en el Anexo I.B.

ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS

Los métodos o técnicas analíticas de referencia que se proponen en este Anexo se tomarán como referencia o guía. Se podrán emplear métodos alternativos siempre que estén validados y den resultados comparables a los obtenidos por el de referencia. Para el caso del análisis de contaminantes deberán cumplir los valores de incertidumbre y límite de cuantificación especificados en la tabla correspondiente. Los análisis deberán ser realizados en laboratorios de ensayo que dispongan de un sistema de control de calidad según la Norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

MICROBIOLÓGICOS

PARAMETRO	METODOS O TÉCNICAS ANALÍTICAS DE REFERENCIA
Nematodos intestinales	Método Baillinger modificado por Bouchoum & Schwartzbrod. "Analysis of wastewater for use in agriculture" Aynas & Mara O.M.S. (1996)
<i>Escherichia coli</i>	Recuento de Bacterias <i>Escherichia Coli</i> β- Glucuronidas a positiva
<i>Legionella spp.</i>	Norma ISO 11731 parte 1: 1998 Calidad del Agua. Detección y enumeración de <i>Legionella</i> -
<i>Taenia saginata</i>	
<i>Taenia solium</i>	

CONTAMINANTES

PARAMETRO	TÉCNICA DE REFERENCIA	U ¹	LC ²
Sólidos en suspensión	Gravimetría con filtro de fibra de vidrio	30%	5 mg/L
Turbidez	Nefelometría	30%	0,5 UNT
Nitratos	Espectroscopia de absorción molecular Cromatografía iónica	30%	10 mg NO ₃ -L
Nitrógeno Total	Suma de Nitrógeno Kjeldahl, nitratos y nitritos Autoanalizador	30%	3 mg N/L
Fósforo Total	Espectroscopia de absorción molecular	30%	0,5 mg P/L
Sustancias Peligrosas	Cromatografía Espectroscopia	Metales: 30% Orgánicos: 50%	30% de NCA

¹ Incertidumbre máxima expresada con un factor de cobertura de 2.

² Límite de cuantificación, es decir, concentración mínima de interés que puede determinarse con el nivel de incertidumbre requerido en la tabla.

6. ANEXOS

Anexo 2. Tabla de relación de los compuestos emergentes analizados en los puntos de la red local, depósito, efluente e influente (tratamiento terciario) en el Delta del Llobregat.

Fármacos	N-acetyl-4-amino-antipirine (4-AAA)	Hexachlorobenzene
4-amino-antipirine (4-AA)	Naproxen	Pentachlorobenzene
4-dimethylaminoantipirine (4-DAA)	N-formyl-4-amino-antipirine (4-FAA)	Alfa-hexachlorocyclohexane
4MAA	Nicotine	Beta-hexachlorocyclohexane
Acetaminophen	Ofloxacin	Gamma-hexachlorocyclohexane (lindane)
Antipyrine	Omeprazole	Delta-hexachlorohexane
Atenolol	Paraxanthine	Alachlor
Benzafibrate	Paroxetine	Tetra-brominated diphenyl ether
Biphenylol	Propranolol hydrochloride	Penta-brominated diphenyl ether 2
Caffeine	Ranitidine	Penta-brominated diphenyl ether 3
Carbamazepine	Salbutamol	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
Carb,Epoxide	Sotalol	Acenafteno
Cefotaxime	Sulfamethoxazole	Acenaftileno
Chlorophene	Terbutaline	Antraceno
Ciprofloxacin	Triclosan	Benzo (b) fluoranteno
Clofibric acid	Trimethoprim	Benzo (a) antraceno
Codeine	Productos de higiene personal	Benzo (a) fluoranthene
Diatrizoate	3-(4-methylbenzylidene) camphor	Benzo (a) pireno
Diazepan	Benzophenone-3	Benzo (k) fluoranteno
Diclofenac	Celestolide	Chrysene
Erythromycin	Ethylhexyl methoxycinnamate	Fluoranteno
Fenofibrate	Galaxolide	Fluoreno
Fenofibric Acid	Octocrylene	Naftaleno
Fenoprofen	Octyl-triazone	Fenantreno
Fluoxetine	Phantolide	Pireno
Furosemide	Tonalide	Otros contaminantes prioritarios
Gemfibrozil	Traseolide	2,3,7,8-tetrachloro-dibenzo-p-dioxin
Hydrochlorothiazide	Metales	2,7/2,8-dichloro-dibenzo-p-dioxin
Ibuprofen	Ni	Alpha-Endosulfan
Indomethacine	Cd	Atrazine
Ketoprofen	Hg	Beta-endosulfan
Ketorolac	Pb	Chlorfenvinphos
Mefenamic Acid	Contaminantes prioritarios volátiles	Chlorpyrifos-Methyl
Mepivacaine	1,2,3-trichlorobenzene	Diuron
Methylprednisolone 8-alpha sodium succinate (Urbason)	1,2,4-trichlorobenzene	Endosulfan sulphate
Metoprolol	1,3,5-trichlorobenzene	Isoproturon
Metronidazole	Hexachloro 1,3-butadiene	Simazine

