



Master en Ingeniería y Gestión del Agua

Electrodialisis - Electrodesionización Mantenimiento y Costos de Explotación

2.016

PROFESOR

José Luis Pérez Talavera



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, No comercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

TECNOLOGÍA DE **ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE**

INDICE

CAPITULO 1 (Principios de electrodiálisis)	4
1.1. Efectos de un potencial de C.C. sobre los iones	4
1.2. Efecto de las membranas aniónicas y catiónicas	5
1.3. Diferencia de la E.D.R. con otros procesos de membranas	8
CAPITULO 2 (La pila de membranas).....	11
2.1. Características físicas.....	11
2.2. Membranas.....	14
2.2.1. <i>Membranas catiónicas</i>	14
2.2.2. <i>Membranas catiónicas gruesas</i>	14
2.2.3. <i>Membranas aniónicas</i>	15
2.3. Espaciadores	15
2.4. Electroodos.....	17
CAPITULO 3 (Membranas, espaciadores y electroodos).....	20
3.1. Membranas.....	20
3.1.1. <i>Membranas aniónicas</i>	20
3.1.2. <i>Membranas catiónicas</i>	21
3.1.3. <i>Propiedades de las membranas</i>	22
3.2. Espaciadores.....	23
3.2.1. <i>Modelos de espaciadores</i>	25
3.3. Compartimentos de electroodos.....	25
CAPITULO 4 (Tecnología de electrodiálisis E.D.)	27
4.1. Disociación de sales	27
4.2. Propiedades de las membranas	28
4.3. Ley de Faraday	28
4.4. Ley de ohm	29
4.5. Rendimiento de la corriente	30
CAPITULO 5 (Parámetros de diseño)	33
5.1. Densidad de corriente límite (Polarización)	33
5.2. Fugas de corriente / Quemaduras	35
5.3. Retrodifusión.....	35
5.4. Índice de Langelier (I.L.)	36
5.5. Saturación de sulfato cálcico	37
CAPITULO 6 (Diseño de la pila de membranas).....	39
6.1. Etapas.....	39
6.1.1. <i>Etapas hidráulicas</i>	39
6.1.2. <i>Etapas eléctricas</i>	44
6.2. Caída de presión / Espaciadores de flujo de agua	47
6.3. Presión diferencial	48
6.4. Transferencia de agua.....	49
6.5. Límite de temperatura.....	49
CAPITULO 7 (Sistemas de electrodiálisis E.D.)	50

7.1. Evolución histórica	50
7.2. E.D. continua (Unidireccional)	51
7.2.1. <i>Limitaciones del sistema E.D. unidireccional</i>	53
7.3. Electrodiálisis reversible (E.D.R)	54
7.3.1. <i>Compartimentos de electrodos</i>	56
CAPITULO 8 (Sistemas de alta recuperación)	58
8.1. Reciclado del concentrado.....	58
8.2. Reciclado del producto fuera de normas (OFF-SPEC)	59
8.3. Inversión secuencial	62
8.4. Frecuencia de inversión.....	64
8.5. Reciclado del flujo de electrodos	65
8.6. Resumen	66
8.7. Adición química	66
8.8. Conclusión	67

CAPITULO 1 (PRINCIPIOS DE ELECTRODIALISIS)

1.1. EFECTOS DE UN POTENCIAL DE C.C. SOBRE LOS IONES

La electrodiálisis (E.D.) es un proceso de separación electroquímico en el cual los iones son transferidos a través de membranas de una solución menos concentrada a otra de mayor concentración, como resultado de una corriente eléctrica continua.

Para comprender este proceso con mayor claridad, es importante conocer el efecto de una corriente continua sobre una solución iónica. Supóngase un tanque rectangular, figura 3.1, con un electrodo a cada extremo y lleno de una solución de cloruro sódico (ClNa).

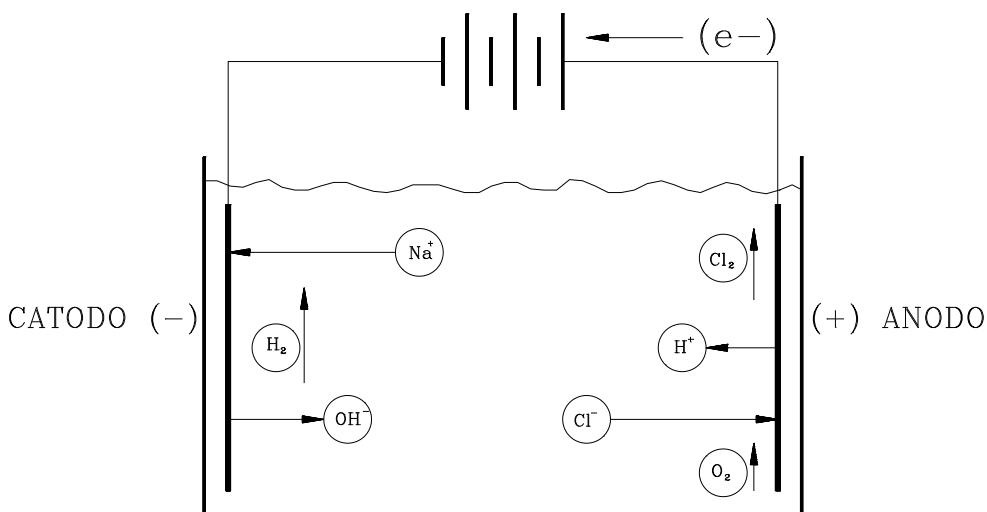


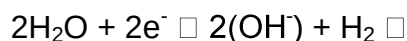
Figura 1.1.

Cuando se aplica un potencial de C.C. en los electrodos, ocurre lo siguiente:

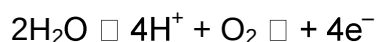
1. Los cationes (Na^+) son atraídos hacia el electrodo negativo llamado

cátodo.

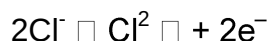
2. Los aniones (Cl^-) son atraídos hacia el electrodo positivo llamado ánodo.
3. En el cátodo ocurre una reacción de disociación del agua, relacionada con la ganancia de electrones (reducción.)



4. En el ánodo ocurre una reacción de disociación del agua, relacionada con la pérdida de electrones (oxidación.)



5. En el ánodo puede ocurrir también una reacción de formación de gas cloro.



Después de un cierto tiempo, todos los cationes estarían depositados sobre el cátodo y todos los aniones sobre el ánodo, estando por tanto el agua libre de iones, o sea, tendríamos agua pura, que podríamos retirar, para comenzar de nuevo el proceso.

Logicamente, este sería un procedimiento "casero", que no tiene utilidad industrial.

1.2. EFECTO DE LAS MEMBRANAS ANIONICAS Y CATIONICAS

Para controlar el movimiento de iones en el tanque que contiene la solución iónica y los electrodos, se pueden colocar varias membranas impermeables, que forman por tanto, compartimentos estancos, como se muestra en la figura 1.2.

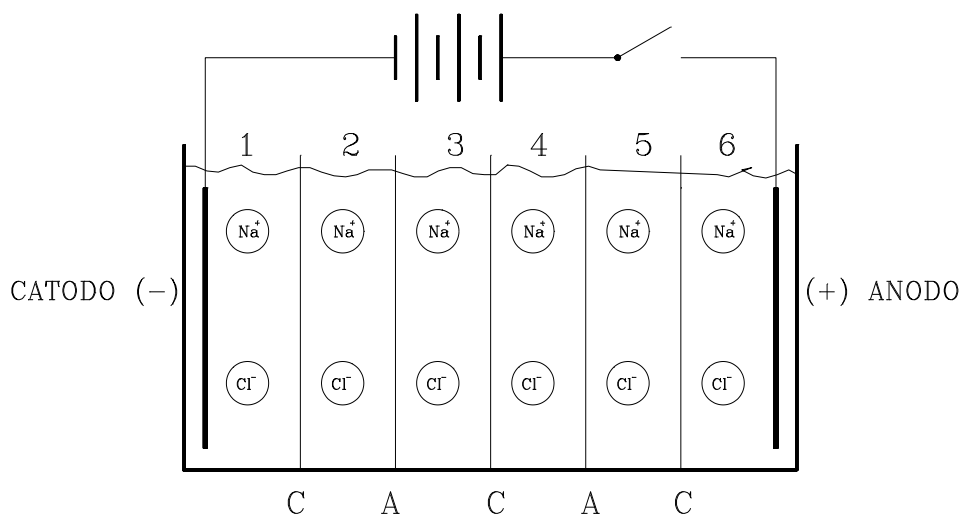


Figura 1.2.

En esta ilustración, se usan dos tipos de membranas:

1. Membrana de transferencia aniónica: Permite el paso de los iones a su traves, pero solo a los cargados negativamente, pero rechaza a los cargados positivamente. Esta membrana es eléctricamente conductora e impermeable al agua bajo presión. (Marcada como A en la figura 1.2.)
2. Membrana de transferencia catiónica: Permite el paso de los iones a su traves, pero solo a los cargados positivamente, rechazando a los cargados negativamente. Esta membrana es también eléctricamente conductora e impermeable al agua bajo presión. (Marcada como C en la figura 1.2.)

En la figura 1.2, no se está aplicando ningún potencial de C.C. y por tanto no existe transferencia iónica.

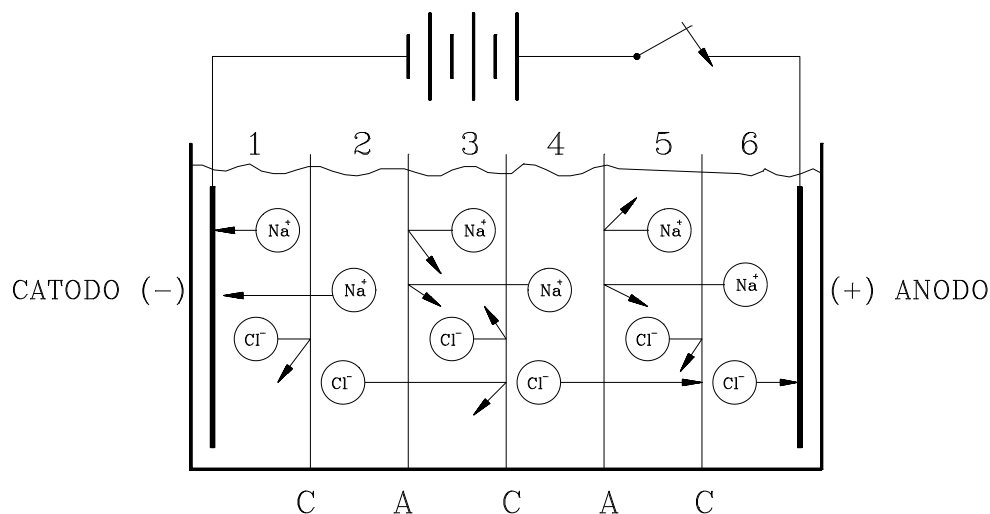


Figura 1.3.

La figura 3.3, muestra lo que ocurre cuando se aplica un potencial de C.C.

a) Compartimentos 1 y 6:

Estos compartimentos son los únicos que contienen los electrodos metálicos. En el ánodo se producen cloro gas y oxígeno, así como los iones H^+ . En el cátodo o electrodo negativo se producirán gas de hidrógeno e iones OH^- .

b) Compartimiento nº2:

1. Los iones de cloro Cl^- pasan a través de la membrana aniónica (A) hacia el compartimiento nº 3.
2. Los iones de sodio (Na^+) pasan a través de la membrana catiónica (C) hacia el compartimiento nº 1.

c) Compartimiento nº3

1. Los iones Na^+ no pueden pasar por la membrana aniónica, que los rechaza y por tanto permanecen en el compartimiento nº 3.

2. Los iones Cl^- no pueden pasar por la membrana catiónica que los rechaza y por tanto, se ven obligados a permanecer en el compartimiento nº 3.

d) Compartimiento nº 4

1. Los iones Cl^- pasan a través de la membrana aniónica hasta el compartimiento nº 5
2. Los iones Na^+ pasan a través de la membrana catiónica hasta el compartimiento nº 3

e) Compartimiento nº 5

1. Los iones Na^+ no pueden pasar a través de la membrana aniónica, que los rechaza y permanecen por tanto en el compartimiento nº 5.
2. Los iones Cl^- no pueden pasar por la membrana catiónica, que los rechaza y se ven obligados por tanto a permanecer en el compartimiento nº 5.

El efecto total muestra que los compartimentos 2 y 4 se han vaciado de iones, mientras que éstos han sido concentrados en los compartimentos 3 y 5.

Como se muestra en la figura 1.3, se han formado compartimentos alternados de soluciones concentradas y desmineralizadas en ésta célula de membranas, cuando se ha aplicado a través de sus electrodos un potencial de C.C.. Cuando se conectan propiamente, esta unidad dará como resultado dos flujos principales y separados; aguas desmineralizadas y concentradas, y dos flujos menores de los compartimentos de electrodos. En aplicaciones normales, se unen varios cientos de esos compartimentos desmineralizados y concentrados en una “pila o torre de membranas” para obtener el caudal de agua deseado. Estas pilas de membranas son el corazón de un sistema de E.D..

