

Diseño de una planta de electrodiálisis

Tecnología de Membranas



Sanjana Hareesh Sadhwani

5º Ingeniería Química

Junio 2009

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. Objetivo del trabajo | 3 |
| 2. Introducción teórica: Electrodialisis | 3 |
| 3. Determinación de los parámetros de diseño de la planta | 7 |
| 3.1. Características de un agua | 7 |
| 3.1.1. Salinidad y conductividad | 7 |
| 3.1.2. Composición química | 8 |
| 3.1.3. Otros parámetros | 14 |
| 3.2. Características del agua de alimentación | 14 |
| 3.3. Características del agua tratada (agua de riego) | 16 |
| 3.3.1. Parámetros de calidad del agua | 17 |
| 3.3.2. Valores específicos de cada uno de los parámetros | 21 |
| 3.4. Selección del modelo y número de membranas | 24 |
| 3.5. Cálculo de las sales limitantes para el control de las incrustaciones | 24 |
| 3.5.1. Estudio del CaCO_3 | 25 |
| 3.5.2. Estudio del CaSO_4 | 27 |
| 3.5.3. Estudio del MgCO_3 | 28 |
| 3.5.4. Estudio del CaF_2 | 28 |
| 3.5.5. Estudio del SiO_2 | 29 |
| 3.6. Cálculo de las etapas del proceso y balance de materia | 29 |
| 3.6.1. Balance de la primera etapa | 29 |
| 3.6.2. Balance de la segunda etapa | 31 |
| 3.6.3. Balance de la tercera etapa | 31 |
| 3.6.4. Balance de la cuarta etapa | 32 |
| 4. Descripción general del proceso | 34 |
| 4.1. Captación de agua | 34 |
| 4.2. Pretratamiento físico-químico | 35 |
| 4.2.1. Pretratamientos físicos | 35 |
| 4.2.2. Pretratamientos químicos | 38 |
| 4.3. Unidad de electrodialisis | 39 |
| 4.4. Limpieza de membranas | 40 |
| 4.5. Post-tratamiento del agua obtenida | 41 |
| 4.5.1. Descarbonatación o desgasificación | 41 |

| | |
|---|----|
| 4.5.2. Recuperación de la alcalinidad | 42 |
| 4.5.3. Desinfección | 42 |
| Bibliografía consultada:..... | 43 |

1. Objetivo del trabajo

La finalidad del presente trabajo es aplicar los conocimientos adquiridos sobre tecnologías de membranas para diseñar una planta de electrodiálisis aplicada a aguas salobres procedentes de la isla de Gran Canaria para poder utilizarlo con fines agrícolas.

La planta del presente trabajo tendrá una alimentación de 2000m³/día y reducirá los STD desde 5183,66 ppm hasta 432 ppm, obteniendo un caudal de permeado de 1500m³/día.

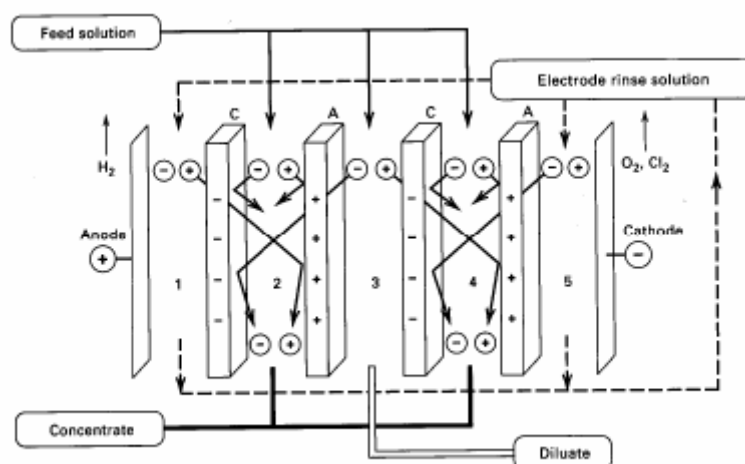
Las membranas a utilizar son membranas permselectivas de transferencia aniónica y catiónica. Asimismo, éstas serán homogéneas.

El sistema estará constituido por una pila que trabajará en 4 etapas, con una eliminación de sales por etapa del 50%.

2. Introducción teórica: Electrodiálisis

La electrodiálisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la influencia de un campo eléctrico. Mediante este proceso se consigue separar iones o moléculas cargadas. La concentración de los componentes de la alimentación se basa en la migración eléctrica a través de membranas iónicas. Los iones van a ser transferidos desde la solución menos concentrada a la más concentrada. Una de las ventajas más atractivas que presenta es que requiere temperaturas suaves.

A continuación se muestra un esquema simplificado de un proceso de electrodiálisis:



El proceso que tiene lugar es el siguiente:

- Los cationes serán atraídos por el cátodo (electrodo negativo) y tendrá lugar una reacción de reducción.

- Los aniones serán atraídos por el ánodo (electrodo positivo) y tendrá lugar una reacción de oxidación.

En cuanto a las membranas, existen dos tipos:

- Membranas de transferencia catiónica: sólo permite el paso de los cationes.
- Membranas de transferencia aniónica: sólo permite el paso de los aniones.

En general, se utilizan cientos de compartimentos desmineralizados y concentrados en una pila de membranas para así obtener el caudal requerido. Esta pila constituye la parte más importante del proceso de electrodiálisis.

Características del proceso de electrodiálisis:

- ◆ Utiliza energía eléctrica
- ◆ Las membranas son impermeables (impiden el paso del agua)
- ◆ El consumo energético es directamente proporcional a la cantidad de sales eliminadas.
- ◆ La eliminación de sales por estaba es del 40-50%.
- ◆ Sólo elimina partículas cargadas
- ◆ Las pérdidas de agua son bajas (5-20%)
- ◆ No suele requerir productos químicos. En caso de hacerlo, se añaden a la salmuera.
- ◆ Presenta un elevado coste de la instalación pero bajo coste de operación.