* Para facilitar la consulta de los compuestos se ha optado por conservar la terminología anglosajona

6. ANEXOS

Anexo 3. Energías renovables en la desalación

Tabla 1. Centrales eléctricas: tecnología, potencia, disponibilidad e inversión.

Tecnología	Potencia instalada tipo (kW)	Inversión media (€/kW)	N.º horas efectivas anuales
Nuclear	1.300.000	2.100	8.075
Carbón	500.000	850	6.580
Ciclo combinado gas	400.000	400	3.516
Turbina de gas	100.000	300	3.516
Minihidráulica	10.000	1.200	1.880
Eólica	(por cada máquina) 2.000	900	1.890
Solar fotovoltaica	(por cada m ² de panel) 0,15	6.000	1.500
Solar termoeléctrica	(proyectos en construcción)	2.700	2.500

Fuente: UNESA, VGB, EUROELECTRIC y MITYC

Tabla 2. Centrales eléctricas: emisiones de CO₂ por tipo de central

Planta de generación eléctrica	Emisiones de CO ₂ en kg/kWh
Carbón	0,8 a 1,2
Petróleo	0,76
Gas natural	0,36 a 0,58
Nuclear	0,02
Hidráulica	0,005
Fotovoltaica	0
Eólica	0

Fuente: Vivar (2004)

6. ANEXOS

Tabla 3. Coste de generación de energía de origen renovable, por tecnologías

	Eólica	Solar fotovoltaica	Solar termoeléctrica	Solar térmica baja temperatura ACS*
Inversión (€/kW)	900	6.000	2.700	1.000
Horas efectivas de funcionamiento	1.890	1.500	2.500	2.500
Período amortización (años)	20	20	20	20
Coste amortización (€/kWh)	0,024	0,200	0,054	0,020
Coste operación y mantenimiento (€/kWh)	0,014	0,014	0,014	0,014
Coste de capital 5% (€/kWh)	0,014	0,121	0,033	0,012
Total costes (€/kWh)	0,053	0,335	0,101	0,046
Precio venta regulado (€/kWh)	0,066 (<15 años); 0,058 (>15 años)	0,42	0,22	–

* Para producción de calor (no de electricidad). Datos en unidades equivalentes.

Tabla 4. Coste de la energía de origen renovable en función de la inversión unitaria. La disponibilidad anual de la planta y el coste de oportunidad de la inversión.

Coste oportunidad inversión		5%			10%		
Coste energía (€/kWh)		0,048	0,060	0,072	0,048	0,060	0,072
Número de horas efectivas de funcionamiento							
Inversión (€/kW)	Menos de 600	1.300	–	–	1.960	–	–
	De 600 a 800	1.800	1.340	–	2.620	1.470	–
	De 800 a 1.000	2.200	1.675	1.340	–	1.960	1.560
	De 1.000 a 1.200	2.600	2.010	1.605	–	2.450	1.950
	De 1.200 a 1.400	–	2.345	1.875	–	–	2.340
	De 1.400 a 1.600	–	–	2.140	–	–	–
	De 1.600 a 1.800	–	–	2.410	–	–	–

Nota: Se ha supuesto un coste de operación y mantenimiento similar con todas las fuentes energéticas, para simplificar los cálculos, de 0,012 €/kWh, sin tener en cuenta el factor de escala ni el tipo de sistema de generación. Se han utilizado otras dos hipótesis del coste de oportunidad para el inversor, del 5% y del 10%, que se ha imputado al coste del kWh generado.