1.3. DIFERENCIA DE LA E.D.R. CON OTROS PROCESOS DE MEMBRANAS

1. Utiliza energía eléctrica directa en vez de energía de presión.
2. Las membranas de E.D. son impermeables.
3. La desalación se efectúa por remoción de los iones del fluido a tratar, al ser éstos los que pasan a través de la membrana.
4. El proceso no necesita energía de presión. En la práctica hay que suministrar al fluido solo la pérdida de carga a través del equipo (Max. 3,5 kg/cm²)
5. Las membranas son de dos tipos: Catiónicas, que están cargadas negativamente y aniónicas, cargadas positivamente.
6. El consumo energético es directamente proporcional a la cantidad de sales removidas.
7. La remoción máxima de sales por etapa es del 40 - 50%.
8. Solo remueve partículas cargadas eléctricamente.
9. Las pérdidas de agua son muy bajas, oscilando entre el 5 y el 20%.
10. No requiere normalmente el uso de productos químicos.
11. En el caso de requerir productos químicos, estos no se añaden al fluido a desalar sino al circuito auxiliar de salmuera con lo que las cantidades a utilizar son siempre muy inferiores a las de otros sistemas.
12. Las necesidades de pretratamiento son muy ligeras, ya que las membranas son muy resistentes a los oxidantes y al ensuciamiento orgánico, por lo que se obtienen muy buenos resultados en el tratamiento de efluentes de plantas de aguas residuales.
13. Las membranas admiten un nivel continuo de cloro libre residual de hasta 0,3 ppm, y valores de pH entre 1 y 10 o 12, dependiendo del modelo.
14. La salmuera puede trabajar con índices de Langelier positivos hasta 2,1 y niveles de saturación de sulfato cálcico del 150% sin adición de productos químicos. Con pequeñas adiciones de hexametáfosfato en el circuito auxiliar de salmuera, pueden alcanzarse saturaciones de hasta el 400%.
15. El costo de instalación suele ser mayor y el de operación menor, siendo el costo total en la mayoría de los casos menor que el de ósmosis inversa, para un cierto

rango de salinidad del agua de alimentación. (Sobre 2.000 ppm)

16. El diseño de los sistemas de E.D.R. permite limpiar las membranas de tres formas:
 - a) Continuamente por medio del cambio de polaridad
 - b) Periódicamente por limpieza química.
 - c) Ocasionalmente, y de ser necesario por el desmontaje y limpieza manual de las membranas individualmente.
17. La producción de cloro gas como subproducto origina un ahorro extra en los usos no agrícolas.
18. Es insensible a la cantidad de sílice existente en el agua bruta.

CAPITULO 2 (LA PILA DE MEMBRANAS)

El bloque de construcción básico de un sistema de E.D. es la pila de membranas. En este capítulo se discutirán las características físicas de la pila de membranas.

2.1. CARACTERISTICAS FISICAS

Si el tanque multicompartimental usado en el capítulo anterior (figura 1.2) se gira sobre un extremo, tendremos la orientación normal de una pila de membranas estándar. (figura 2.1.)

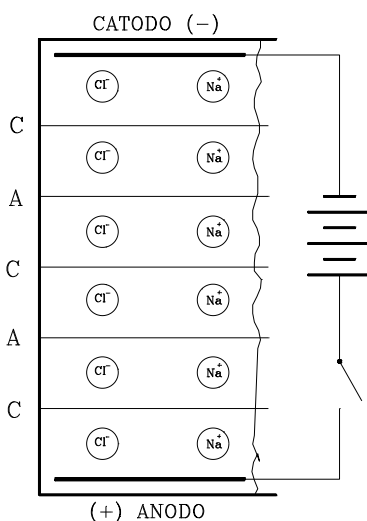


Figura 2.1.

Después de un examen más atento podemos ver en la pila una repetición de membranas aniónicas y catiónicas, colocadas horizontalmente, para facilitar el montaje y desmontaje. Los espacios entre membranas representan los caminos de los flujos de agua concentrados y desmineralizados, formados por separadores de plástico, llamados espaciadores de flujo concentrado y desmineralizado respectivamente. Estos espaciadores están hechos de polietileno de baja densidad y están dispuestos en la pila de tal modo que todos los flujos desmineralizados

están conectados juntos y todos los flujos de concentrado también están interconectados.

Una sección repetitiva, llamada par de célula, está compuesta de:

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

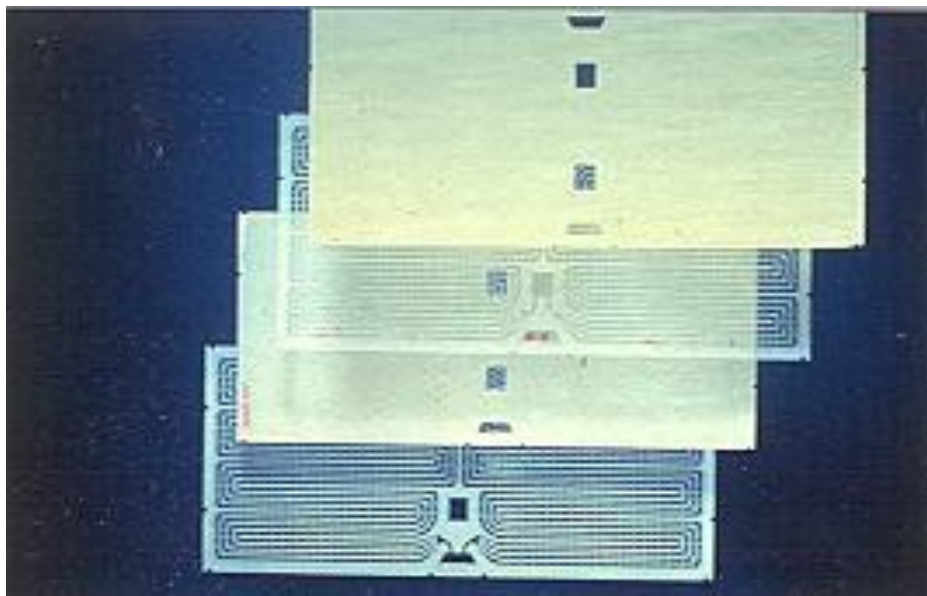


Figura 2.2.

Una pila típica puede tener entre 300 y 600 pares de células.

La figura 2.3, muestra el flujo de las dos corrientes de agua a través de la pila.

Una corriente de agua entra en la pila y fluye en paralelo, solo por los compartimentos de desmineralización, mientras que la otra corriente, entra a la pila de membranas y fluye en paralelo solo a través de los compartimentos de concentración.

Debe advertirse que los flujos de agua fluyen entre las membranas y no por ellas. Cuando los flujos de agua pasan entre las membranas, los iones son eléctricamente transferidos a través de las membranas, desde la corriente desmineralizada a la concentrada bajo la influencia del potencial de C.C.

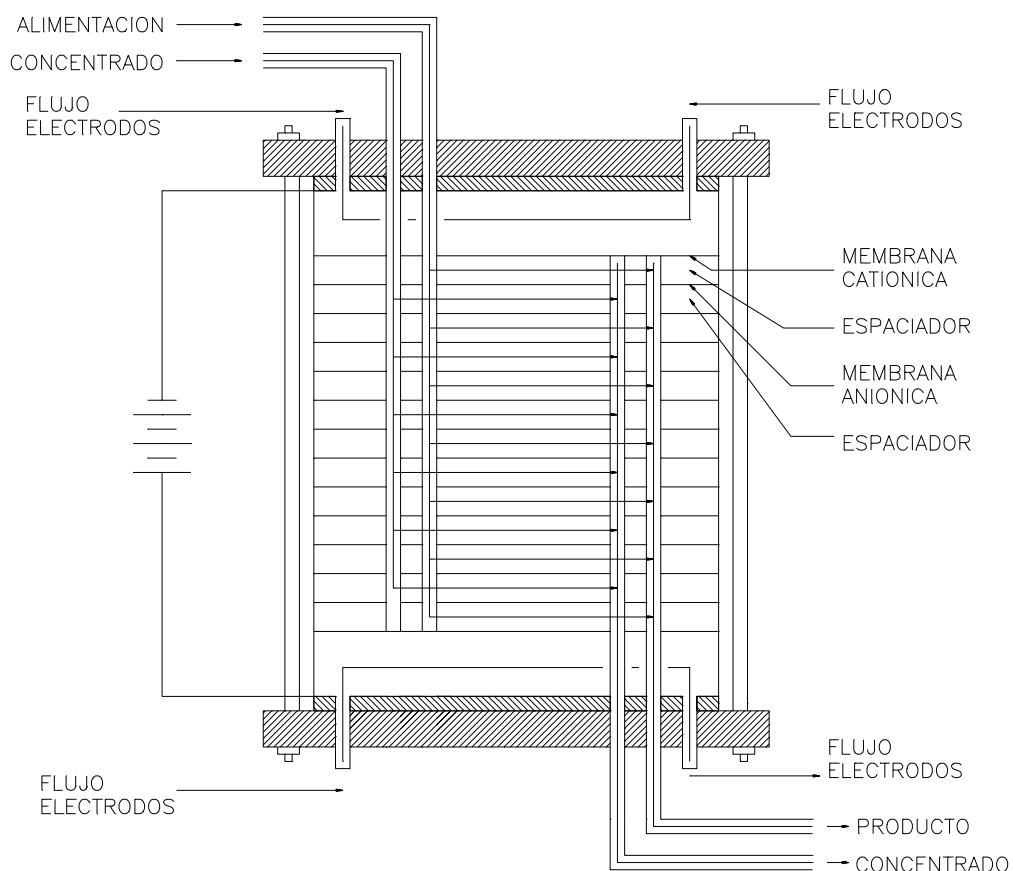


Figura 2.3.

El agua de los compartimentos de electrodos, no se mezcla con las corrientes de desmineralizado ni concentrado. Después de salir de la pila, el flujo combinado de electrodos se envía a un desgasificador, para sacar al exterior los gases de reacción. Más tarde se explicará algo más del flujo de electrodos.

También se muestra en la figura 2.3, las placas superior e inferior que son de acero, y que se usan con tirantes para comprimir la pila entera, sellando de este

modo las membranas y los espaciadores para proveer caminos de concentrado y desmineralizado y evitar fugas laterales de agua en las pilas.

Después de esta visión general de la pila y sus componentes principales pasemos a ver más detalladamente sus elementos funcionales.

2.2. MEMBRANAS

2.2.1. MEMBRANAS CATIÓNICAS

La membrana catiónica es, esencialmente, una resina intercambiadora de cationes, fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0,5 mm. Las propiedades básicas de las membranas catiónicas son:

- Esencialmente impermeables al agua bajo presión
- Eléctricamente conductora
- Solo transfiere cationes y rechaza los aniones

2.2.2. MEMBRANAS CATIÓNICAS GRUESAS

Una membrana catiónica gruesa tiene todas las propiedades de la membrana catiónica normal, pero está hecha con un espesor doble de la normal, (1mm.) con miras a resistir mayores presiones diferenciales. Esta membrana es utilizada en el compartimiento de electrodo y como membrana ínter etapa. Se discutirá con más profundidad cuando se hable de estos temas en capítulos posteriores.

2.2.3. MEMBRANAS ANIÓNICAS

La membrana aniónica es, esencialmente, una resina intercambiadora de iones fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0,5 mm. Las tres propiedades básicas de las membranas aniónicas son:

- Esencialmente impermeables al agua bajo presión
- Eléctricamente conductora
- Solo transfiere aniones y rechaza los cationes

Las membranas aniónicas tienen la misma forma, orificio de colectores y tamaño que la membrana catiónica.

2.3. *ESPACIADORES*

Los espaciadores están formados por láminas de material plástico, con los orificios que forman los colectores, que se alinean con los colectores de las membranas. Cuando una pila de membranas es montada correctamente, los orificios de los colectores en las membranas y espaciadores, forman 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.

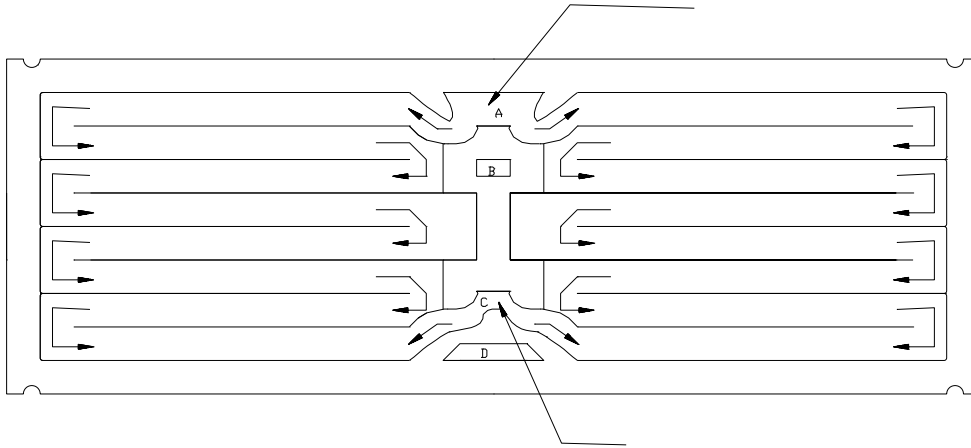


Figura 2.4

La figura 2.4, muestra el agua entrando en el orificio "A". El agua fluye a través del espaciador, como indican las flechas, y sale por el orificio "C".

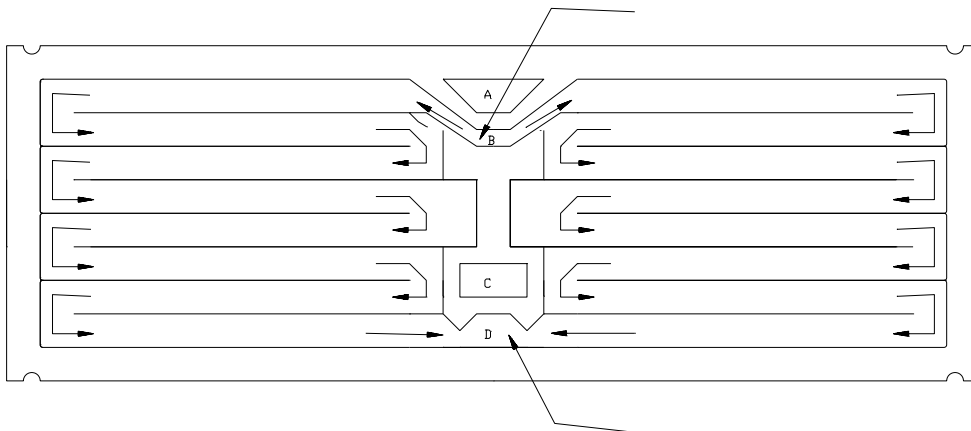


Figura 2.5

En la figura 2.5, se aprecia que el agua que entra por el colector A se encuentra con un espacio estanco a su alrededor y por tanto no puede fluir por el espaciador y continúa su camino hacia el siguiente espaciador. Lo mismo sucede en el colector C.

Se observa además que el agua que está entrando por el colector B, se ve obligada a dividirse en dos flujos, tal y como indican las flechas y después de recorrer el espaciador, sale por el colector D.