Cada pila está formada por los siguientes componentes:

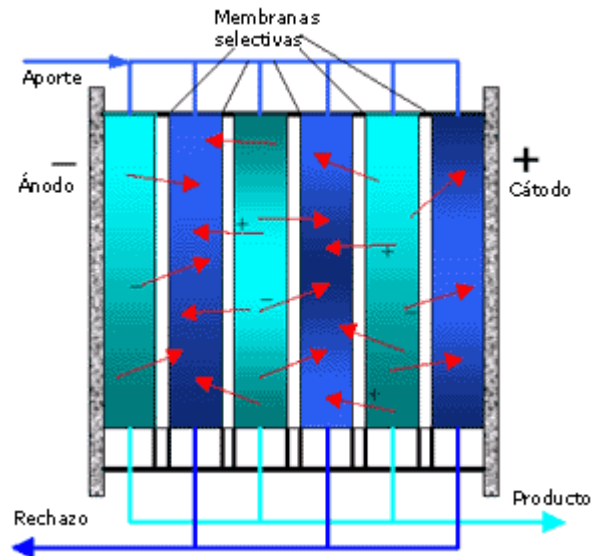
- Electrodo
- Membranas
- Promotores de turbulencia
- Cuerpos de la celda
- Juntas
- Distribuidores de flujo o separadores
- Rectificador

Los **electrodos** son los responsables de que se produzca la transferencia electrónica debido a que conducen la electricidad.

Los materiales que se utilizan en los electrodos son los siguientes:

- ◆ **Ánodo:** Tántalo, Niobio o Titanio. Sin embargo, el más utilizado es el acero inoxidable.
- ◆ **Cátodo:** Tántalo, Niobio o Titanio recubiertos de Platino.

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.



Los **espaciadores** son zonas de flujo de las corrientes desmineralizada y concentrada. Están formadas por separadores de plástico (polietileno y poliéster) que se colocan en forma de malla entre cada par de membranas. En una pila, todas las corrientes de desmineralizado están unidas, al igual que con las de concentrado.

Los espaciadores se utilizan para proporcionar los canales de flujo, actúan como promotores de turbulencia, sellan las celdas, soportan las membranas y permiten una distribución uniforme.

Podemos encontrarnos con dos disposiciones:

- 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.

En cuanto a las **membranas**, la técnica de electrodiálisis requiere que éstas sean impermeables, tengan suficiente capacidad de cambio así como poros de tamaño suficientemente pequeño ($\approx 30\text{\AA}$) para repeler los iones con carga opuesta.

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.

Las membranas permselectivas destacan por permitir el paso de iones a su a través, de carga determinado y evitando el paso de los iones de carga opuesta. Éstas están formadas por una estructura polimérica entrecruzada, donde se encuentran anclados los grupos intercambiadores.

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

- Heterogéneas: formadas por dos fases poliméricas
- Homogéneas: formadas por una sola fase polimérica. Son los más utilizados.

Los **promotores de turbulencia** se utilizan para aumentar la turbulencia y favorecer la transferencia de materia. Asimismo, permite que haya una distribución uniforme del flujo de alimentación.

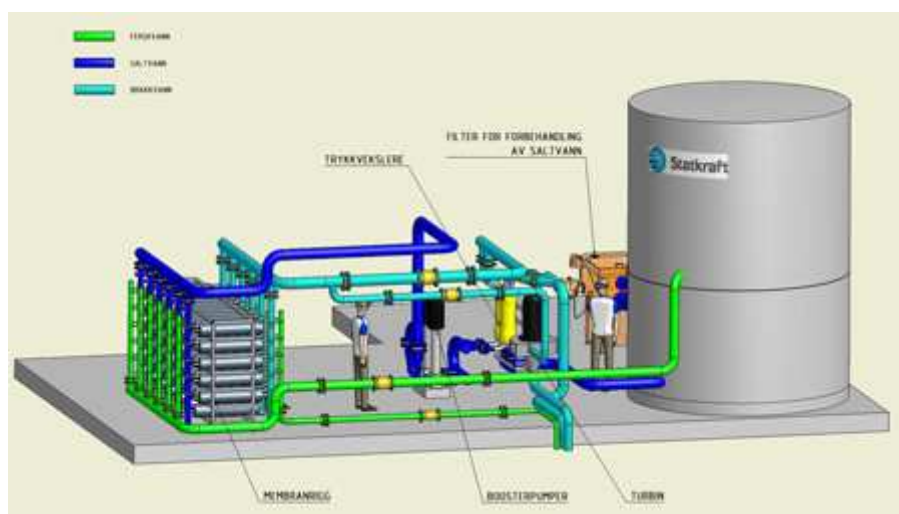
El **cuerpo de la celda** es aquél que engloba todos los componentes de la celda y debe ser resistente.

Por último, las **juntas** se utilizan para evitar fugas y mezclas entre productos y salmuera.

La técnica de electrodiálisis ha probado su viabilidad en la desalinización de agua salobre, desalinización de aminoácidos y otras disoluciones orgánicas, en el tratamiento de efluentes y/o en el reciclado de flujos de procesos industriales y en la producción de sal.

Los sistemas de electrodiálisis son una alternativa a los actuales procesos de desalinización, tales como la ósmosis inversa del agua marina o la evaporación multiefecto, ya que estos liberan al mar un flujo de agua cuya concentración salina es similar a la de éste, evitando así los problemas derivados del aumento salino localizado que sí se produce en las plantas de ósmosis inversa y que deterioran el frágil ecosistema costero.

Un sistema de desalinización resulta útil en áreas remotas con accesos a acuíferos salinos o zonas costeras donde hay acuíferos salinos y los recursos hídricos son escasos.



3. Determinación de los parámetros de diseño de la planta

Para poder calcular los parámetros de la instalación, es necesario conocer los siguientes datos:

- Características del agua de alimentación (a tratar)
- Calidad requerida del agua tratada según el uso que se le va a dar

3.1. Características de un agua

A la hora de evaluar la calidad de un agua, es preciso conocer ciertos parámetros fundamentales:

- Salinidad y conductividad
- Composición química
 - Calcio y Magnesio
 - Amonio
 - Sodio
 - Carbonatos y Bicarbonatos
 - Cloruros
 - Sulfatos
 - Fluoruros
 - Nitratos, nitritos y amoniaco
 - Fosfatos
 - Sílice
 - Hierro y Manganeseo
 - Bario y Estroncio
 - Aluminio
 - Gases disueltos
 - ◆ Dióxido de Carbono disuelto
 - ◆ Oxígeno disuelto
 - ◆ Ácido sulfhídrico

3.1.1. 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. Existe una clasificación importante en función de los valores de STD:

| Tipo de agua | STD (mg/l) |
|----------------------|-------------|
| Agua ultra-pura | 0,03 |
| Agua pura | 0,30 |
| Agua desionizada | 3,00 |
| Agua dulce (potable) | <2.000 |
| Agua salobre | 2.000-3.000 |
| Agua marina | >3.000 |

Asimismo, la conductividad es un parámetro que está íntimamente ligado a la salinidad. Ésta 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 forma iónica), la conductividad aumenta con el incremento de la salinidad. A continuación se muestran 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 |

3.1.2. 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 hablará brevemente de algunos de estos componentes.