6. ANEXOS

Tabla 5. Costes de producción de agua de mar desalada utilizando energía eólica. Variación de los costes, según la disponibilidad anual de la planta eólica.

	Aislado de la red funcionamiento discontinuo				Conectado a red funcionamiento continuo			
	1800/0	2000/0	2200/0	2400/0	1800/6484	2000/5884	2200/5684	2400/5484
Horas ER / Horas red								
Coste energía eólica €/kWh	0,052	0,048	0,045	0,042	0,052	0,048	0,045	0,042
Amortización planta desalación OI (€/m ³)	0,500	0,450	0,409	0,375	0,114	0,114	0,114	0,114
Coste energía y operación (€/m ³)	0,319	0,303	0,291	0,279	0,307	0,303	0,300	0,296
Coste oportunidad (€/m ³)	1,472	1,242	1,068	0,925	0,089	0,089	0,089	0,089
Coste total agua (€/m ³)	2,291	1,995	1,768	1,579	0,510	0,506	0,503	0,498

Nota: se ha considerado una inversión del aerogenerador de 900 €/kW, un coste de operación de 0,012 €/kW y un coste de oportunidad de la inversión del 5%. El sistema de desalación por ósmosis inversa se ha supuesto que requiere una inversión de 750 €/m³/día, una disponibilidad del 90%, un consumo energético de 4 kWh/m³, unos costes de mano de obra y consumibles de 0,11 €/m³; también se ha supuesto un coste de oportunidad de la inversión del 5%. El coste de energía adquirida a la red se ha supuesto de 0,048 €/kWh.

Anexo 4. Propiedades dadas por los fabricantes de algunas membranas intercambiadoras comercialmente representativas (Rautenbach, 1989 y Korngold, 1984)