Suponga que el espaciador de la figura 2.5 está en un compartimiento desmineralizado y el espaciador de la figura 2.4 en un compartimiento concentrado. Ambos flujos entrantes, recorrerán la pila verticalmente, el desmineralizado por el canal B y el concentrado por el canal A. Cuando el flujo de desmineralizado se encuentra con un espaciador dispuesto como en la figura 2.5 se verá obligado a discurrir entre dos membranas en su camino de salida hacia el colector D, mientras que el flujo de concentrado, al encontrarse con un espacio estanco a su alrededor no podrá fluir y continuará su camino hacia el siguiente espaciador. Veamos ahora lo que sucede en un compartimiento de concentrado.

Supongamos otro espaciador, idéntico al anterior, solo que lo hemos girado horizontalmente 180° , es decir, media vuelta en un plano horizontal.

Ahora nos encontramos en un compartimiento de concentrado y puesto que hemos girado el espaciador, el flujo que recorre ahora el camino hecho en el espaciador, es el flujo que entra por el colector trapezoidal D, saliendo por el colector rectangular B, mientras que el flujo que entra por el colector rectangular C, no puede fluir y continúa su camino hacia el siguiente espaciador.

De esta forma, disponiendo alternativamente los espaciadores, mantendremos los flujos de concentrado y desmineralizado separados entre sí a la entrada y a la salida con un solo tipo de espaciador, eliminando la necesidad de fabricar dos tipos diferentes de espaciadores.

2.4. ELECTRODOS

Los electrodos metálicos localizados en los extremos superior e inferior de la

pila, son usados para conducir la corriente continua. Un electrodo es normalmente una lámina de titanio recubierta de platino o de niobio.



Figura 2.6

Los bordes de color negro del electrodo de la figura 2.6 son de cinta aislante, para evitar el cortocircuito entre electrodos a través de los colectores e inhibir el ataque del hidrógeno que podría tener lugar en los bordes de los orificios del espaciador. El aislamiento alrededor de los colectores y conducciones del flujo del electrodo, es de un compuesto similar a la goma.

La vida de un electrodo depende generalmente de la composición iónica del agua a tratar y del amperaje transportado por unidad de área el electrodo. En general, altos amperajes y agua con contenido elevado de cloruros o alta tendencia incrustante, tenderán a acortar la vida del electrodo.

CAPITULO 3 (Membranas, espaciadores y electrodos)

En esta sección se dirá algo más acerca de las propiedades físicas y funciones de las membranas aniónicas y catiónicas, espaciadores de flujo y compartimentos de electrodos.

3.1. MEMBRANAS

Se utilizan dos tipos de membranas en los procesos de E.D., las membranas de transferencia aniónica y la catiónica. Cada membrana tiene la apariencia física de una lámina de plástico, es esencialmente impermeable al agua bajo presión, y está reforzada con un tejido de fibra sintética. En las membranas que son translúcidas, el tejido de soporte se puede ver en su interior. Deben poseer un espesor uniforme, con una textura suave.

Las membranas se fabrican normalmente con un espesor de aproximadamente 0,5 mm. La excepción a esto es la membrana catiónica gruesa, usada en el compartimiento de electrodos y para separar etapas hidráulicas. Esta membrana tiene aproximadamente el doble de espesor que la normal.

3.1.1. MEMBRANAS ANIÓNICAS

Durante la producción de la membrana aniónica, se fijan cargas positivas en la membrana matriz. Estas cargas positivas fijadas son normalmente de iones de amonio cuaternario que repelen a los iones positivos y permiten la transferencia de iones negativos a su través. La figura 3.1, muestra la estructura química de una membrana aniónica típica.

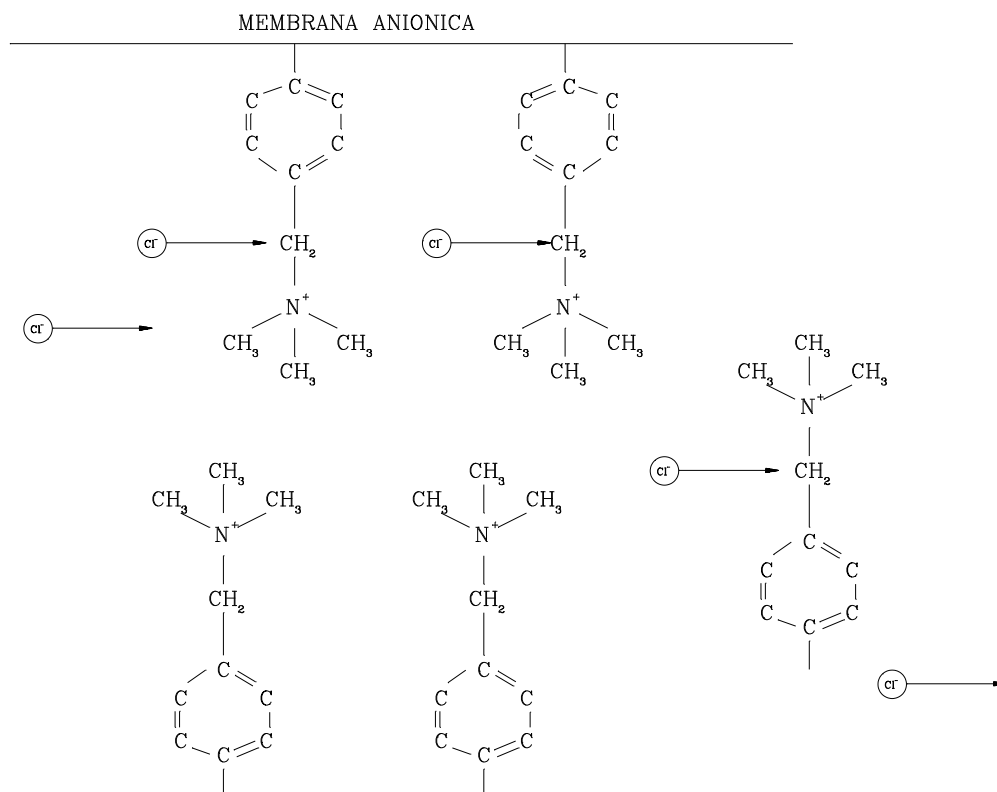


Figura 3.1.

Las membranas aniónicas, poseen dos problemas, de un lado, el enlace del amonio cuaternario con la matriz es debil, por lo que se rompe con facilidad, perdiendo paulatinamente la capacidad de transferencia y de otro lado, al estar cargada positivamente, atrae a los coloides presentes en el agua, (Que poseen carga negativa), ensuciandose con facilidad.

3.1.2. MEMBRANAS CATIÓNICAS

Durante el proceso de producción de una membrana catiónica, se fijan cargas negativas en toda la membrana. Las cargas negativas fijadas suelen ser sulfonatos, que repelen los iones negativos y permiten el paso de iones cargados positivamente. La figura 3.2, muestra la estructura química de una membrana catiónica típica.

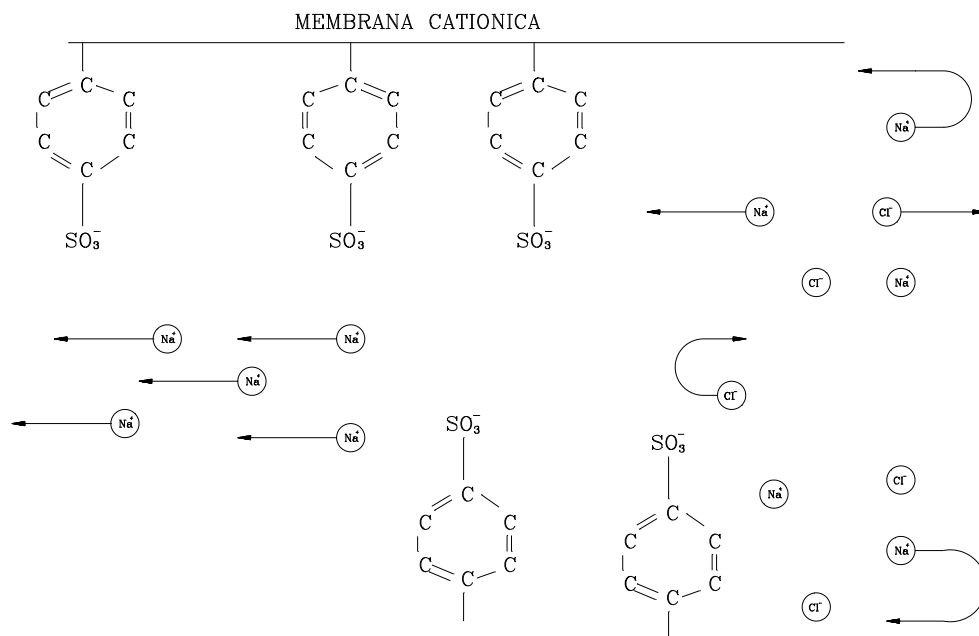


Figura 3.2.

Al contrario de lo que les ocurre a las aniónicas, las membranas catiónicas poseen todas las ventajas.

El enlace del ión sulfonato con la matriz es muy fuerte y por tanto la membrana no pierde características a lo largo de su vida, no necesitando reemplazarse.

El radical sulfonato es altamente hidrofílico (Es la base del ácido sulfúrico, que es muy ávido del agua).

Al poseer cargas negativas, repele a los coloides y por tanto no se ensucia.

3.1.3. PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS

Ciertas propiedades son típicas de ambas membranas, aniónica y catiónica:

- Baja resistencia eléctrica
- Insolubles en disolución acuosa
- Semi-rígida para facilitar su manejo durante el montaje

- Resistencia al cambio de pH de 1 a 13
- Operación a temperaturas de hasta 50°C
- Resistente a la presión osmótica cuando trabaja entre soluciones salinas de 220 y 30.000 ppm
- Expectativas de larga vida
- Impermeables al agua bajo presión

3.2. ESPACIADORES

Los espaciadores forman los caminos de los flujos de desmineralizado y concentrado en el interior de la pila. Están fabricados de material plástico (polietileno o polipropileno) con canales de flujo preformados. Existen dos clases, los de camino tortuoso y los de malla. En la figura 3.3, se muestra un diseño del tipo tortuoso.

Como se puede observar, en este tipo el agua sigue un camino prefijado por el diseño de los canales de paso.

En los de malla, no existen canales de paso, sino que el espaciador está formado por una malla igual a la utilizada en las membranas de osmosis inversa y el agua se distribuye por toda su superficie.

Las funciones de un espaciador son diversas:

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 alternancia de flujos (alimentación –salmuera) a lo largo de la pila

Provocar la mayor turbulencia posible (Numero de Reynolds alto)

En la figura, el flujo entrante al espaciador por el colector A, se divide en dos flujos simétricos B y C, los cuales a su vez están divididos en tres o cuatro flujos paralelos, que recorren sus caminos por el espaciador hasta que alcanzan el colector de salida D.

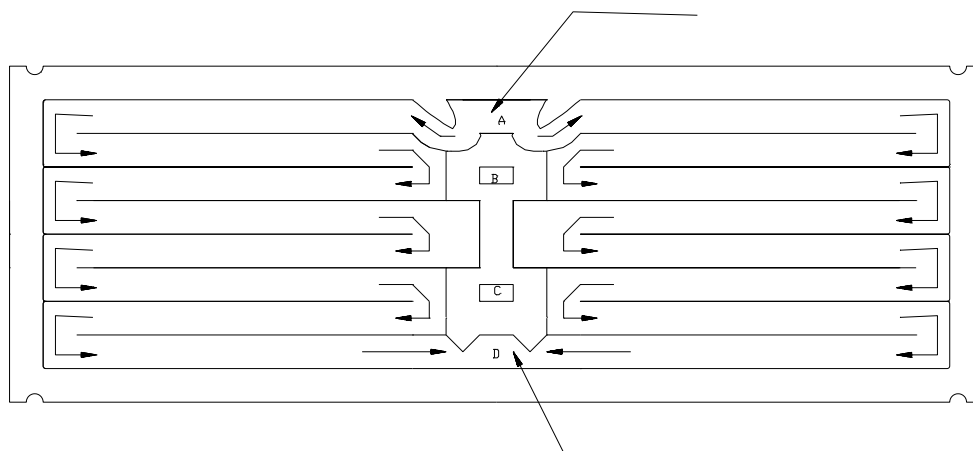


Figura 3.3

Si examinamos más de cerca el espaciador, revelará una disposición de barreras cruzadas, que parecen bloquear el paso del agua. Sin embargo, el flujo solo tiene un camino y se verá forzado a recorrer el espaciador salvando estas barreras y efectuando, por tanto, un recorrido ondulante. Este tipo de flujo causa turbulencias en el agua, permitiendo mayor corriente eléctrica por unidad de área, y por tanto, mayor rendimiento del área de la membrana en la pila.

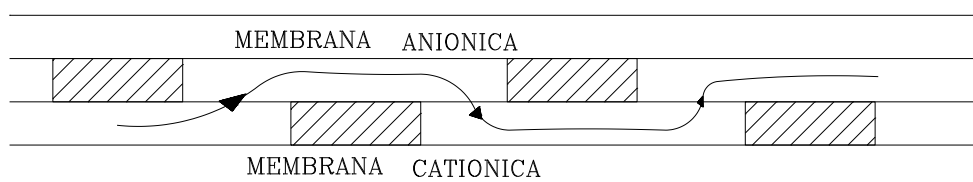


Figura 3.4.

La figura 3.4, muestra un corte seccional de un espaciador de camino tortuoso, ilustrando el flujo alrededor de las barreras cruzadas.

Este diagrama muestra un espaciador entre dos membranas para formar un compartimiento de flujo. Se puede ver también que el espaciador está formado por dos láminas de plástico preformadas y pegadas juntas. La turbulencia creada en el flujo por las barreras cruzadas, promueve la mezcla, lo cual ayuda a la transferencia

de iones a la superficie de la membrana. La turbulencia disminuye el espesor de la capa límite y reduce las incrustaciones en la superficie de las membranas.

3.2.1. PARÁMETROS DE ESPACIADORES

La longitud del camino del flujo determinará la velocidad del agua para una caída de presión dada en la pila de membranas. La velocidad del agua determina a su vez el grado de turbulencia en el camino del flujo y la cantidad de tiempo que una cantidad de agua es expuesta a la influencia del campo eléctrico. Por tanto, la cantidad de desalinización por recorrido, o paso por un par de células, la velocidad del agua y la caída de presión son parámetros de diseño.