3.1.2.1. 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,...).

3.1.2.2. 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 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.

3.1.2.3. 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 sí 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 se semillas, malas hierbas, erosión del suelo, escasez de oxígeno y nutrientes disponibles para la planta.

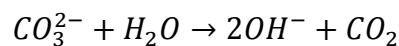
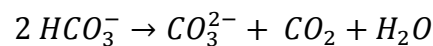


3.1.2.4. Carbonatos y bicarbonatos

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 precipitarán 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.

3.1.2.5. 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 50-60mg/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.



3.1.2.6. 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 éstas por formaciones rocosas y suelos que contienen minerales sulfatados como el sulfato de magnesio, sulfato de sodio y el sulfato de calcio.

3.1.2.7. 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.

Debemos tener cuidado con su presencia puesto que elevadas concentraciones convierten el agua en tóxica. Hasta 1,5 mg/l el fluoruro no provoca efectos adversos pero para concentraciones mayores de 4 mg/l comienzan a ser peligrosos.

3.1.2.8. 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.

3.1.2.9. 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 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 |

3.1.2.10. 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.



3.1.2.11. Hierro y Manganeseo

La presencia de hierro es un problema muy común en las aguas. Éste provoca precipitación y coloración no deseada. Los niveles máximos de hierro y manganeseo 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 bacteriano o biofouling de hierro. Éste 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 manganoso (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.

3.1.2.13. 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 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 él. En el agua subterránea, la mayoría de las formas del estroncio están disueltas. Éste 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 gua.

3.1.2.14. 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.

3.1.2.15. 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.

3.1.2.15.1. 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.

3.1.2.15.2. 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 5-6ppm.

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 contaminarán las membranas.

3.1.2.15.3. 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 menor de 1ppm, sin embargo, las concentraciones que se han medido en aguas superficiales y residuales han variado entre algo menos de 1ppm hasta 5ppm.

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.

3.1.3. 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°,...

La temperatura es un parámetro que varía considerablemente en según el tipo de agua (superficial, subterránea, de mar,...), la zona, época del año,...

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.

3.2. Características del agua de alimentación

A continuación, se muestra un análisis con la composición química del agua que va a ser tratada. A partir de él, se establecerán los pre-tratamientos requeridos para permitir un óptimo trabajo de las membranas, evitando el ensuciamiento (incrustaciones) y consiguiendo, por tanto, alargar su vida útil.

FO/09/02/03
AA108-01.xls
1 / 1

C.A.C.C. CICLO INTEGRAL DEL AGUA
Carretera del Centro, nº138, LPGC
TFNO. 928 454 227/FAX. 928 454 228

INFORME DE RESULTADOS

| | | |
|-------------------------|---------------------------|------------------------|
| PETICIONARIO: | MUESTRA TOMADA: | INTERESADOS |
| EMPRESA: | OBJETO A ENSAYAR: | AGUA NATURAL |
| IDENTF. 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 | indice dilución | NORMAL | |
| 58 | aspecto | | NORMAL | |
| 17 | turbidez | U.N.F. | 0.30 | 27/04/01 |
| 10 | temperatura | °C | 23.20 | 30/03/01 |
| 02 | 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 | FACTOR | | 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

Los resultados obtenidos, se corresponden con analíticas realizadas en el laboratorio; los análisis de campo poseen un asterisco(*) en su casillero correspondiente
Los ensayos acreditados por ENAC, están reseñados por la palabra A. Este informe solo afecta al objeto sometido a ensayo

Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio de ensayo.

3.3. Características del agua tratada (agua de riego)

La calidad del agua obtenida 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.



En el presente trabajo se ha escogido que el destino del agua será para uso agrícola. Asimismo, la normativa anterior, clasifica este tipo de aguas en 3 variedades en función de la calidad de la misma. Se ha elegido la calidad 3:

- Riego localizado de cultivos leñosos que impida el contacto del agua regenerada con los frutos consumidos en la alimentación humana.
- Riego de cultivos de flores ornamentales, viveros, invernaderos sin contacto directo del agua regenerada con las producciones.
- Riego de cultivos industriales no alimentarios, viveros, forrajes, ensilados, cereales y semillas oleaginosas.

Para poder utilizar el agua para estos fines, la normativa establece las siguientes condiciones de parámetros:

| Valor máximo admisible | | | | |
|------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---|
| Nematodos intestinales | Escherichia coli | Sólidos en suspensión | 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 |

Además de las exigencias anteriores, el tipo de 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. Sea cual sea el origen del agua, ésta debe cumplir con unos ciertos requisitos.

Para poder evaluar la calidad de un agua de riego se suelen estudiar los valores de una serie de parámetros.

3.3.1. Parámetros de calidad del agua

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

3.3.1.1. 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. Ésta 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 éstas, 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.

A continuación, se muestra una tabla con algunos ejemplos de cultivos según las tolerancias a la salinidad de los mismos. Ésta va a depender del clima, condiciones del suelo y las técnicas agronómicas utilizadas.

| | |
|---------------------------------|---|
| Tolerables | <ul style="list-style-type: none"> ■ Cultivos productores de fibras, semillas y azúcar <ul style="list-style-type: none"> ■ Cebada ■ Algodón ■ Jojoba ■ Remolacha azucarera ■ Pastos y forrajes <ul style="list-style-type: none"> ■ Grama ■ Agropiro ■ Elimo ■ Productos hortícolas <ul style="list-style-type: none"> ■ Espárragos ■ Frutales <ul style="list-style-type: none"> ■ Palmera datilera |
| Moderadamente tolerables | <ul style="list-style-type: none"> ■ Cultivos productores de fibras, semillas y azúcar <ul style="list-style-type: none"> ■ Avena ■ Soja ■ Trigo ■ Pastos y forrajes <ul style="list-style-type: none"> ■ Cebada desnuda ■ Trébol ■ Colza ■ Mijo ■ Trigo ■ Productos hortícolas <ul style="list-style-type: none"> ■ Alcachofa ■ Remolacha ■ Calabacín ■ Frutales <ul style="list-style-type: none"> ■ Higuera ■ Papaya ■ Piña ■ Granada |
| Moderadamente sensibles | <ul style="list-style-type: none"> ■ Cultivos productores de fibras, semillas y azúcar <ul style="list-style-type: none"> ■ Haba ■ Ricino ■ Maíz ■ Cacahuete ■ Arroz ■ Pastos y forrajes <ul style="list-style-type: none"> ■ Alfalfa ■ Trébol ■ Fresero ■ Productos hortícolas <ul style="list-style-type: none"> ■ Brécol ■ Pepino ■ Patata ■ Calabaza ■ Frutales <ul style="list-style-type: none"> ■ Uva |
| Sensibles | <ul style="list-style-type: none"> ■ Cultivos productores de fibras, semillas y azúcar <ul style="list-style-type: none"> ■ Alubias ■ Sésamo ■ Productos hortícolas <ul style="list-style-type: none"> ■ Zanahoria ■ Cebolla ■ Guisante ■ Frutales <ul style="list-style-type: none"> ■ Almendra ■ Manzana ■ Albaricoque ■ Aguacate |