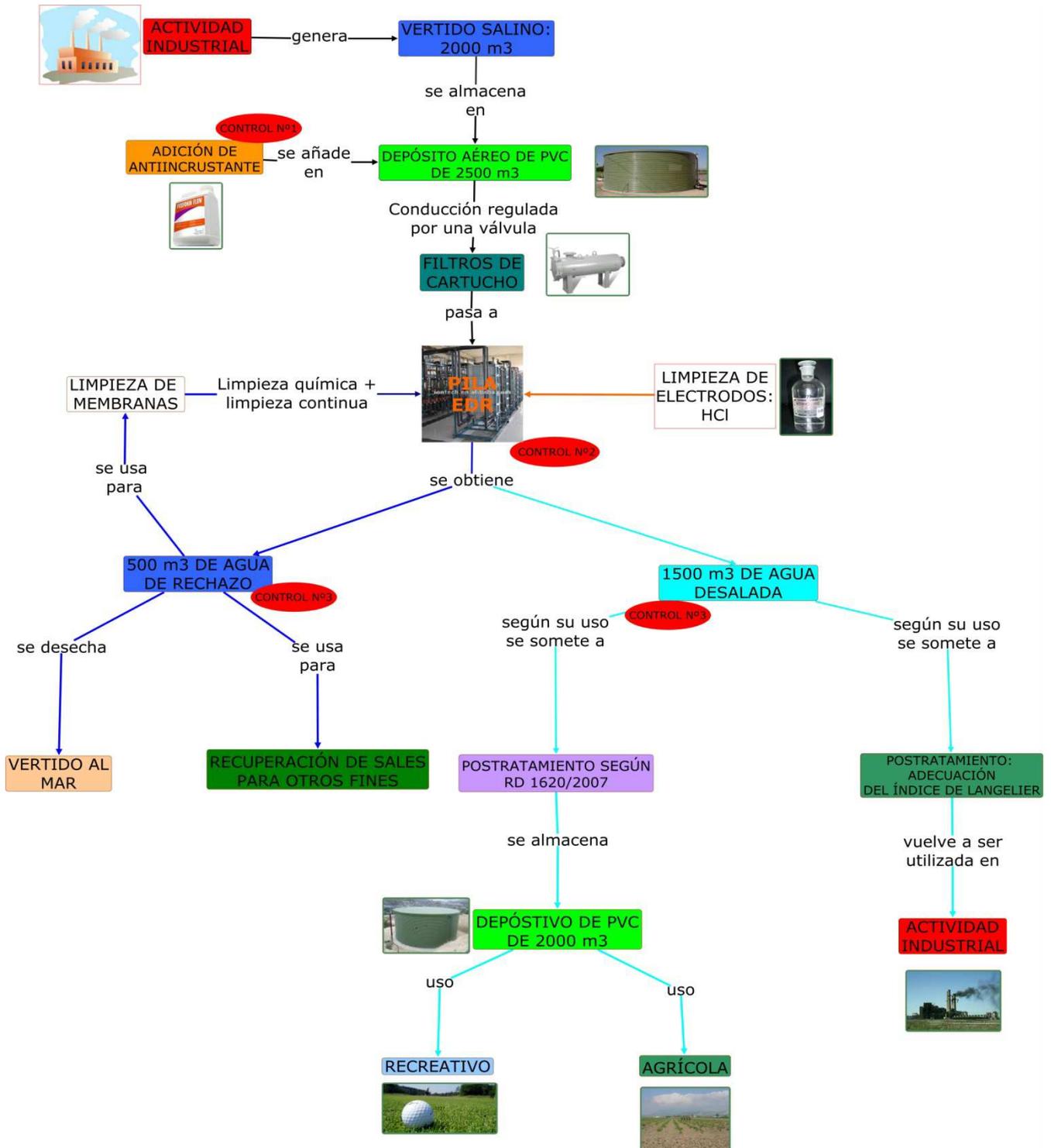
Tabla 1.1
Propiedades de algunas de las Membranas de Intercambio Iónico dadas por los Fabricantes.

Fabricante y Nombre de la Membrana	Tipo	Resistencia Eléctrica Específica ($10^{-1} \Omega \text{ m}^2$)	Capacidad de Intercambio (moq g^{-1})	Cationes r^{+++} [0.5 / 1.0 N (NaCl)]	Aniones r^{--} [0.5 / 1.0 N (NaCl)]	Espesor (mm)	Estabilidad (bar)	Contenido en Agua (seco)
Ashai Glass Co (Seleminon)								
CMV	C	2.0 - 3.5	3.0 - 4.0	> 0.91		0.11 - 0.15	0.3 - 0.5	0.55 - 0.65
CSV	C	10.0		> 0.92		0.30	0.3 - 0.5	
AMV	A	2.0 - 3.5	2.6 - 3.1		> 0.93	0.11 - 0.15	0.3 - 0.5	0.32 - 0.43
ASV	A	3.0 - 4.5			> 0.95 / < 0.008	0.11 - 0.15	0.3 - 0.5	
Tokuyama Soda (Neosepta)								
[0.5 N (NaCl)]								