3.3. COMPARTIMENTOS DE ELECTRODOS

Los compartimentos de electrodos se localizan normalmente en los extremos alto y bajo de la pila de membranas. Un compartimiento de electrodo está formado por un electrodo, un espaciador de flujo de electrodo y una membrana catiónica gruesa.

El espaciador de electrodo tiene un espesor varias veces mayor que uno normal. Esto le permite pasar un gran caudal de agua por su interior, reduciendo las incrustaciones y desgastes en el electrodo. La membrana catiónica gruesa se usa para compensar la ligera presión diferencial que conviene mantener entre el compartimiento de electrodo (aprox. $0,15 \text{ kg./cm}^2$ inferior) y el flujo principal de la pila.

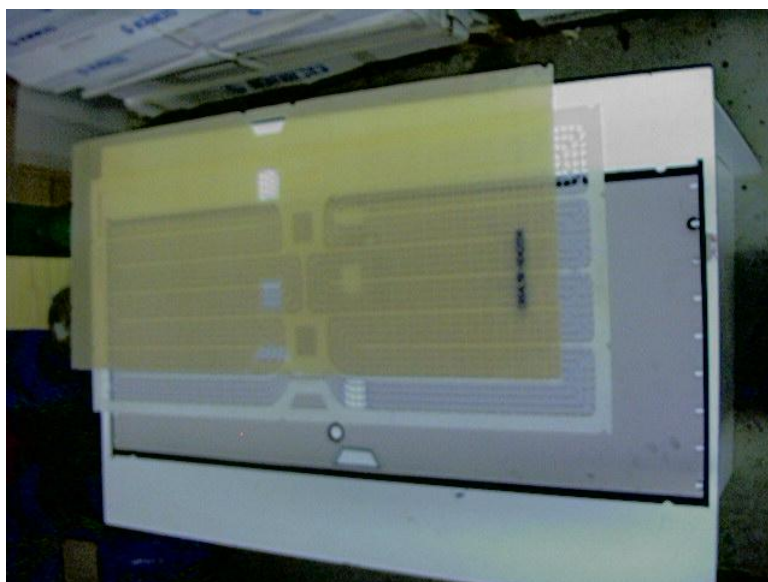


Figura 3.5.

El espaciador de electrodo tiene canales preformados que evitan que el agua del compartimiento de electrodos entre en los flujos principales de la pila. Cuando se coloca adyacente a una membrana catiónica gruesa, el espaciador del electrodo forma un camino del flujo independiente. El espaciador de electrodo, con sus canales colectores separados se muestra en la figura 3.5, entre el electrodo y la membrana catiónica gruesa.

El afluente del compartimiento del ánodo (electrodo positivo), contiene oxígeno gas (O_2), iones de hidrógeno (H^+), y en el caso de aguas que contengan cloro, gas de cloro (Cl_2). Los iones de hidrógeno reducen el pH del agua en este compartimiento, creando una solución ácida. El afluente del cátodo (electrodo negativo), contiene hidrógeno gas (H_2), e iones hidroxilos (OH^-). Estos iones OH^- , aumentan el pH del agua en este compartimiento, creando una solución 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.

CAPITULO 4 (TECNOLOGIA DE ELECTRODIALISIS- E.D.)

La electrodiálisis (E.D.), se ha explicado como un proceso en el cual los iones son transferidos de una solución menos concentrada a otra más concentrada por medio de una corriente continua. La pila de membranas y sus componentes ya han sido explicados. Esta sección revisará y aumentará los conocimientos básicos de la tecnología de E.D.

Las leyes primarias que controlan los procesos de E.D. son:

- Disociación de las sales en agua
- Propiedades de las membranas
- Ley de Faraday
- Ley de Ohm

4.1. DISOCIACIÓN DE SALES

Los iones se forman por disociación de las sales minerales, álcalis y ácidos en el agua. El cloruro de sodio (ClNa), que es un sólido cristalino, se disuelve y disocia en el agua para formar iones de sodio (Na^+) e iones de cloruro (Cl^-). Estos iones conducen la electricidad por la solución. La conductividad de una solución dependerá de la concentración de iones, tipo y temperatura de la solución.

NOTA: Ciertas materias que se disuelven en el agua, tales como los azúcares, no forman soluciones iónicas. Las soluciones de esas materias no contienen iones, no conducen la electricidad y por tanto, no son afectadas por el proceso de E.D.

4.2. PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS

Las más importantes propiedades de las membranas de E.D. son su selectividad de iones y su conductividad eléctrica. La selectividad de las membranas catiónicas y aniónicas, son del 90% generalmente, para soluciones de normalidad 0,5 a 0,7, pero disminuye con concentraciones más elevadas. Las membranas tienen baja resistividad, por lo que disminuye el consumo de energía, lo cual aumenta el rendimiento del sistema de E.D.

La resistencia de las membranas disminuye al aumentar la concentración de la solución. También, el cambio de resistencia eléctrica del sistema de membranas con la temperatura, tiene un efecto similar al cambio de la resistencia de la solución. Otras propiedades de las membranas se han discutido en el capítulo 3.

4.3. LEY DE FARADAY

La ley de Faraday, relacionada con el proceso de E.D. dice que el paso de una cantidad de 96.500 amperios de corriente eléctrica en un segundo, transferirá un gramo equivalente de sal, de los compartimentos de diluido a los de concentrado.

La cantidad de 96.500 amperios/segundo es un Faraday. Esto es igual a 26,8 amperios durante una hora. La cantidad de cloruro sódico, por ejemplo, que será transferido en un proceso electrolítico por 96.500 amperios/segundo, será de un equivalente gramo de iones sodio (23 g), al cátodo y un equivalente gramo de iones cloruro (35,5 g), al ánodo, con un rendimiento del 100% de la corriente.

La ley de Faraday, por tanto, es la base para calcular la cantidad de corriente necesaria en un sistema de E.D. para transferir una cantidad de sales específica. Esta ley, puesta en la forma para usar en cálculos de E.D. es:

$$I = \frac{F^* \times F_d \times \Delta N}{e \times N^*}$$

Donde:

I = Corriente continua en amperios

F* = Constante de Faraday (96.500 amperios/segundo equivalente)

ΔN = Cambio en la normalidad del flujo desmineralizado entre la salida y la entrada de la pila de membranas

F_d = Flujo de agua desmineralizada en la pila (en litros/segundo)

e = Rendimiento de la corriente

N* = Número de pares de células

4.4. LEY DE OHM

La ley de Ohm dice que el potencial (E) de un sistema eléctrico es igual al producto de la corriente (I) por la resistencia del sistema (R)

$$E = I \times R$$

Donde:

E se expresa en voltios

I se expresa en amperios

R se expresa en ohmios

Para determinar las necesidades de voltaje para un sistema dado, la corriente se calcula por la ley de Faraday y la resistencia se determina por los componentes de la pila de membranas y la solución a tratar.

Los componentes que contribuyen a la resistencia de la pila son los expresados en la siguiente ecuación:

$$R_{cp} = R_{cm} + R_{am} + R_c + R_d$$

Donde:

R_{cp} = Resistencia, por unidad de área, de un par de células

R_{cm} = Resistencia, por unidad de área, de la membrana catiónica

R_{am} = Resistencia, por unidad de área, de la membrana aniónica

R_c = Resistencia, por unidad de área, del concentrado

R_d = Resistencia, por unidad de área, del desmineralizado

Las dimensiones de todas las resistencias son el Ohmio/cm²

Los factores que afectan a la resistencia de las pilas son, entre otros, la temperatura, tipo de iones y concentración de la solución. Mayor temperatura y mayor concentración de la solución, disminuyen la resistencia de la solución y por tanto, la resistencia de la pila. Normalmente, por cada grado °C de cambio en la temperatura, hay un 2% de cambio en la resistencia de la pila. En cuanto a los tipos de iones, la resistencia disminuye cuando los porcentajes de Na⁺ y Cl⁻ (basados en los epm totales de cationes y aniones), aumentan.

4.5. RENDIMIENTO DE LA CORRIENTE

Con base a la ley de Faraday, se puede calcular el rendimiento de la corriente que se está utilizando en la transferencia de sales en la pila. Teóricamente, por cada 26,8 amperios/hora, se transferirá un equivalente gramo de sal en cada par de células. En este caso el proceso tendría un 100% de rendimiento.

Para determinar el rendimiento de la corriente, se han de obtener lecturas de

operación que incluyan:

- Corriente (amp.)
- Caudal de desmineralizado (F_d en litros por hora)
- Concentración del agua de alimentación y producto
- Número de pares de células entre electrodos

Dada esta información, el rendimiento de la corriente (e) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$e = \frac{F^* \times F_d \times \Delta N \times 100}{I \times N^*}$$

La siguiente lista es una lectura de operación:

Agua de alimentación:	0,0480 N (2805 ppm)
Agua producto:	0,0078 N (456 ppm)
Caudal de diluido (F_d):	9.765 l/h
Amperímetro (I):	25,5 A
Pares de células (N^*):	450
Constante de Faraday (F^*):	26,8 A/h

La diferencia entre las concentraciones de alimentación y producto es:

$$\Delta N = 0,0480 - 0,0078 = 0,0402$$

Por tanto:

$$e = \frac{26,8 \times 9.765 \times 0,0402 \times 100}{25,5 \times 450} = 91,7\%$$

Las pilas de membranas comerciales tienen un rendimiento estándar mínimo del 88% para aplicaciones con aguas salobres. Un rendimiento del 88% nos dice que el 88% de la corriente empleada se invierte en la transferencia de iones del flujo desmineralizado al concentrado. El 12% restante son pérdidas y se puede atribuir a varias causas, entre las cuales están las fugas cruzadas y la retrodifusión. Otras causas son:

- Disipación por calor
- Membranas no 100% selectivas
- Polarización
- Quemaduras (corrientes horizontales)
- Contrapotenciales por diferencia de concentración
- Membranas no 100% impermeables
- Fugas directas a través del colector

CAPITULO 5 (PARAMETROS DE DISEÑO)

El diseño de una planta de electrodiálisis (E.D.) está basado en las especificaciones de calidad del agua producto y en las características del agua de alimentación a ser tratada. Hay varios parámetros limitadores que han de ser tenidos en cuenta para un correcto diseño de la planta. Estos parámetros se discuten a continuación.

5.1. DENSIDAD DE CORRIENTE LIMITE (POLARIZACION)

En todos los procesos de desalación, esta no se realiza en una sola etapa, sino en múltiples. (En evaporación suelen ser más de 20 y en ósmosis inversa oscilan entre 7 y 21 normalmente).

En el caso de la ED, las etapas están comprendidas normalmente entre 1 y 3 por motivos de economía.

La densidad de corriente aplicada en una pila se puede aumentar progresivamente desde cero, hasta un valor que iguale al del número de iones equivalentes que pueden ser transferidos. Este punto se llama densidad de corriente límite. La densidad de corriente se expresa usualmente como $(DC/Nd)_{lim}$, donde DC es la densidad de corriente (cantidad de corriente transportada por unidad de área de la superficie de membrana) y Nd es la normalidad del flujo desmineralizado de salida. Este límite es función de la velocidad del fluido, de su temperatura y del tipo de iones presentes.

Mientras que prácticamente todos los iones son transportados a través de las membranas de E.D. por transporte eléctrico, solo alrededor de la mitad de los iones que alcanzan las superficies de las membranas desde la masa de la solución, 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 la célula desmineralizadora 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 solución próxima a la membrana se llega a vaciar tanto en iones que la resistencia eléctrica sube rápidamente. El aumento de la resistencia se traduce en un aumento de voltaje que eventualmente excede el voltaje de ruptura para las moléculas de agua causando, por tanto, su disociación, y formando iones de hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). Cuando tal disociación de moléculas de agua se produce, hemos alcanzado el punto de “polarización”. La transferencia de iones de hidrógeno en el caso de las membranas catiónicas, y de hidroxilos en el caso de las membranas aniónicas, llega a ser apreciable. La extensión de la transferencia de iones de hidrógeno e hidroxilo depende de la proporción de la concentración de iones de hidrógeno y los otros cationes en la superficie de la membrana catiónica y la proporción de iones de hidroxilos y los otros aniones en la superficie de la membrana aniónica. La polarización ocurre entonces gradualmente cuando el voltaje aplicado a la célula de membrana (y por tanto la densidad de corriente) se aumenta.

La polarización, como se ha discutido anteriormente, solo ocurre en los compartimentos desmineralizados, puesto que es en estas células donde existe una menor cantidad de iones para transportar la corriente. La polarización no llega a ser, normalmente, significativa en ambas membranas al mismo tiempo. Cuando la polarización llega a ser pronunciada en una membrana de transferencia aniónica, los iones hidroxilos, son transferidos a la corriente de concentrado, haciéndola alcalina. Los iones de hidrógeno remanentes en la célula desmineralizadora procedente del agua disociada, da lugar a una disminución en el pH del flujo desmineralizado. La polarización de las membranas catiónicas, origina una transferencia de iones de hidrógeno al flujo de concentrado, disminuyendo su pH y aumentando el pH del flujo desmineralizado. Por tanto, cambios en el pH de los flujos de proceso, pueden indicar polarización.

La operación en densidades de corriente suficientes para causar una polarización significativa puede dar lugar a varias ineficiencias.

- La resistencia del par de células aumenta, de modo que también aumentará el consumo de energía.
- El rendimiento de la corriente disminuirá, puesto que la transferencia de iones de hidrógeno y/o hidroxilos, 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.

Se ha observado que el límite de la densidad de corriente puede ser aumentado si la temperatura del fluido y/o su velocidad aumenta.

En el diseño de sistemas de E.D. comerciales se usa el 70% de la densidad de corriente límite, como máxima densidad de corriente permitida. Este valor prevé un razonable nivel de seguridad en el diseño del sistema.

5.2. FUGAS DE CORRIENTE / QUEMADURAS

Para un sistema dado de E.D., existe un límite en el voltaje aplicado. Este límite está en función de la temperatura del agua, concentraciones de los flujos, tamaño de la membrana y sección interior del colector. Si se sobrepasa este límite, una corriente eléctrica excesiva pasará horizontalmente 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 el voltaje al cual resulta afectado solo el par adyacente al electrodo.