3.3.1.2. Permeabilidad

3.3.1.2.1. 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 ión sodio y los iones calcio y magnesio. Si estos valores son altos, atenuarán el efecto dañino del sodio.

$$SAR = \frac{Na}{\left(\frac{Ca + Mg}{2}\right)^{1/2}}$$

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.

3.3.1.2.2. 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.

3.3.1.3. 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.

3.3.1.3.1. 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.



3.3.1.3.2. 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.

3.3.1.3.3. 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,... Este problema se acentúa más en condiciones climáticas de elevada temperatura.

A continuación, se muestra una tabla donde se indica la sensibilidad de algunos cultivos en función de la concentración de Boro.

| | |
|--|--|
| Muy sensibles (<0,5 mg/l) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Limón ■ Mora |
| Sensibles (0,5-1,0 mg/l) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Aguacate ■ Pomelo ■ Naranja ■ Melocotón |
| Moderadamente sensibles (1,0-2,0 mg/l) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Pimiento rojo ■ Guisante ■ Zanahoria |
| Moderadamente tolerantes (2,0-4,0 mg/l) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Lechuga ■ Apio ■ Nabo |
| Tolerantes (4,0-6,0 mg/l) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Tomate ■ Alfalfa ■ Remolacha |
| Muy tolerantes (6,0- 15,0 mg/l) | <ul style="list-style-type: none"> ■ Algodón ■ Espárragos |

3.3.1.4. 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.

3.3.1.5. 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 $\mu\text{g/l}$. 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.

3.3.1.6. Otros parámetros

3.3.1.6.1. 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.

3.3.1.6.2. Temperatura

La variación de la temperatura tiene incidencia sobre diferentes parámetros físico-químicos 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.

3.3.2. Valores específicos de cada uno de los parámetros

3.3.2.1. Salinidad

En la tabla siguiente se clasifica la salinidad del agua en función de la conductividad eléctrica y STD:

| Salinidad | CE ($\mu\text{S/cm}$) | STD (ppm) |
|-----------------|-------------------------|-----------|
| Baja | <250 | <160 |
| Media | 250-750 | 160-480 |
| Alta | 760-2250 | 480-1440 |
| Muy alta | >2500 | 1440 |

3.3.2.2. Cationes y aniones

A continuación, se especifican los valores que deben tener cada uno de los iones más 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 |

3.3.2.3. Otros

La tabla siguiente muestra otros parámetros fundamentales:

| Parámetro | Valor límite |
|--------------------|---------------------|
| Boro (mg/l) | 0-2 |
| pH | 6,5-8,5 |
| SAR | 0-15 |

3.3.2.4. Microelementos

En la siguiente tabla, se muestran los valores límites de cada uno de los microelementos:

| 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. |

3.4. Selección del modelo y número de membranas

Las membranas escogidas son homogéneas de electrodiálisis.

| 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 ($W \cdot cm^2$) | 11,0 | 11,0 |
| Presión de ruptura (bar) | 8,0 | 9,0 |

3.5. Cálculo de las sales limitantes para el 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.

Por ello, es fundamental controlar las incrustaciones en las membranas, para lo cual se recurrirá al cálculo de las sales limitantes.

El análisis del agua de alimentación contiene:

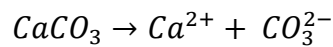
- pH = 7,99
- Ca^{2+} = 93,47 ppm
- Mg^{2+} = 140,41 ppm
- Na^+ = 1.504,00 ppm
- K^+ = 25,01 ppm
- HCO_3^- = 451,47 ppm
- Cl^- = 1.842,67 ppm
- SO_4^{2-} = 1.075,00 ppm
- F^- = 3,25 ppm
- NO_3^- = 48,38 ppm
- PO_4^{3-} = 0,07 ppm → Es una concentración muy pequeña, se desprecia.
- SiO_2 = 38,20 ppm
- 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.
- CaCO₃, CaSO₄, MgCO₃ → Van a afectar a las membranas, se debe tener en cuenta.
- MgSO₄ → No se considerará puesto que tiene una constante de solubilidad muy elevada.
- CaF₂ → Va a afectar a las membranas
- SiO₂ → Afectará a las membranas

3.5.1. Estudio del CaCO₃

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$[Ca^{2+}] = 93,47 \text{ ppm} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$[CO_3^{2-}] = \text{desconocido}$$

$$K_s = 3,36 \cdot 10^{-9}$$

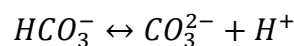
$$pH = 7,99$$

$$[HCO_3^-] = 451,47 \text{ ppm} = 7,40 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$K_a = 1,41 \cdot 10^{-10}$$

$$-\log[H^+] = pH \rightarrow [H^+] = 10^{-7,99}$$

La reacción de descomposición del bicarbonato es:



En el equilibrio tendremos:

$$K_a = \frac{[CO_3^{2-}] \cdot [H^+]}{[HCO_3^-]}$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{1,41 \cdot 10^{-10} \cdot 7,40 \cdot 10^{-3}}{10^{-7,99}} = 1,020 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$$

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}]}{x} \cdot \frac{[CO_3^{2-}]}{x} \rightarrow 3,36 \cdot 10^{-9} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,020 \cdot 10^{-4}}{x^2} \rightarrow x = 8,356$$

$$Y = 1 - x = 1 - 8,356 = -7,356 \rightarrow \text{Es una sal incrustante}$$

Esto significa que si tuviésemos una disolución con sólo 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

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.