CL-25 T	C	2.2 - 3.0	1.5 - 1.8	> 0.98	< 0.02	0.15 - 0.17	0.3 - 0.5	0.25 - 0.35
AF-4 T	A	1.8 - 2.5	1.8 - 2.5	0.790-28				
CMS	C	1.5 - 2.5	2.0 - 2.4	< 0.02	> 0.98	0.15 - 0.20	0.6 - 0.7	0.25 - 0.35
				> 0.98	< 0.02	0.13 - 0.18	0.2 - 0.4	0.3 - 0.4
				> 0.91 < 0.1				
ACS	C	2.0 - 2.5	1.5 - 2.2	< 0.02	0.98	0.14 - 0.20	0.4 - 0.6	0.2 - 0.3
				> 0.98 / < 0.005				
AFN	A	1.2 - 2.0	1.8 - 2.5	< 0.02	> 0.98	0.15 - 0.20	0.5 - 0.7	0.35 - 0.45
Ionics								
[0.1 N (NaCl)]								
CR 61 AZGG	C	30	2.1	0.85		1.016	20.7	0.47
CR 61 AZL	C	11	2.7	0.90		0.58	7.9	0.46
CR 61 CZL	C	11	2.7	0.93		0.61	7.9	0.40
AR 111 BZL	A	11	1.8		0.9	0.61	8.6	0.43
AR 111 EZL	A	11	1.7		0.9	0.64	8.6	0.36
AR 102	A	6	2.4		0.97	0.61	9.0	0.35
[Hidror: 0.6 N (NaCl)]								