La práctica normal de diseño limita la tensión aplicada a la pila a un 80% de este voltaje.

5.3. 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 C.C. La retrodifusión debe ser tomada en cuenta durante el diseño de una planta de E.D. Típicamente, el rendimiento de las membranas disminuye cuando la proporción entre las concentraciones es igual o superior a 150:1.

5.4. INDICE DE LANGELETT (I.L.)

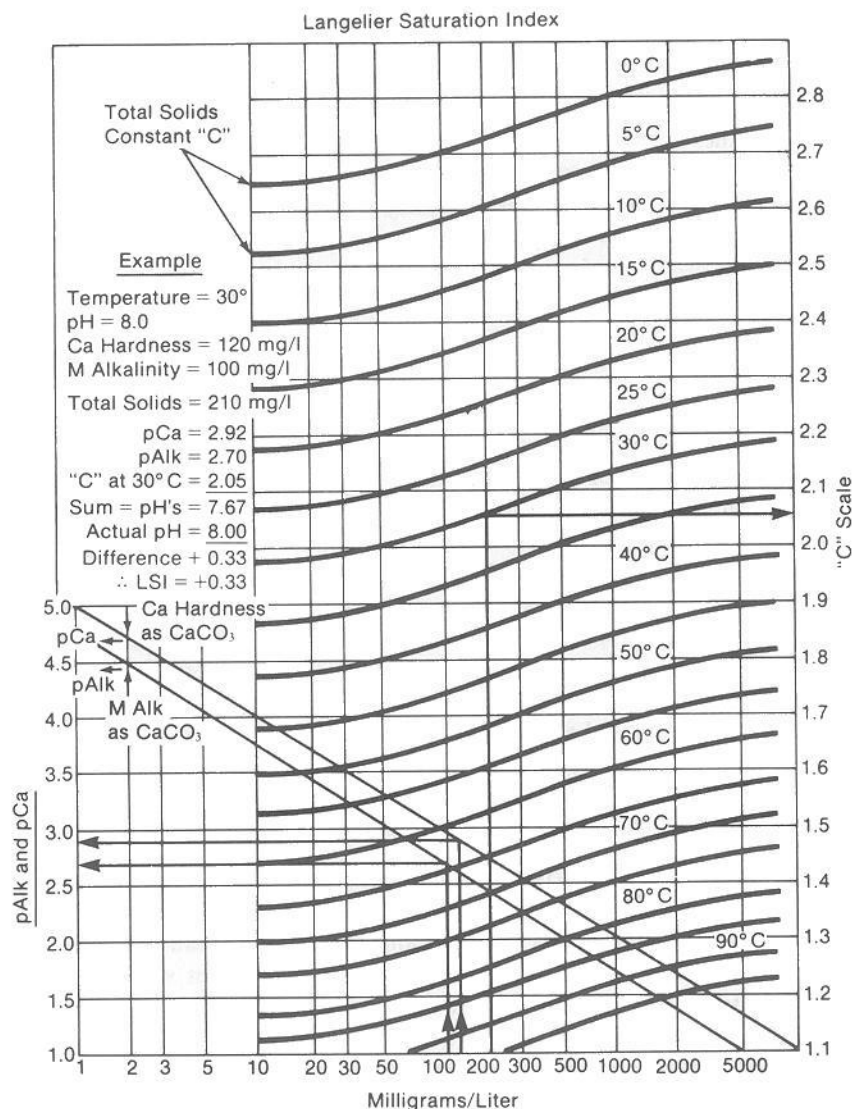


Figura 5.1.

La acumulación de iones de Ca^{++} , STD y HCO_3^{--} en el flujo de concentrado como resultado de la purificación del flujo desmineralizado, puede dar lugar a incrustaciones de Ca CO_3 . El índice de Langelier (I.L.) indica la tendencia incrustante de un agua específica. Este índice es la diferencia entre el valor actual del pH y el pH al cual ocurrirá la incrustación para una composición particular de iones presentes. Por tanto, un índice positivo indica una tendencia a incrustar, mientras que un índice negativo indica una tendencia negativa a la formación de incrustaciones o corrosiones.

Los sistemas de E.D. que utilizan la inversión de la polaridad de la pila para controlar la formación de incrustaciones, (EDR) pueden operar con valores del I.L. de hasta +2,1.

Se pueden hacer ciertos ajustes en el sistema para disminuir el I.L. que incluyen la disminución del porcentaje de sal extraído o bien la disminución del porcentaje de agua recuperada.

Por otra parte, el I.L. puede bajarse mediante el pretratamiento del agua de alimentación para eliminar los iones Ca^{++} y Mg^{++} o por inyección química de ácido, en el flujo de concentrado.

5.5. SATURACIÓN DE SULFATO CÁLCICO

Puesto que la solubilidad del sulfato cálcico es solo ligeramente sensible al pH, el control y prevención de la precipitación del SO_4Ca se lleva a cabo limitando la concentración de calcio y sulfato en el flujo de concentrado. Así como en el I.L. esto se puede mejorar disminuyendo el porcentaje de sal extraída o disminuyendo el porcentaje de recuperación de agua.

La alternativa química incluye la inyección de agentes tales como el hexametáfosfato sódico, poliacrilatos, fosfonatos, maleatos, etc. en el agua de alimentación o en el flujo de concentrado, que inhiban la precipitación del SO_4Ca o bien eliminando el Ca^{++} del flujo de alimentación.

Afortunadamente, aun altas concentraciones de SO_4Ca por encima del nivel reconocido de saturación, pueden ser manejadas satisfactoriamente en los sistemas de electrodiálisis reversible (E.D.R.) Esto es debido al retraso de tiempo existente en la precipitación del SO_4Ca combinado con el efecto de inversión de polaridad.

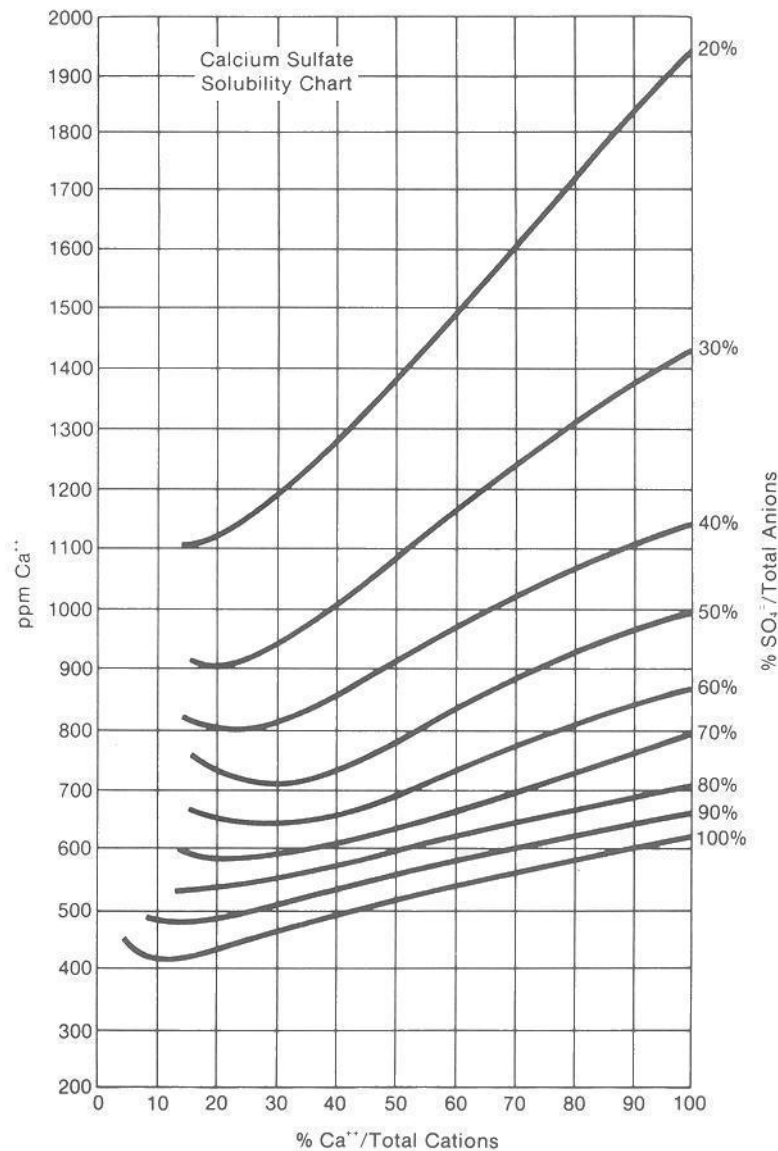


Figura 5.2.

El límite superior de diseño de un sistema E.D.R., sin adición de química es un 175% de la saturación de SO₄Ca. Con adición de química al flujo de concentrado, este límite puede aumentar hasta el 300% del punto de saturación en plantas de tratamiento de agua comerciales.

En la figura 5.2, se muestra un gráfico de solubilidad del sulfato de calcio. Para usar este gráfico, los ppm de saturación de Ca⁺⁺ se determinan del porcentaje

de epm de Ca^{++} respecto al total de los cationes, y los porcentajes de epm de SO_4^{--} respecto al total de aniones. El porcentaje de saturación del SO_4Ca se define como:

$$\% \text{ saturación } \text{SO}_4\text{Ca} = \frac{\text{ppm } \text{Ca}^{++} \text{ actual}}{\text{ppm } \text{Ca}^{++} \text{ saturado}} \times 100$$

CAPITULO 6 (DISEÑO DE LA PILA DE MEMBRANAS)

Cada sistema de E.D. se diseña para unas necesidades de aplicación particulares. La cantidad necesaria de agua tratada determina el dimensionado de la unidad de E.D., bombas, tuberías y tamaño de la pila. La fracción de sal a extraer determina la disposición de las pilas de membranas.

6.1. ETAPAS

La manera en la que se dispone el conjunto de pilas se denomina etapa. El propósito de las etapas es el de prever suficiente área de membrana y tiempo de retención para eliminar una fracción específica de sal del flujo desmineralizado. Se usan dos tipos de etapas; etapas hidráulicas y etapas eléctricas. La pila de membranas discutida en el capítulo 2 es un ejemplo de una pila de una etapa hidráulica y una etapa eléctrica. Esto es, 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.

6.1.1. ETAPAS HIDRÁULICAS

Típicamente, la máxima extracción de sal de una etapa hidráulica suele ser del 40 – 60 % con valores normales de diseño del 50 %. Para aumentar la cantidad de sal extraída en un sistema de E.D., deben incorporarse etapas hidráulicas adicionales. En sistemas donde son precisas altas capacidades, se incorporan etapas hidráulicas adicionales simplemente añadiendo más pilas en serie para obtener la calidad del agua deseada (figura 6.1.) Note que en esta disposición cada pila solo tiene una etapa eléctrica, es decir, un solo ánodo y un solo cátodo.

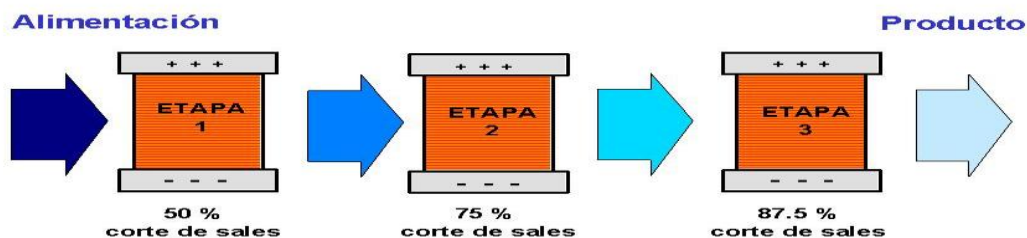


Figura 6.1.

En sistemas donde las etapas hidráulicas adicionales se incorporan en el interior de una única pila, se utiliza una o más membranas inter-etapas. Esta membrana es una membrana catiónica gruesa con todas las propiedades de una membrana catiónica normal. Sin embargo su espesor es el doble (1 mm) que el de una membrana catiónica normal (0,5 mm) para resistir una mayor presión diferencial que la de una membrana normal. La membrana catiónica gruesa tiene solo dos colectores, al contrario de los cuatro colectores que tienen las demás membranas.

La membrana catiónica gruesa se incluye como uno de los componentes que forman el par de células, puesto que su función es la misma que la de una membrana catiónica corriente. Una etapa hidráulica se forma colocando la catiónica gruesa, o membrana inter.-etapa, en el lugar apropiado en la pila de membranas. Las dos aberturas de los colectores se colocan sobre los colectores de salida de la pila para lograr el efecto mostrado en la figura 6.2

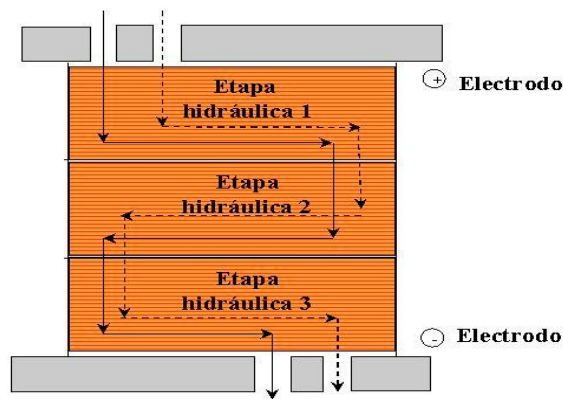


Figura 6.2

Un ejemplo ilustrará el significado de las etapas hidráulicas. Si el agua de entrada tiene 4.000 ppm y la salinidad del agua producto deseada es de 500 ppm, se requerirán tres etapas hidráulicas, suponiendo una extracción de sal por etapa del 50 %. La eliminación de sal por etapa sería como sigue:

- Etapa hidráulica 1: 4.000 ppm entrada – 2.000 ppm salida (50 % extraído)
- Etapa hidráulica 2: 2.000 ppm entrada – 1.000 ppm salida (50 % extraído)
- Etapa hidráulica 3: 1.000 ppm entrada – 500 ppm salida (50 % extraído)

Puede verse en este ejemplo que la cantidad de sal extraída en cada etapa sucesiva disminuye.