$$\text{Selectividad: } s = 96,0 \%$$

$$\text{Recuperación: } Y = 60\%$$

$$\mu = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot STD_{\text{rechazo}}$$

$$\mu = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,96 \cdot \frac{5.183,66}{1 - 0,6} = 0,311$$

$$\log \gamma = -0,5 \cdot z^2 \cdot \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} \rightarrow \log \gamma = -0,5 \cdot 2^2 \cdot \frac{\sqrt{0,311}}{1 + \sqrt{0,311}} = -0,716$$

$$p\gamma = -\log \gamma = 0,716$$

$$K_s = [Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]$$

$$\log K_s = \log [Ca^{2+}] + \log [CO_3^{2-}]$$

$$pK_s = pK_s - p\gamma Ca^{2+} - p\gamma CO_3^{2-}$$

$$pK_s = -\log 3,36 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 0,716 = 7,042$$

$$K_s = 10^{-7,042}$$

$$10^{-7,042} = 0,96 \cdot \left[\frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,020 \cdot 10^{-4}}{x^2} \right] \rightarrow x = 1,575$$

$$Y = 1 - x = 1 - 1,575 = -0,575 \rightarrow -57,5\% \neq 60\% \text{ que se supuso}$$

Como la Y obtenida no coincide con la supuesta, se repetirá el procedimiento pero tomando el nuevo valor de Y.

$$s = 96,0 \%$$

$$Y = -57,5\%$$

$$\mu = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot STD_{\text{rechazo}}$$

$$\mu = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,96 \cdot \frac{5.183,66}{1 - (-0,575)} = 0,079$$

$$\log \gamma = -0,5 \cdot z^2 \cdot \frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} \rightarrow \log \gamma = -0,5 \cdot 2^2 \cdot \frac{\sqrt{0,079}}{1 + \sqrt{0,079}} = -0,439$$

$$p\gamma = -\log \gamma = 0,439$$

$$K_s = [Ca^{2+}] \cdot [CO_3^{2-}]$$

$$\log K_s = \log[Ca^{2+}] + \log[CO_3^{2-}]$$

$$pK_s = pK_s - p\gamma Ca^{2+} - p\gamma CO_3^{2-}$$

$$pK_s = -\log 3,36 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 0,439 = 7,596$$

$$K_s = 10^{-7,596}$$

$$10^{-7,596} = 0,96 \cdot \left[\frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,020 \cdot 10^{-4}}{x^2} \right] \rightarrow x = 2,981$$

$$Y = 1 - x = 1 - 2,981 = -1,981$$

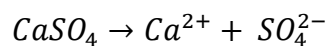
Por lo tanto, hay que volver a iterar. A continuación se muestra una tabla con los resultados:

| 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 |

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 trabaje el sistema, la sal va a precipitar. Por ello, es imprescindible el uso de un anti-incrustante que evite dichas incrustaciones sobre las membranas.

3.5.2. Estudio del $CaSO_4$

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$K_s = [Ca^{2+}] \cdot [SO_4^{2-}]$$

$$K_s = \frac{[Ca^{2+}]}{x} \cdot \frac{[SO_4^{2-}]}{x}$$

$$K_s = 4,93 \cdot 10^{-5}$$

$$[Ca^{2+}] = 93,47 \text{ ppm} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$[SO_4^{2-}] = 1,075 \text{ ppm} = 0,0112 \text{ mol/l}$$

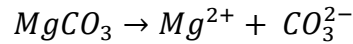
$$4,93 \cdot 10^{-5} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3}}{x} \cdot \frac{0,0112}{x} \rightarrow x = 0,723$$

$$Y = 1 - x = 1 - 0,723 = 0,277$$

Esto significa que el CaSO_4 no es una sal incrustante.

3.5.3. Estudio del MgCO_3

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$[\text{Mg}^{2+}] = 140,41 \text{ ppm} = 5,77 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 1,020 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$$

$$K_s = 6,82 \cdot 10^{-6}$$

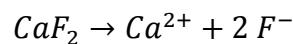
$$K_s = \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{x} \cdot \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{x} \rightarrow 6,82 \cdot 10^{-6} = \frac{5,77 \cdot 10^{-3} \cdot 1,020 \cdot 10^{-4}}{x^2} \rightarrow x = 0,294$$

$$Y = 1 - x = 1 - 0,294 = 0,706$$

No es una sal incrustante.

3.5.4. Estudio del CaF_2

La reacción que tiene lugar es la siguiente:



$$[\text{Ca}^{2+}] = 93,47 \text{ ppm} = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$[\text{F}^-] = 3,25 \text{ ppm} = 0,171 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$$K_s = 3,45 \cdot 10^{-11}$$

$$K_s = \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{x} \cdot \frac{[\text{F}^-]^2}{x^2} \rightarrow 3,45 \cdot 10^{-11} = \frac{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot (0,171 \cdot 10^{-3})^2}{x^3} \rightarrow x = 1,249$$

$$Y = 1 - x = 1 - 1,249 = -0,249 \text{ Es una sal incrustante.}$$

Los cálculos realizados se resumen en la siguiente tabla:

| Y_{supuesta} | μ | $\text{Log } \gamma$ (Ca^{2+}) | $\text{Log } \gamma$ (F^-) | γ $p\gamma$ (Ca^{2+}) | γ $p\gamma$ (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 |

Por lo tanto, será posible trabajar con una recuperación de hasta el 29,2% para el CaF_2 sin que se produzcan incrustaciones sobre las membranas de esta sal.

3.5.5. 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°, 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:

$$[SiO_2] = \frac{38,20 \cdot 0,96}{(1 - 0,75)} = 146,688 \text{ ppm}$$

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.

3.6. Cálculo de las etapas del proceso y balance de materia

La presente instalación parte de un agua de alimentación con una salinidad de 5.183,66 ppm y se requiere que el agua tratada contenga una concentración que oscile entre 160-480 ppm (salinidad media).

Considerando que la eliminación de sal de cada etapa es del 50%, nos harán falta 4 etapas hidráulicas y 2 eléctricas, obteniendo una salinidad final de 432ppm.

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. Sin embargo, para facilitar la comprensión, vamos a suponer que tenemos una corriente de alimentación que se va a dividir en una de permeado y otra de concentrado.