6. ANEXOS

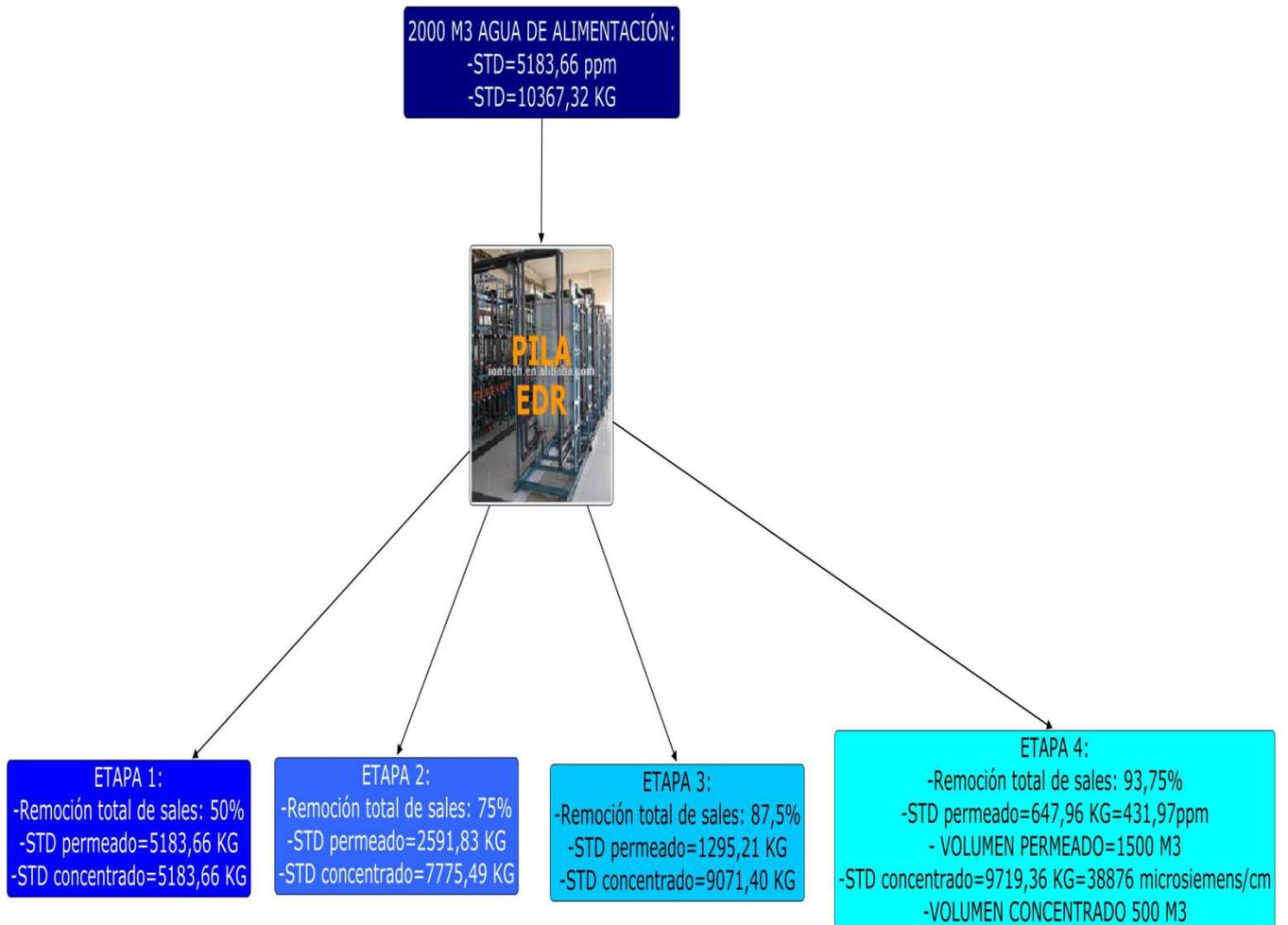
Anexo 5. Diagramas de bloques del proceso de regeneración de agua de la planta de EDR para uso industrial, agrícola o recreativo