- Etapa hidráulica 1: 2.000 ppm
- Etapa hidráulica 2: 1.000 ppm
- Etapa hidráulica 3: 500 ppm

La extracción de sal de un volumen de agua dado es directamente proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la proporción de flujo a través de cada par de células. Corrientes más altas transferirán mayores cantidades de sal. Proporciones de flujo más altas disminuirán las cantidades de sal a ser extraídas de una cantidad de agua dada debido al menor tiempo de retención en la pila.

Si las tres etapas hidráulicas están contenidas en el interior de una única etapa eléctrica, con lo cual la corriente y por tanto la sal extraída por cada par permanece constante, la proporción de flujo por par de células tendrá que ser doblada para cada etapa sucesiva para obtener la disminución de ppm mostrada en el ejemplo. Esto es, el número de pares de células en la etapa 2, tendría que ser la mitad de las de la etapa 1, etc. Esto requiere que la proporción de flujo de la etapa 2, sea dos veces el de la etapa 1, y el flujo de la etapa 3, sea dos veces el de la etapa 2. Puesto que el flujo total en cada etapa es idéntico, el único modo de aumentar la proporción de flujo por par de células en las sucesivas etapas es disminuir el número de pares de células en aquellas etapas.

Sin embargo, esta disposición puede dar lugar a un problema hidráulico. Disminuyendo el número de pares de células en una etapa hidráulica, y aumentando la proporción de flujo por par de células, se aumenta la caída de presión en cada etapa. En algún punto, la caída de presión a través de la pila completa, excederá el límite de presión a la entrada de la pila de 3,4 bar. Si en este ejemplo, la primera etapa hidráulica tiene 200 pares de células y necesita 0,34 bar para forzar un volumen de agua dado a través de esta etapa, las etapas 2 y 3 requerirán lo siguiente.

- Etapa 2: Puesto que solo una mitad de la cantidad de sal es extraída en la segunda etapa respecto a la primera, la proporción de flujo (velocidad) tiene que ser aumentada en un factor de dos, es decir, doblando el flujo de agua por unidad de tiempo y aumentando la presión necesaria a 1,06 bar

Esto se cumple disminuyendo el número de pares de células en el factor 2 a 1, o sea instalando 100 pares de células.

- Etapa 3: En la etapa 3 el número de pares de células debería ser de 50 para que fuera de nuevo la proporción de flujo el doble. Sin embargo, se necesitarían ahora 3,36 bares para forzar el mismo volumen de agua a través de la etapa 3.

La caída de presión total en la pila, por tanto, sería de 4,76 bar. Puesto que el límite de 3,4 bar de presión de entrada ha sido sobrepasado, hay que incorporar un tipo de etapa adicional, conocida como etapa eléctrica.

6.1.2. 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, facilitando la extracción máxima de sales mientras que se evitan polarizaciones y las limitaciones de presiones hidráulicas.

Cada etapa eléctrica permite el uso de una corriente eléctrica controlada (I) a cada par de células en una etapa. En el ejemplo mostrado en la figura 6.3 si se usan dos etapas eléctricas, habría ahora dos corrientes independientes (I_1) y (I_2). Supóngase que la pila está dispuesta como se muestra en la figura 6.3

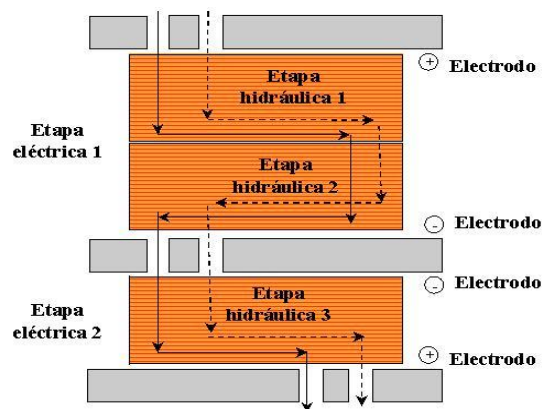


Figura 6.3

Las etapas hidráulicas 1 y 2 son ahora la etapa eléctrica 1, y la etapa hidráulica 3 es la etapa eléctrica 2. Con posibilidad ahora de introducir una corriente eléctrica más baja (I_2) a la etapa hidráulica 3, pueden adicionarse más pares de células para disminuir la caída de presión a un nivel aceptable. Usando 100 pares de células en la etapa 3, la caída de presión sería de 1,06 bar en la etapa 3 y daría una caída total de presión para la pila de 2,46 bar, lo cual está dentro del límite aceptable de 3,4 bar.



FIGURA 6.4

El concepto de etapa conduce a una gran flexibilidad en el diseño del sistema usando componentes estándar. Si se necesita un 75 % de desmineralización, se instalarán 2 etapas hidráulicas y 2 etapas eléctricas, para obtener este porcentaje. Si se necesitaran más etapas, estas se pueden adicionar en cualquier momento, añadiendo simplemente mas pilas en serie. Esto puede ser necesario, por ejemplo, si ocurre que un acuífero salobre se hace más salino con el tiempo, o si se desea obtener un producto con menor salinidad.

6.2. CAÍDA DE PRESIÓN / ESPACIADORES DE FLUJO DE AGUA

La caída de presión a través de una pila de membranas es la suma de caídas de presiones a través de cada etapa hidráulica, la cual depende a su vez del tipo de espaciador, de la producción de flujo por etapa y del número de pares de células de cada etapa. Cada modelo de espaciador tiene un perfil presión-velocidad diferente. Para calcular la velocidad del agua en la pila, se utilizan la siguiente ecuación de conversión:

$$V = K * \text{Lpm/pc}$$

Donde:

V = Velocidad del agua en el espaciador en cm/sg

Lpm/pc = Proporción de caudal de entrada de desmineralizado por par de células en litros por minuto.

Las curvas de presión-velocidad (figura 6.5) predicen las caídas de presión para los diferentes modelos de espaciadores a través de una única etapa una vez que la velocidad en esa etapa haya sido calculada.

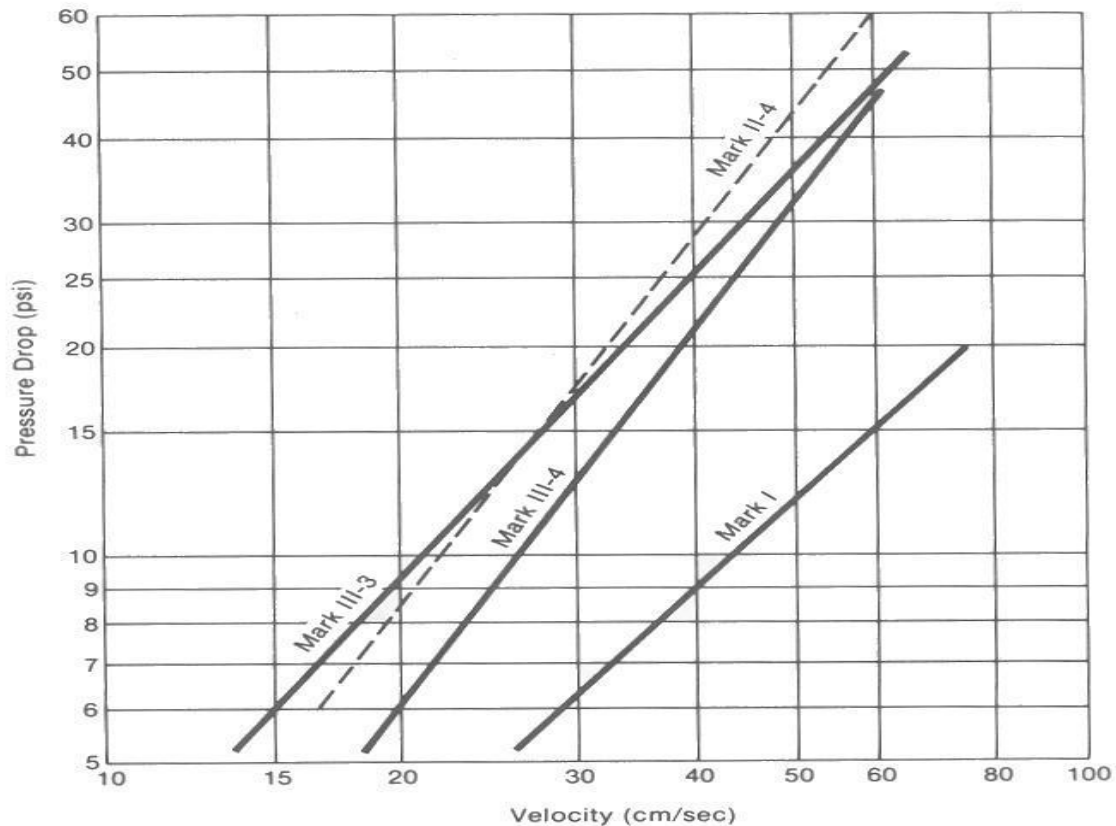


Figura 6.5

6.3. PRESIÓN DIFERENCIAL

La presión diferencial es la diferencia de presión hidráulica entre los flujos desmineralizado y concentrado. Durante la operación normal de la pila de membranas, la presión del flujo desmineralizado se mantiene (de 25 a 75 cm de columna de agua) más alta que la presión del flujo de concentrado. El propósito de mantener esta presión del flujo desmineralizado mayor que el de concentrado es asegurar que si ocurren pérdidas internas en la pila (fugas cruzadas) entre los colectores de desmineralizado y concentrado, sea el flujo desmineralizado el que pase al de concentrado y no al revés, ya que entonces resultaría contaminado el flujo desmineralizado por el concentrado.

6.4. TRANSFERENCIA DE AGUA

Pequeñas cantidades de agua se transfieren eléctricamente (pero no hidráulicamente) a través de las membranas con los iones. La cantidad de agua transferida varía con el tipo de membrana y la concentración de la solución. Normalmente se transfiere el 0,5 % del flujo desmineralizado por 1.000 ppm de sal extraída.

6.5. LIMITE DE TEMPERATURA

Las pilas tienen un límite superior de temperatura de 50 - 60 °C. Este límite está determinado por el material de los espaciadores, que tiende a perder su rigidez a elevadas temperaturas. Las membranas de transferencia aniónica y catiónica, pueden resistir mayores temperaturas, generalmente en la escala de 60 a 70 °C.

CAPITULO 7 (SISTEMAS DE ELECTRODIALISIS- E.D.)

En esta sección se explicarán varios sistemas de E.D. así como su evolución histórica.

7.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

El primer sistema de E.D. desarrollado comercialmente era el sistema de lotes. La figura 7.1, muestra el diagrama de flujo de este sistema.

En un sistema de lotes, el agua de alimentación se recircula desde un tanque de apoyo a través de una única pila hasta que se alcanza la pureza final deseada. El nivel de producción es, por tanto, dependiente de la concentración de minerales disueltos en el agua de alimentación y del grado de desmineralización deseado.

El diagrama de flujo muestra dos corrientes principales que fluyen en paralelo a través de la pila de membranas. Uno de estos flujos es desmineralizado progresivamente cuando es recirculado por el sistema. Este flujo se llama flujo desmineralizado o flujo producto.

El otro flujo principal recirculado por el sistema es el flujo de concentrado. Su misión es recoger la sal que se transfiere desde el flujo desmineralizado. El flujo de concentrado se recircula para disminuir la cantidad de agua de deshecho (rechazo). La recirculación, sin embargo, aumenta la concentración del flujo a un nivel mucho más alto que el de agua de alimentación. Para controlar la concentración de minerales y prevenir las incrustaciones de la pila de membranas, se envía una fracción del flujo de concentrado al deshecho y se necesita una continua adición de agua de alimentación, (aportación).

También se muestra en la figura 7.1, los dos flujos de electrodos. Se le

adiciona continuamente ácido al flujo del cátodo para evitar la formación de incrustaciones en el compartimiento del electrodo.

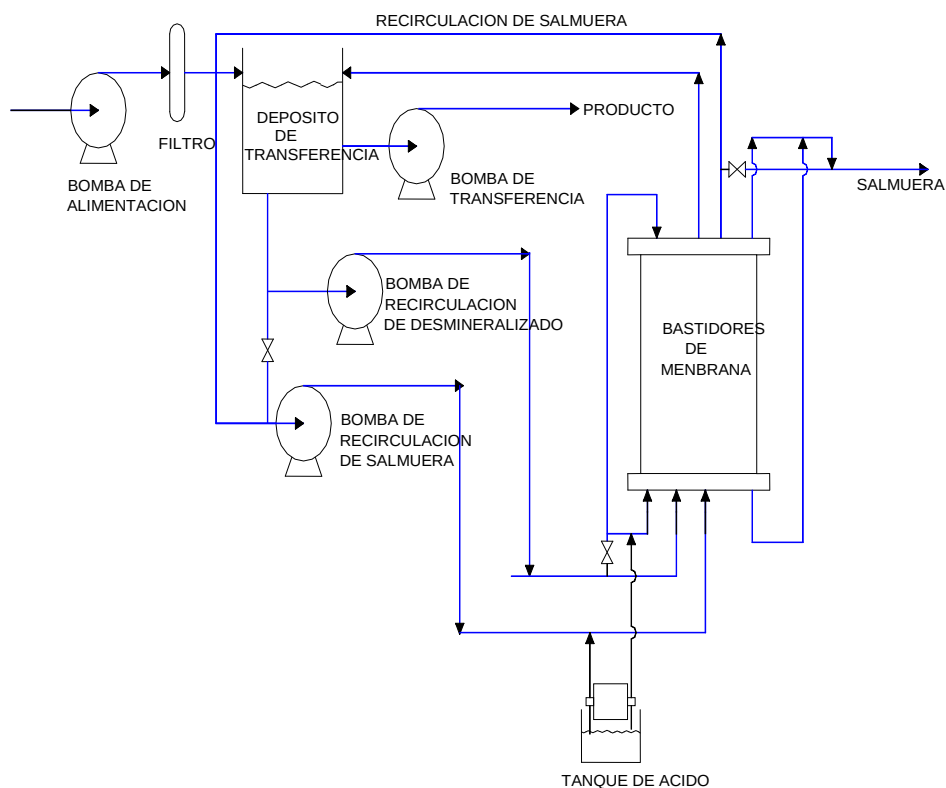


Figura 7.1

7.2. E.D. CONTINUA (UNIDIRECCIONAL)

El segundo sistema comercial fue el de tipo unidireccional continuo. La figura 7.2, muestra el diagrama de flujo.