3.6.1. Balance de la primera etapa

Como el agua de alimentación contiene 5183,66ppm y el flujo diario de éste es de 2.000 m³/día, se tendrán:

$$STD = 5183,66 \frac{mg}{l} \cdot 2 \cdot 10^6 l \cdot \frac{1 kg}{10^6 mg} = 10367,32 \text{ kg/día}$$

Para conocer el valor de cada uno de los componentes iónicos presentes, se realiza el mismo cálculo anterior con los diferentes valores de concentraciones. Los resultados son los siguientes:

| Elementos | Alimentación (ppm) | Alimentación (kg) |
|------------------------------------|--------------------|-------------------|
| STD | 5183,66 | 10367,32 |
| Ca²⁺ | 93,47 | 186,94 |
| Mg²⁺ | 140,41 | 280,82 |
| Na⁺ | 1504 | 3008 |
| K⁺ | 25,01 | 50,02 |
| HCO₃⁻ | 451,47 | 902,94 |
| Cl⁻ | 1842,67 | 3685,34 |
| SO₄²⁻ | 1075 | 2150 |
| F⁻ | 3,25 | 6,5 |
| NO₃²⁻ | 48,38 | 96,76 |
| PO₄³⁻ | 0,07 | 0,14 |
| SiO₂ | 38,2 | 76,4 |

Por otro lado, se sabe que la eliminación de sales de cada una de las etapas es del 50%. Por lo tanto, los resultados obtenidos en la primera etapa son:

| Elementos | Alimentación (kg) | Concentrado (kg) | Permeado (kg) |
|------------------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| STD | 10367,32 | 5183,66 | 5183,66 |
| Ca²⁺ | 186,94 | 93,47 | 93,47 |
| Mg²⁺ | 280,82 | 140,41 | 140,41 |
| Na⁺ | 3008 | 1504 | 1504 |
| K⁺ | 50,02 | 25,01 | 25,01 |
| HCO₃⁻ | 902,94 | 451,47 | 451,47 |
| Cl⁻ | 3685,34 | 1842,67 | 1842,67 |
| SO₄²⁻ | 2150 | 1075 | 1075 |
| F⁻ | 6,5 | 3,25 | 3,25 |
| NO₃²⁻ | 96,76 | 48,38 | 48,38 |
| PO₄³⁻ | 0,14 | 0,07 | 0,07 |
| SiO₂ | 76,4 | 38,2 | 38,2 |

Estos son los valores obtenidos de STD y de cada uno de los iones presentes tras la primera etapa.

3.6.2. Balance 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. 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 |

3.6.3. Balance 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 |

3.6.4. Balance de la cuarta etapa

Se repite el proceso por última vez, obteniendo:

| Elementos | Alimentación (kg) | Concentrado (kg) | Permeado (kg) |
|------------------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| STD | 1295,915 | 9719,3625 | 647,9575 |
| Ca²⁺ | 23,3675 | 175,25625 | 11,68375 |
| Mg²⁺ | 35,1025 | 263,26875 | 17,55125 |
| Na⁺ | 376 | 2820 | 188 |
| K⁺ | 6,2525 | 46,89375 | 3,12625 |
| HCO₃⁻ | 112,8675 | 846,50625 | 56,43375 |
| Cl⁻ | 460,6675 | 3455,00625 | 230,33375 |
| SO₄²⁻ | 268,75 | 2015,625 | 134,375 |
| F⁻ | 0,8125 | 6,09375 | 0,40625 |
| NO₃²⁻ | 12,095 | 90,7125 | 6,0475 |
| PO₄³⁻ | 0,0175 | 0,13125 | 0,00875 |
| SiO₂ | 9,55 | 71,625 | 4,775 |

Por otro lado, tenemos que tener en cuenta la recuperación. En el caso de la presente instalación, es de un 29,2% (valor excesivamente bajo). Probablemente haya un error en el cálculo de su valor. Por consiguiente, para que no dé un valor incoherente, se supondrá una recuperación del 75%:

Por lo tanto, por cada 2000m³ se obtendrán:

$$2000 \text{ m}^3 \cdot 0,75 = 1500 \text{ m}^3$$

La concentración del agua obtenida será:

| Elementos | Producto (kg) | Producto (ppm) |
|------------------------------------|---------------|----------------|
| STD | 647,9575 | 431,9717 |
| Ca²⁺ | 11,68375 | 7,7892 |
| Mg²⁺ | 17,55125 | 11,7008 |
| Na⁺ | 188 | 125,3333 |
| K⁺ | 3,12625 | 2,0842 |
| HCO₃⁻ | 56,43375 | 37,6225 |
| Cl⁻ | 230,33375 | 153,5558 |
| SO₄²⁻ | 134,375 | 89,5833 |
| F⁻ | 0,40625 | 0,2708 |
| NO₃²⁻ | 6,0475 | 4,0317 |
| PO₄³⁻ | 0,00875 | 0,0058 |
| SiO₂ | 4,775 | 3,1833 |

En cuanto al S.A.R:

El valor de entrada fue de 22,97, lo cual es un indicativo de que el agua es muy alcalinizante.

Vamos a calcular el S.A.R. del agua producto:

$$[Na^+] = 125,33ppm \rightarrow \frac{meq}{l} = \frac{m \cdot val}{PM} = \frac{125,33 \cdot 1}{22,99} = 5,45 \frac{meq}{l}$$

$$[Ca^+] = 7,79ppm \rightarrow \frac{meq}{l} = \frac{m \cdot val}{PM} = \frac{7,79 \cdot 2}{40,08} = 0,38 \frac{meq}{l}$$

$$[Mg^+] = 11,70ppm \rightarrow \frac{meq}{l} = \frac{m \cdot val}{PM} = \frac{11,70 \cdot 2}{24,31} = 0,96 \frac{meq}{l}$$

$$S.A.R. = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}} = \frac{5,45}{\sqrt{\frac{0,38 + 0,96}{2}}} = 6,66$$

Por lo tanto, el agua va a tener escaso poder de sodificación.

4. 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
- Postratamiento del agua obtenida

4.1. Captación de agua

La instalación de la planta comienza por la captación de agua, que va a ser la alimentación del sistema. Dicha captación puede ser de dos tipos: toma de pozos (a profundidad) y toma abierta (en la superficie).

Cabe mencionar que el índice de ensuciamiento será mucho más bajo y constante en las tomas a profundidad, mientras que las tomas en la superficie, conllevan una mayor actividad biológica debido a los residuos urbanos y por tanto, el índice de ensuciamiento será mayor. Por ello, será mejor llevar a cabo una toma de agua a profundidad, puesto que supondrá una operación más sencilla y menos costosa.