Anexo 5.A. Esquema general del proceso



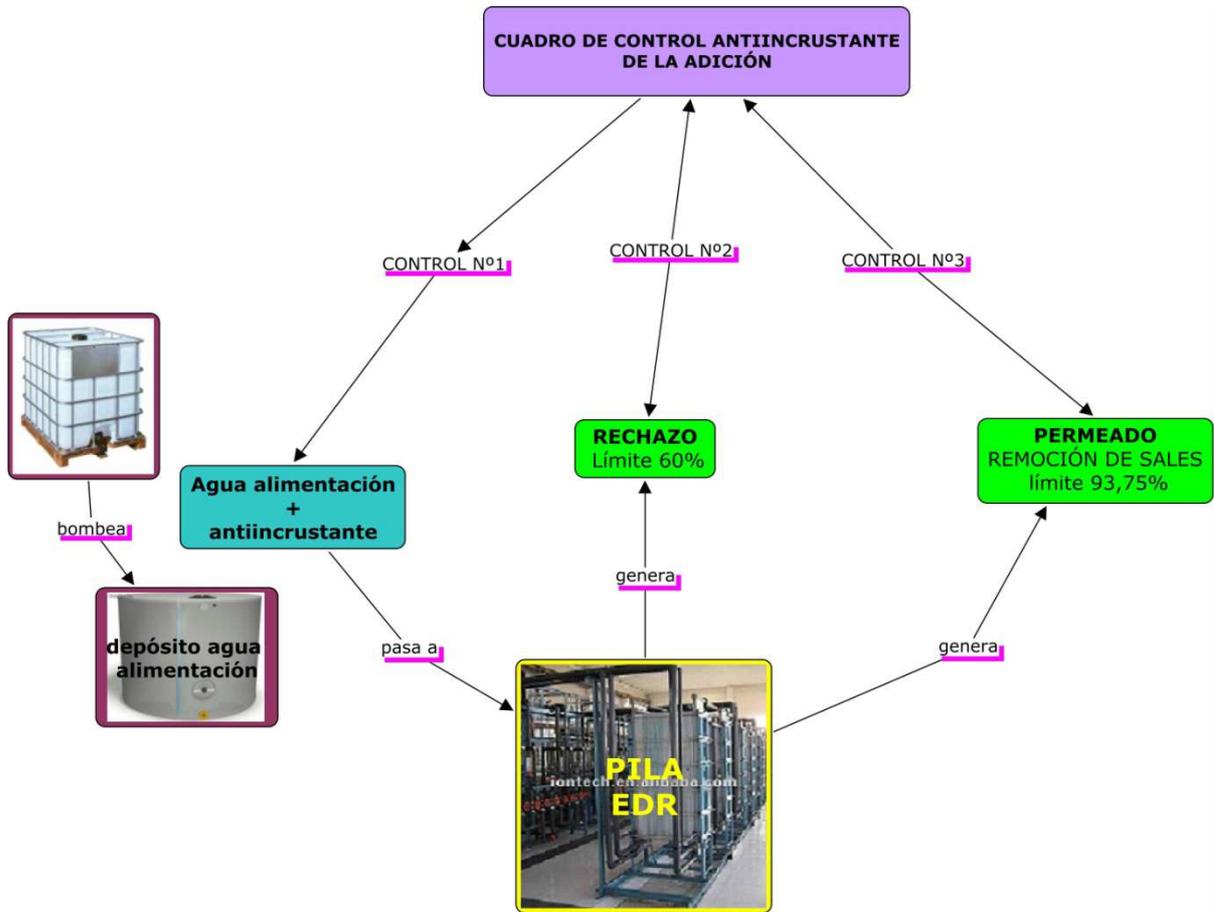
6. ANEXOS

Anexo 5.B. Esquema de las etapas de la pila de EDR



6. ANEXOS

Anexo 5.C. Esquema del sistema de adición de antiincrustante



7. BIBLIOGRAFÍA

- Aumatell, J., Adroer, N., Vidal, D., & Coma, J. (ADIQUÍMICA S.A.).(2009). Seguimiento en línea del inhibidor de incrustación. Sistema basado en el análisis del principio activo. En *Tratamiento de aguas*.
- Baeza, J. (2009). Reutilización de aguas residuales para riego.
- Bustamante, I., Cabrera, M. d., Candela, L., Lillo, J., & Palacios, M. d. (2011). La reutilización de aguas regeneradas en España: ejemplos de aplicación en el marco del proyecto CONSOLIDER-TRAGUA.
- Universidad de la Laguna de Canarias. (2011). Evaluación de tecnologías potenciales de reducción de la contaminación de las aguas de Canarias: proyecto TECNOAGUA.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA) de la Universidad de Salamanca. (2011). Electrodiálisis: aplicaciones del proceso.
- Corral, M. T. (1998). La desalación de agua de mar. ¿Recurso hídrico alternativo?.
- Cruz, C. d. (2006). La desalación de agua de mar mediante empleo de energías renovables.
- Espigares García, M., & Pérez López, J. A. (2008). Aguas residuales. Composición.
- Estevan, A., & García Sánchez-Colomer, M. (2007). El consumo de energía en la desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa: situación actual y perspectivas.
- Lechuga, J., Rodríguez, M., & Lloveras, J. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010). Guía para la Aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas.
- Martínez, P. M. (2012). Optimización de la planta de Electrodiálisis Reversible de Heineken de España S.A.
- Pérez, R. V. (1999). Caracterización, evaluación y optimización de una planta de desalación por Electrodiálisis Reversible.
- Rendueles, B. E. (2014). Desalación de aguas marinas y salobres: Técnicas avanzadas en el tratamiento y depuración de aguas.
- Roa, I. M. (2007). Tratamiento de aguas de producción con Electrodiálisis.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Variño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales.
- Sadhwani, S. H. (2009). Diseño de una planta de Electrodiálisis.
- Salgot, M., & Fonch, M. (2011). Capítulo 19: La reutilización de las aguas residuales. En *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*.
- Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile (SINIA). (2014). Tecnología de membranas
- Vicente, D. M. (2002). Tesis de doctorado: Estudio de la viabilidad técnico-económica de la desalación de agua de mar por osmosis inversa en España. .
- Zuñiga Santana, J. F., Oviedo Rivero, I., & Cancio Martínez, E. (2004). La desalinización de agua de mar y su tendencia actual.