En este sistema, la pila de membranas contiene dos etapas en serie conectadas internamente de modo que los dos flujos pasan primero a través de la mitad inferior o primera etapa y luego por la mitad superior o segunda etapa. Se

puede disponer de más de dos etapas en una única pila y/o dos o más pilas pueden ser dispuestas en serie.

El flujo de desmineralizado hace un único recorrido por las pilas y sale como agua producto. El flujo de concentrado es parcialmente reciclado para reducir el deshecho y se inyecta ácido y otros agentes químicos para evitar las incrustaciones en la pila.

Hay un electrodo metálico en la parte alta y baja de cada dos etapas. Los dos cátodos ocupan la parte alta y baja de la pila, mientras que los dos ánodos ocupan la parte central de la misma en lados opuestos de un bloque central de plástico.

Los dos cátodos están hechos de acero inoxidable (o similar metal inerte) y son alimentados en serie, siendo el cátodo de la parte baja alimentado exteriormente por una línea que viene del flujo de entrada de concentrado.

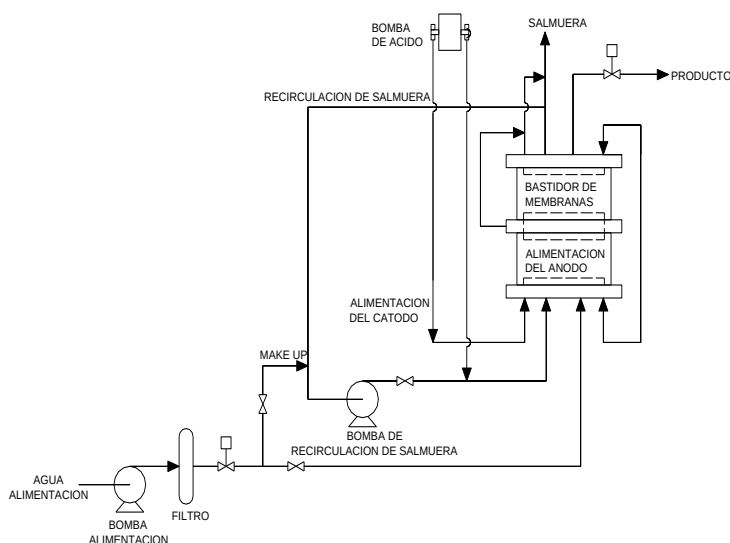


Figura 7.2

Los ánodos en el centro de la pila están hechos de titanio recubierto de platino o niobio y también son alimentados en serie. El inferior o ánodo de la primera etapa, se alimenta del flujo de concentrado en el interior de la pila y está conectado hidráulicamente al alto, o ánodo de la segunda etapa, a través del bloque de plástico central.

7.2.1. LIMITACIONES DEL SISTEMA E.D. UNIDIRECCIONAL

Los tipos de sistemas de E.D. discutidos anteriormente son unidireccionales. Esto es, el movimiento iónico es solo en una dirección (los cationes se moverán hacia el cátodo fijo y los aniones se moverán hacia el ánodo fijo). En tal sistema, se necesita, normalmente, la adición de productos químicos para evitar la incrustación producida por la precipitación del carbonato cálcico y el sulfato de calcio sobre las superficies de las membranas. La incrustación de carbonato cálcico se controla inyectando ácido a la recirculación de concentrado, y la incrustación de sulfato de calcio se controla inyectando un agente inhibidor tal como el hexametáfosfato de sodio al flujo de concentrado. Además de la formación de incrustaciones, partículas coloidales o barros, al ser ligeramente electronegativas, pueden acumularse sobre la superficie de las membranas de transferencia aniónicas y causar obstrucciones.

El control de las incrustaciones y de los materiales extraños es crítico en la operación de sistemas desaladores unidireccionales de cualquier tipo. El costo de instalar, operar y mantener los sistemas de alimentación química para operar con ácidos fuertes y la viabilidad de conseguir estos ácidos y otros productos químicos, particularmente en áreas remotas, presentan muchos problemas prácticos operacionales. Estos problemas, generalmente, se traducen en altos costes de operación y mantenimiento.

7.3. ELECTRODIÁLISIS REVERSIBLE (E.D.R)

Los sistemas de electrodiálisis reversible (E.D.R) están diseñados para producir agua desmineralizada sin adición constante de productos químicos durante la operación normal, eliminando por tanto, el mayor problema encontrado en los sistemas unidireccionales. El sistema E.D.R utiliza la inversión de polaridad eléctrica para controlar continuamente las incrustaciones y la suciedad de las membranas.

En este sistema la polaridad de los electrodos se invierte 3 ó 4 veces cada hora.

Esto 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. Esto se muestra en la figura 9.3, en la cual la polaridad de los electrodos del “A” es opuesta a la del “B”.

En un sistema corriente, la inversión tiene lugar aproximadamente cada 15 minutos y se lleva a cabo automáticamente.

Se puede ver en la figura 9.3, que después de que se ha producido la inversión, los flujos que anteriormente ocupaban los compartimentos desmineralizados, se convierten en flujos concentrados y los flujos que anteriormente ocupaban los compartimentos de concentrado, ahora llegan a ser desmineralizados. Por tanto, en la inversión, válvulas operadas automáticamente, cambian los dos flujos de entrada y salida, de modo que el agua de alimentación entrante fluye en los nuevos compartimentos desmineralizadores y el flujo de concentrado fluye en los nuevos compartimentos de concentrado. Esto 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 se llama producto fuera de normas o fuera de especificaciones.

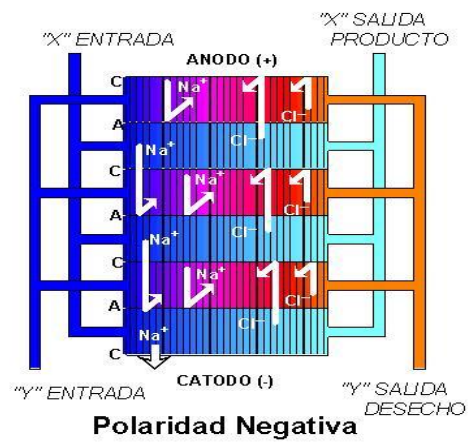
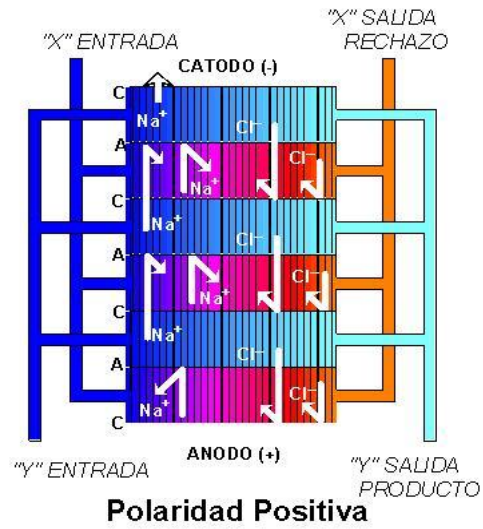


Figura 7.3.

A causa de la inversión, ningún compartimento de flujo de la pila es expuesto a altas

concentraciones por un periodo de más de 15 ó 20 minutos seguidos. Cualquier inicio de formación de sales se disuelve rápidamente y se saca al exterior cuando se invierte el ciclo. La figura 7.4, es un diagrama de flujo E.D.R. típico.

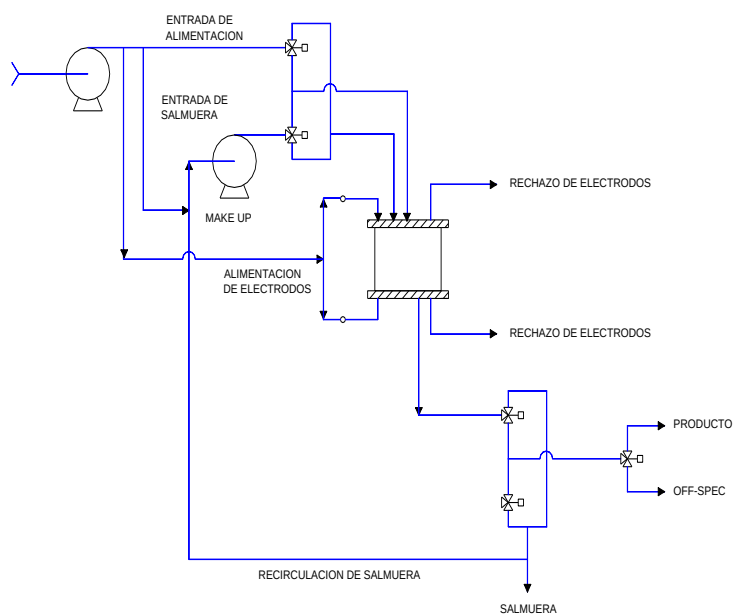


Figura 7.4.

7.3.1. COMPARTIMENTOS DE ELECTRODOS

Cuando la inversión tiene lugar, las reacciones químicas en el interior del compartimiento del electrodo, también se invertirán, puesto que los electrodos cambian su polaridad. La reacción alcalina en el nuevo cátodo ocurrirá ahora en el antiguo ánodo. De forma similar, la atmósfera ácida generada en el nuevo ánodo ocurrirá ahora en el antiguo cátodo. La atmósfera ácida que envuelve al ánodo y que ayuda a prevenir la formación de incrustaciones tendrá lugar en ambos electrodos con la consiguiente ventaja, puesto que ahora ambos electrodos son alternativamente ánodos. Para obtener el máximo beneficio de la generación de ácido anódica, el flujo del ánodo puede ser operado en la condición de no-flujo, lo

que permite a la concentración de iones H^+ aumentar y bajar el pH alrededor de 2 a 3. Sin embargo, gases de cloro y oxígeno también están siendo generados en el ánodo. Estos gases tienden a acumularse sobre el electrodo formando una capa de gas que aumenta enormemente la resistencia del electrodo. Esto se conoce como cubierta de gas.

Para reducir este problema, se le permite al flujo del ánodo fluir, durante un breve periodo de tiempo, para desalojar estos gases. Esta acción se conoce como un “barrido”. Mientras que el ánodo está en modo barrido, el cátodo fluye continuamente para minimizar la concentración de OH^- , puesto que una atmósfera alcalina aumentará la formación de incrustaciones. Válvulas solenoides en los flujos de los electrodos controlan automáticamente los flujos del compartimiento del ánodo y del cátodo. Puesto que ambos electrodos están el 50 % del tiempo en modo de ánodo, tienen que ser contruidos de titanio recubierto con platino.

Para resumir, el proceso de E.D.R. tiene cinco efectos positivos en un sistema de membranas:

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

• CAPITULO 8 (SISTEMAS DE ALTA RECUPERACIÓN)

En muchos lugares del mundo, obtener un suministro de agua de calidad, se está convirtiendo en un problema de creciente dificultad. Se debe tener mucho cuidado en la utilización de los recursos disponibles.

Contribuyen a esta situación factores tales como reservas limitadas de agua, altos costes de distribución y altos costes de bombeo en pozos y sistemas de tratamiento de las aguas naturales.

Para aliviar esta situación, la recuperación de agua se ha convertido en una consideración importante cuando se diseña y especifica un sistema desalinizador. La recuperación de agua se define como la cantidad de agua producto producida respecto a la cantidad de agua total usada.

$$\% \text{ recuperación} = \frac{\text{Producto total}}{\text{Alimentación total}} \times 100$$

En este capítulo se expondrán sistemas para mejorar la recuperación del agua.

Los sistemas de E.D.R. tienen una flexibilidad única en elecciones de diseños que pueden maximizar la recuperación del agua donde quiera que este factor sea importante.

8.1. RECICLADO DEL CONCENTRADO

La recirculación del flujo del concentrado, se llama reciclado del concentrado. Las proporciones de flujo de agua concentrada y desmineralizada a través de las pilas son iguales esencialmente, puesto que la diferencia de presión entre los dos

flujos tiene que ser muy pequeña (presión diferencial de 0,03 a 0,07 Kg/cm²). En el caso más simple, esta igualdad de flujo podría conducir a una recuperación del agua desmineralizada de solo la mitad del agua salina tratada. Sin embargo en casi todas las plantas de E.D. y E.D.R. una gran parte del concentrado (con algo de agua de alimentación) se recicla ahorrando, por tanto, agua. La fracción de concentrado que puede ser reciclado está limitada por la solubilidad de la sal menos soluble. Esto es, la fracción de flujo del concentrado reciclado, puede aumentarse hasta que el menos soluble de las sales, precipite. Este nivel de concentración es controlado enviando una fracción del flujo de concentrado al deshecho y adicionando un volumen igual de nueva agua de alimentación a este flujo de reciclado.

8.2. RECICLADO DEL PRODUCTO FUERA DE NORMAS

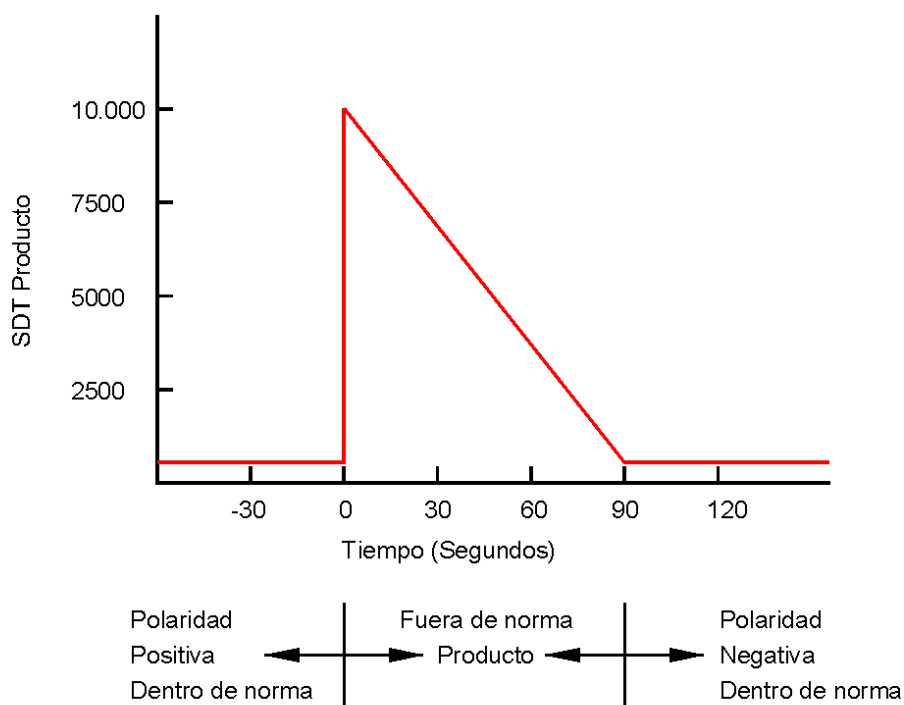


Figura 8.1.