Las principales ventajas que presenta la utilización del agua de pozo son:

- **Calidad constante:** Existe una gran constancia de las propiedades físico-químicas en el tiempo. Esto ocurre salvo excepciones como intrusión de agua marina. Es importante realizar controles periódicos.
- **Baja contaminación:** Presentan unas cualidades y composición química.
- **Temperatura estable:** Es bastante constante y muy cercana a la temperatura promedio anual de la zona donde se capta.
- **Ausencia de masa biótica:** Carece de contaminación orgánica y biológica.
- **Bajo contenido en sólidos:** No contiene cantidades excesivas de partículas de arena, las cuales habría que eliminar para evitar problemas en bombas y conductos. Esto es gracias a la filtración que se produce a través del terreno y es la responsable de que presente bajos índices de turbidez y colmatación.
- **Estabilidad de caudales:** las sequías, por lo general, no lo afectan tanto como a los embalses superficiales.
- **Poca cantidad de oxígeno disuelto**
- **Bajo índice de contaminación:** Gracias al filtrado y a la profundidad.



Sin embargo, también presenta una serie de inconvenientes:

- Puede presentar una serie de **elementos perjudiciales**, como pueden ser metales, sílice, flúor,... Es especialmente importante que se eliminen estas sustancias en el tratamiento previo.
- Presencia de **compuestos dañinos**: pesticidas, nitratos, nitritos,...
- **Pérdida de caudal** debido a una sobreexplotación.

Por lo tanto, es importante tener en cuenta todos los aspectos anteriores para el correcto funcionamiento de la instalación.

4.2. 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 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.

4.2.1. Pretratamientos físicos

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-capa
- Microfiltración
- Ultrafiltración

4.2.1.1. 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.

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.

4.2.1.2. 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 éste 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,... en función de las características del fluido a filtrar y de la calidad final del mismo deseada.

Los cartuchos también pueden clasificarse en función del tipo de filtración:

- Filtros en profundidad
- Filtros plisados
- Filtros inorgánicos
- Filtros de membrana

4.2.1.3. 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,...).



4.2.1.4. 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.

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 pre-tratamiento de un agua, es muy importante el pre-tratamiento del agua, puesto

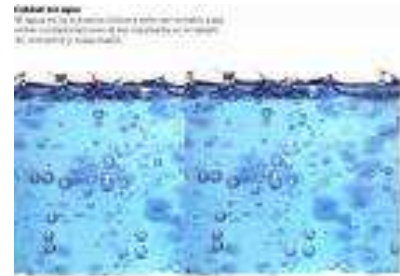
que el ensuciamiento de la membrana puede perjudicar fácilmente el proceso de purificación.

4.2.2. Pretratamientos químicos

Este tipo de pre-tratamiento está basado en la adición de unos reactivos determinados al agua de alimentación para variar sus propiedades y permitir una mejor operación.

4.2.2.1. 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 éste al medio acuoso, actúa aumentando el pH, debido a la presencia de la soda cáustica. Cuando se disuelve en agua, se generan dos sustancias que juegan el papel de oxidantes y desinfectantes. Estos son el ácido hipocloroso y el ión 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 presente 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



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.

4.2.2.2. 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.

4.2.2.3. 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.

4.2.2.4. 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.

Los primeros antiincrustantes utilizados fueron los basados en hexametáfosfatos. Estos sólo 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 poliácridatos en solución estabilizada, siendo una mezcla entre ambos la formulación utilizada en nuestra instalación. Este producto evitará la incrustación debida al carbonato cálcico, sulfato cálcico,... 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. La dosificación variará en función de la calidad del agua.

4.3. Unidad de electrodiálisis

La instalación estará constituida por una sola pila que trabaja en 4 etapas hidráulicas y 2 eléctricas. Cada etapa hidráulica trabajará con una eliminación de sales del 50%. La producción será de 1500m³/día.

Además, el trabajo se realizará en continuo, no siendo imprescindible el depósito para su almacenamiento, y siendo esta técnica la más utilizada cuando lo que se aprovecha es el permeado.

4.4. Limpieza de membranas

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. Éste 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 se recurrirá a la limpieza química, la cual se realizará periódicamente (cada 2 ó 3 semanas). El método más utilizado se denomina CIP (Clean In Place). Presenta la ventaja de que la limpieza se produce sin la necesidad de desmantelar el equipo. La intención es eliminar los residuos orgánicos, sales que puedan precipitar, etc. Este método está basado en hacer circular las diferentes disoluciones de limpieza a través del sistema y consta de las siguientes fases:

- ◆ **Flushing:** Constituye la primera fase del lavado y consiste en hacer pasar agua blanca para conseguir arrastrar las materias que hayan quedado adheridas a las membranas.
- ◆ **Recirculación con salmuera:** Consiste en hacer circular disoluciones de NaCl, primero la más diluida y luego la más concentrada. Con esto se consigue desregular el equilibrio osmótico entre los microorganismos presentes y el medio.
- ◆ **Adición de NaOH:** Se trata de hacer circular una disolución de hidróxido de Sodio, el cual se caracteriza por presentar pH básicos (10-12), de manera que se eliminan los microorganismos que pudieran permanecer.

- ◆ **Recirculación con HCl:** Se utiliza una disolución de ácido clorhídrico entorno a un pH de 0,4-0,5 con el fin de disolver los posibles precipitados químicos que hayan quedado incrustados en las membranas y reducir el pH tras la etapa anterior (pH fuertemente básico). Este cambio busca tener un efecto desinfectante.

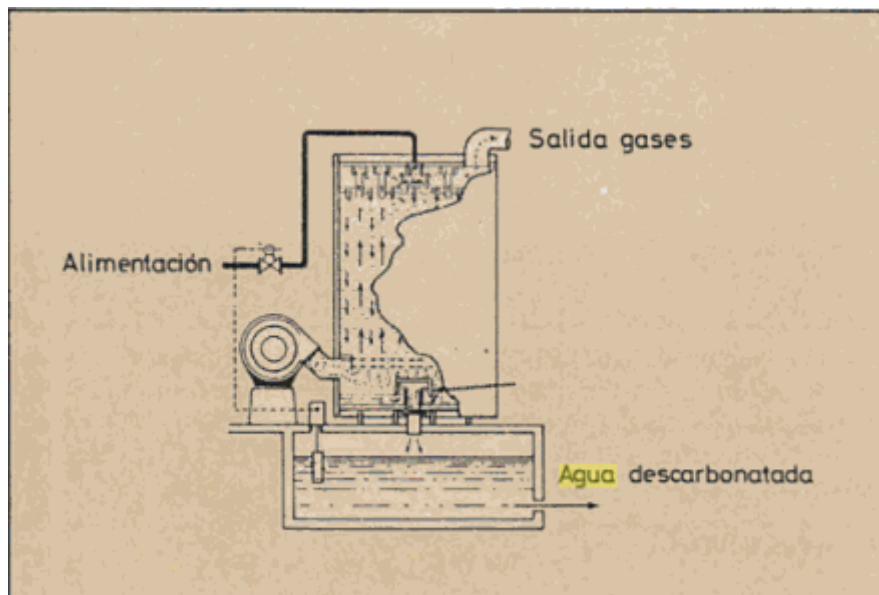
4.5. Post-tratamiento del agua obtenida

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. Por ello, es necesario realizar una serie de pasos:

- Descarbonatación o desgasificación
- Recuperación de la alcalinidad
- Desinfección

4.5.1. 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 éste 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 utilizar NaOH, pues como ya se indicó anteriormente, el

sodio provoca problemas de permeabilidad, infiltración e incrustaciones en los suelos de cultivos.