Direcciones web

- Aguas residuales: composición*. (2008). Recuperado el 25 de Agosto de 2014, de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/composicion.pdf>
- Análisis de los procesos para desalación de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica*. (2007). Recuperado el 14 de Agosto de 2014, de <http://www.redalyc.org/pdf/467/46711301.pdf>
- Capítulo 19: La reutilización de las aguas residuales. En Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*. (2011). Recuperado el 11 de Agosto de 2014, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsair/e/repindex/rep84/vleh/fulltext/acrobat/agua.pdf>
- Catálogo de la empresa de ultrafiltración "Totagua"*. (s.f.). Recuperado el 29 de Julio de 2014, de <http://www.totagua.com/pdf/equipos-depuracion/ultrafiltracion.pdf>
- Curso: El agua. Desalación*. (2011). Recuperado el 9 de Agosto de 2014, de <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-2-4/electrodialisis>
- Diseño de una planta de Electrodiálisis*. (2009). Recuperado el 11 de Agosto de 2014, de http://sanjanasadhwani.weebly.com/uploads/1/0/6/4/10643581/trabajo_electrodialisis.pdf
- El consumo de energía en la desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa: situación actual y perspectivas*. (2007). Recuperado el 21 de Agosto de 2014, de http://hispagua.cedex.es/sites/default/files/hispagua_articulo/Ingcivil/2007_148_113.
- Electrodiálisis: aplicaciones del proceso*. (2011). Recuperado el 15 de Agosto de 2014, de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/ELECTRODIALISIS.pdf>

7. BIBLIOGRAFÍA

- Electrodiálisis reversible*. (s.f.). Recuperado el 28 de Julio de 2014, de https://370a4e308e9aeb352351128d4ca79ffa74edbeb.googledrive.com/host/0B7_8qZE2LW-BUGJGS2dvaINIVIE
- Empresa de desalación "Grupo Aguas de Valencia"*. (s.f.). Recuperado el 11 de Agosto de 2014, de https://www.aguasdevalencia.es/portal/export/sites/default/Tecnologia/_config/recursosTecnologia/Desalinizacion.pdf
- Empresa de ultrafiltración "Elessia"*. (s.f.). Recuperado el 29 de Julio de 2014, de <http://www.elessia.com/es/explicacion-del-proceso-ultrafiltracion.html>
- Empresa de ultrafiltración "Unitek"*. (s.f.). Recuperado el 26 de Julio de 2014, de <http://www.unitek.com.ar/productos-ultrafiltracion.php>
- Empresa especializada en tecnología de membranas "Aire y Agua"*. (s.f.). Recuperado el 29 de Julio de 2014, de <http://www.ultrafiltracion.com.mx/>
- Estudio de la viabilidad técnico-económica de la desalación de agua de mar por ósmosis inversa en España*. (2002). Recuperado el 26 de Julio de 2014, de <http://hispagua.cedex.es/documentacion/tesis/58280> (visitada 26 Julio de 2014).
- Evolución de tecnologías potenciales de reducción de la contaminación de las aguas de Canarias: proyecto TECNOAGUA*. (2011). Recuperado el 6 de Agosto de 2014, de <http://pe.itccanarias.org/convagua/files/2011/07/Informe-final-TECNOAGUA.pdf>
- Guía para la aplicación del R.D. 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Regeneradas*. (2010). Recuperado el 14 de Agosto de 2014, de http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/guia_rd_1620_2007__tcm7-178027.pdf
- La desalación de agua de mar y su tendencia actual*. (2004). Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia32/HTML/articulo04.htm>
- La desalación de agua de mar. ¿Recurso hídrico alternativo?* (1998). Recuperado el 25 de Julio de 2014, de [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/\\$File/PGA-c11.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/$File/PGA-c11.pdf)
- La reutilización de aguas regeneradas en España: ejemplos de aplicación en el marco del proyecto CONSOLIDER-TROTAGUA*. (2011). Recuperado el 14 de Agosto de 2014, de http://acceda.ulpgc.es/bitstream/10553/7397/4/0661531_00000_0000.pdf
- Optimización de la planta de Electrodiálisis Reversible de Heineken de España S.A.* (2012). Recuperado el 25 de Agosto de 2014, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27224/TFM.pdf?sequence=1>

7. BIBLIOGRAFÍA

Reutilización de las aguas residuales para riego. (2009). Recuperado el 14 de Agosto de 2014, de <http://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/jaume-baeza.pdf>

Tecnología de membranas: Electrodialisis. (s.f.). Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_24.pdf

Tecnología de membranas: Nanofiltración. (s.f.). Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_23.pdf

Tecnología de membranas: Ósmosis Inversa. (s.f.). Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_25.pdf