4.5.2. Recuperación de la 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.

En cuanto al carbonato de cálcico, éste 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,...

4.5.3. Desinfección

En el caso del presente trabajo, no será necesario llevar a cabo una desinfección, puesto que el destino es el uso agrícola. Sí 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).

Bibliografía consultada:

http://www.dipinnova.com/component/option,com_sobi2/sobi2Task,sobi2Details/catid,14/sobi2Id,152/Itemid,399/ → electrodiálisis para aguas salobres utilizando energía solar fotovoltaica.

<http://www.iq.uva.es/opsep2/Membranas/Electrodi%C3%A1lisis.pdf> → presentación de electrodiálisis (13 diapositivas guapas). Se pueden aprovechar imágenes.

<http://www.lenntech.com/espanol/irrigacion/Irrigacion-calidad-agua.htm> --> agua de riego. Calidad que debe reunir.

http://www.aguayriego.com/listar_trabajos.php?cat=riego → agua de riego.

<http://www.lenntech.com/espanol/conductividad-agua.htm> --> definición de conductividad y relación con STD

http://es.wikipedia.org/wiki/Agua_dura --> calcio y magnesio

<http://www.botanical-online.com/florcuidarplantasregaragua.htm> --> dureza en agua de riego

<http://www.lenntech.com/espanol/irrigacion/Riesgo-sodio-en-regadios.htm> --> peligro del sodio en el riego

http://cidta.usal.es/Contamin_agua/www1/www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/100CoAcu.htm

<http://www.avantel.net/~arbolag/html/carbo.htm> --> carbonatos y bicarbonatos

<http://www.elergonomista.com/alimentos/elagua.htm> --> algunos componentes del agua

http://www.bonatura.com/2.01.18.11_1r.html --> cloruros

<http://www.lenntech.com/espanol/sulfatos.htm> --> sulfatos

<http://www.ciese.org/curriculum/diproj2/es/fieldbook/fosfato.shtml> --> fosfatos

<http://www.slideshare.net/jose1001/tratamiento-residuos-peligrosos> --> sílice

<http://www.excelwater.com/esp/b2c/iron.php> --> hierro y manganeso

http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs24.html --> Bario

http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs159.html --> estroncio

<http://www.ciese.org/curriculum/diproj2/es/fieldbook/oxigeno.shtml> --> oxígeno disuelto

http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs114.html --> ácido sulfhídrico

Real Decreto 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas.

<http://mie.esab.upc.es/arr/T21E.htm> --> calidad del agua de riego

<http://209.85.229.132/search?q=cache:ITIZw71BDaoJ:www.fraisoro.net/documentos/recomencriteriosdeinterpretacionaguas.pdf+analisis+agua+de+riego&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=es&client=firefox-a> → calidad del agua

<http://209.85.229.132/search?q=cache:4K4NyWYap30J:www.fertitec.com/PDF/Clasificacion%2520y%2520Uso%2520de%2520las%2520Aguas%2520de%2520Riego.pdf+analisis+agua+de+riego&cd=4&hl=es&ct=clnk&gl=es&client=firefox-a> → teoría agua de riego

<http://mie.esab.upc.es/arr/T27E.htm> --> microelementos

<http://www.drinking-water.org/html/es/Treatment/Membrane-Processes-technologies.html#tech4> → teoría electrodiálisis

http://www.aguamarket.com/sql/temas_interes/tema_interes.asp?id_tema_interes=317&tema_interes=AGUAS+SUBTERR%20C1NEAS%3A+VENTAJAS+Y+PROBLEMAS → ventajas e inconvenientes de la captación de agua de pozos

[http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Tratamiento_aguas\(a\).htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Tratamiento_aguas(a).htm) → pretratamientos

<http://www.elriego.com/libros/indices/L16in.htm> --> índice

<http://elregante.galeon.com/aficiones1485906.html> --> filtros de arena

http://www.idegis.org/Info_profesionales_92.htm --> filtros de arena por gravedad

<http://www.salonhogar.com/ciencias/naturaleza/elagua/filtrosdeagua.htm> --> tipos de filtros de arena

<http://www.sefiltra.com/filtros-de-cartucho-cartuchos-filtrantes.php> --> filtros de cartucho

<http://www.basingeneria.com/es/filtros-precapa.htm> --> filtros precapa

<http://www.lenntech.com/espanol/Micro-y-Ultra-Filtracion.htm> --> microfiltración y ultrafiltración

http://es.wikipedia.org/wiki/Desinfecci%C3%B3n_del_agua_potable → desinfección del agua

<http://www.lenntech.com/espanol/Desinfeccion-del-agua/desinfectantes-hipoclorito-de-sodio.htm> --> hipoclorito de sodio

http://www.proz.com/kudoz/english_to_spanish/energy_power_generation/1066457-dechlorination.html --> dechloración

<http://es.wikipedia.org/wiki/Anti-incrustante> -->Anti-incrustante

http://www.oxidial.com.ar/es/products/liquids/antifouling-agent_B.2.2.html --> anti-incrustantes utilizados

<http://translate.google.es/translate?hl=es&sl=en&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Clean-in-place&ei=u2IySoyNII05jAfb44WGCg&sa=X&oi=translate&resnum=1&ct=result&prev=/search%3Fq%3DCIP%2Bcleaning%2Bin%2Bplace%26hl%3Des%26client%3Dfirefox-a%26channel%3Ds%26rls%3Dorg.mozilla::official%26hs%3DUYS%26sa%3DG> → limpieza química CIP

Tratamiento de aguas residuales. Miguel Rigola Lapeña.