Durante la inversión de una unidad de E.D.R., los flujos de desmineralizado y concentrado se intercambian en la pila de membranas. La salinidad del compartimiento originalmente concentrado cambia su valor de, digamos, 10.000 ppm, al valor del producto de 250 ppm. La duración del período fuera de normas (alta salinidad) es el tiempo requerido para que el agua de alimentación entrante en la entrada del originalmente concentrado en el momento de la inversión de polaridad, pase completamente por el sistema de membranas. Por tanto, cuanto mayor sea el número de etapas, mayor será el tiempo de fuera de normas.

En los sistemas de E.D.R. estándar, tanto los flujos de agua como la polaridad de las pilas se invierten simultáneamente. De este modo el perfil de salinidad del agua producto durante este periodo es el que se muestra en la figura 10.1, para un sistema típico de 3 etapas, con un tiempo de 30sg de contacto por etapa hidráulica.

El agua producto existente en el sistema entre los tiempos 0 y 30sg, se tira, puesto que su salinidad es mayor que la requerida por las especificaciones.

Sin embargo, retrasando la inversión de las válvulas de salida durante un periodo de tiempo controlado, el perfil del producto será el mostrado en la figura 10.2. Esto disminuye el promedio de salinidad del agua fuera de normas a un punto donde, en la mayoría de los casos, es más baja que la salinidad del agua de alimentación.

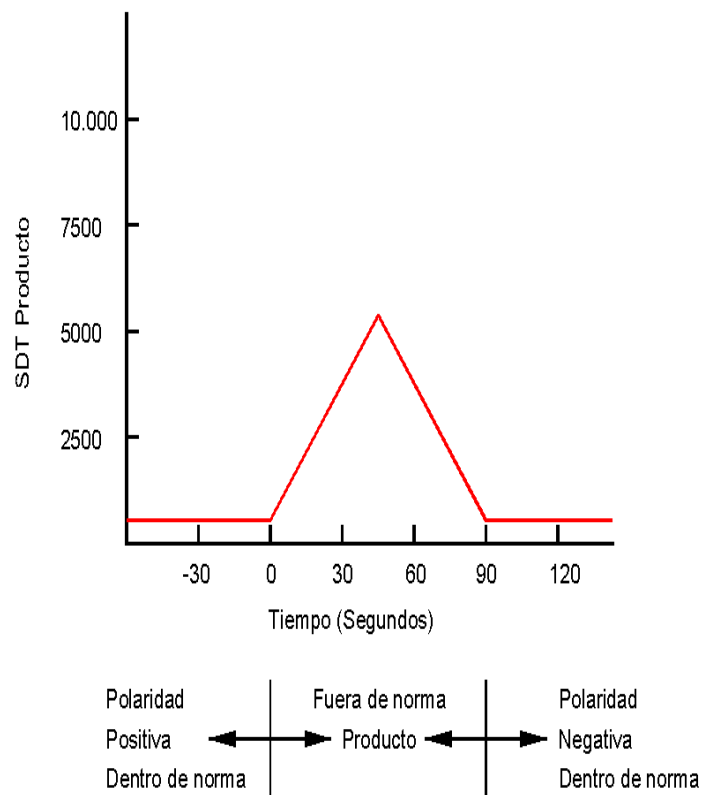


Figura 8.2

El agua fuera de normas puede ser, entonces, enviada nuevamente al sistema de alimentación, no siendo, ahora, una fuente de deshecho. La tabla 1 compara la recuperación de dos sistemas de 3 etapas hidráulicas operando bajo idénticas condiciones, excepto que uno tiene un reciclado del agua fuera de normas y el otro no.

	CASO BASE	RECICLADO
Producto bruto	1.262,625	1.262,625
Producto fuera de norma	126,261	126,261
PRODUCTO NETO	1.136,364	1.136,364
Deshecho de electrodos	11,363	11,363
Deshecho de concentrado	272,720	272,720
Deshecho de producto fuera de norma	126,261	
DESHECHO TOTAL	410,344	284,083
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN TOTAL	1.456,715	1.420,447
PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN	73,5	80,0

Tabla 1

La producción bruta se mantiene constante a 1.262 m³/día. Suponiendo que tarde 30sg en pasar por cada etapa hidráulica y que la inversión de polaridad ocurra cada 15 min. el sistema estaría produciendo agua dentro de especificaciones el 90 % del tiempo total de operación (13,5 de cada 15 min.) La producción neta del sistema es, por tanto, 1.136 m³/día. En el primer caso, el agua fuera de normas (126 m³/día) se convierte en parte del deshecho total y la recuperación del sistema es del 73,5 %. En el segundo caso, se envía de vuelta al tanque de alimentación. Esto reduce el porcentaje de alimentación en 126 m³/día y aumenta la recuperación del sistema al 80 %.

8.3. INVERSIÓN SECUENCIAL

El sistema de inversión secuencial de E.D.R. está basado en controlar independientemente la inversión de las válvulas de entrada, la polaridad eléctrica de

cada etapa y las válvulas de salida. La secuencia se inicia con la inversión de las válvulas de entrada. Esto crea un volumen de agua de inversión (una mezcla de flujos desmineralizados y concentrados) el cual fluye entonces a través del sistema. Cuando este volumen de agua pasa por cada etapa consecutiva en el sistema, la etapa correspondiente cambia su polaridad. Finalmente se invierten las válvulas de salida. Por tanto, el agua total de inversión es solo la que contiene una única etapa en vez de la que contiene el sistema completo. El tiempo de fuera de normas se reduce a lo que se requiere para que el agua pase por una sola etapa sin tener en cuenta el número de etapas de la línea en operación en vez del tiempo necesario para recorrer la línea de etapas completa. En la tabla 2 se compara la actuación de un sistema de E.D.R. de 3 etapas operando con y sin inversión secuencial. La tabla también muestra la combinación de inversión secuencial y reciclado del agua fuera de normas.

	CASO BASE	INVERSION DE FASE	INVERSION DE FASE Y RECICLADO
Producto bruto	1.262,625	1.262,625	1.262,625
Producto fuera de norma	126,261	42,087	42,087
PRODUCTO NETO	1.136,364	1.220,538	1.220,538
Deshecho de electrodos	11,363	11,363	11,363
Deshecho de concentrado	272,720	272,720	272,720
Deshecho de producto fuera de normas	126,261	42,087	
DESHECHO TOTAL	410,344	326,170	284,083
ALIMENTACION TOTAL	1.546,708	1.546,708	1.504,621
PORCENTAJE DE RECUPERACION	73,5	78,9	81,1
Energía eléctrica kWh/m ³	1,82	1,70	1,70

Tabla 2

La inversión secuencial aumenta la recuperación aumentando la cantidad de agua producto producida, mientras mantiene constante la cantidad total de agua consumida. En nuestro ejemplo, la producción bruta se mantiene constante en

1.262 m³/día. Usando una inversión de fase secuencial, el tiempo de fuera de normas se reduce de 90 a 30sg, aumentando el tiempo útil del 90 al 96,7 %. Por tanto, la producción neta aumenta a 1.220 m³/día. Puesto que la alimentación del sistema se mantiene constante, esto aumenta la recuperación del sistema que pasa del 73,5 al 78,9 %. En suma, el consumo eléctrico global se mantiene constante. De este modo el aumento de la producción reduce el consumo de energía neto de 1,82 a 1,70 kW/m³.

8.4. FRECUENCIA DE INVERSIÓN

Pruebas recientes han demostrado que, en la mayoría de los casos, las incrustaciones de las membranas pueden ser controladas eficientemente con una frecuencia de inversión de polaridad reducida. Donde quiera que los sistemas estándar utilicen un ciclo de polaridad de 15 min (tiempo entre cada inversión de polaridad), la mayoría de las unidades pueden operar eficientemente con un ciclo de polaridad de 30 min.

Cortando la frecuencia de polaridad a la mitad, la parte de producto global que es fuera de normas se reduce al 50 %. Como se muestra en la tabla 3, en el caso de la unidad base, el tiempo es del 10 % (1,5 de cada 15 min.) Doblando el ciclo de polaridad a 30 min, el porcentaje se reduce a un 5 % (1,5 de cada 30 min.) Esto aumenta la producción neta de 1.136 m³/día a 1.199 m³/día. Como con la inversión secuencial, esto aumenta la producción neta, aumentando la recuperación y disminuyendo el consumo de energía.

	CICLO 15 MIN	CICLO 30 MIN	CICLO 30 MIN INVERSIÓN DE FASE Y RECICLADO
Producto bruto	1.262,625	1.262,625	1.262,625
Producto fuera de norma	126,261	63,132	21,046
PRODUCTO NETO	1.136,364	1.199,493	1.241,580
Deshecho de electrodos	11,363	11,363	11,363
Deshecho de concentrado	272,720	272,720	272,720
Deshecho de producto fuera de normas	126,261	63,132	
DESHECHO TOTAL	410,344	347,215	284,083
ALIMENTACIÓN TOTAL	1.546,708	1.546,708	1.525,663
PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN	73,5	77,6	81,4
Energía eléctrica kWh/m ³	1,82	1,73	1,67

TABLA 3

8.5. RECICLADO DEL FLUJO DE ELECTRODOS

Cuando se combinan los flujos del ánodo y cátodo, se neutralizan químicamente el uno al otro con un pH y salinidad resultante aproximadamente igual que la del agua de alimentación. Los gases que portan estos flujos combinados son sacados al exterior, después de lo cual el líquido es enviado normalmente al deshecho. Sin embargo, puesto que este líquido es esencialmente es mismo que el de alimentación, puede retornar al tanque de alimentación, junto al agua fuera de normas y así incrementar la recuperación del sistema, mientras que se reduce la cantidad total de agua de deshecho. En grandes sistemas, el flujo de electrodos representa una cantidad relativamente pequeña de la cantidad total de agua que está siendo tratada. Sin embargo, en sistemas más pequeños, el flujo de electrodos puede representar una parte significativa del agua tratada. En ambos casos, el reciclado del flujo puede ser un hecho atractivo, basado en el ahorro de agua y el coste de distribución del agua de deshecho.

8.6. RESUMEN

En conjunto, el reciclado del agua fuera de normas aumenta la recuperación reduciendo la proporción de alimentación del sistema. La inversión secuencial y reducción de la frecuencia de inversión, aumenta la recuperación por aumento de la producción neta. Los tres sistemas están basados en aumentar la recuperación del sistema sin incrementar la salinidad del flujo de concentrado. Nótese que en las tablas anteriores tanto la producción bruta (proporción de flujo desmineralizado) y la extracción del concentrado, se mantienen constantes. En otras palabras, el número de ciclos de concentración del concentrado se mantiene constante.

8.7. ADICIÓN QUÍMICA

En el caso de sistemas de E.D.R. que no usan productos químicos para evitar precipitaciones, la salinidad máxima permisible del concentrado, está determinada principalmente por los valores límites de saturación del SO_4Ca y CO_3Ca . Esto determina el máximo número de ciclos de concentración del flujo concentrado, lo cual, en combinación con el agua fuera de normas, aumento del tiempo de ciclo de polaridad e inversión secuencial, resultará en una recuperación máxima de un sistema basado en alimentación química cero.

Si aún se desea una recuperación más alta del agua de alimentación, esto puede obtenerse por posteriores aumentos en los ciclos de concentración del flujo de concentrado pero los niveles de SO_4Ca y CO_3Ca serán más altos que los límites establecidos, para compensar esto se puede emplear la inyección de hexametáfosfato sódico y/o ácido en el flujo de concentrado. De hecho, la combinación de inyección química con la inversión de polaridad es tan efectiva en el control de la precipitación, que el límite para la saturación del SO_4Ca en el flujo de concentrado, se incrementa desde el 150 – 170 % para unidades sin adición química hasta el 300 – 400 % para unidades con adición de hexametáfosfato. Si es

necesario, las incrustaciones de CO_3Ca se pueden controlar usando inyección de ácido para rebajar el pH del concentrado del sistema, de modo que el índice de Langelier (I.L.) sea menor que +2,1.

En suma, para ser capaces de obtener recuperaciones muy altas (más del 90 %) en la mayoría de las fuentes de alimentación, la combinación de inyección química y E.D.R. tienen dos ventajas particulares. Primero, es suficiente mantener 10 – 15 mg/l de hexametáfosfato de sodio solo en el flujo de concentrado, puesto que el hexametáfosfato se conserva en el concentrado cuando se recicla éste. Esto se traduce en un consumo muy bajo de hexametáfosfato por unidad de producto. Segundo, al contrario que otros muchos procesos que requieren un I.L. negativo en el flujo de concentrado, los sistemas de E.D.R. solo requieren suficiente ácido como para reducir el índice de Langelier a +2,1. Comparativamente, el consumo de ácido por unidad de agua producto será solo una fracción de la que podría necesitarse de otro modo.

8.8. CONCLUSION

Los sistemas de fuera de normas, inversión secuencial y/o aumento de los tiempos de inversión, pueden incorporarse en las unidades de E.D.R para obtener ventaja del sustancial aumento en la recuperación y producción con un mínimo incremento del coste del sistema. Las unidades estándar de E.D.R. todavía utilizan alimentación química cero. Para aquellas aplicaciones donde sean necesarios muy altos porcentajes de recuperación, o aquellas otras donde el coste de distribución del deshecho sea superior al coste químico, se pueden adicionar productos químicos.

La mayoría de los sistemas de E.D.R. ya instalados, pueden realizar un aumento en la recuperación del 5 al 10 % con modificaciones relativamente menores y con un coste muy bajo.

Estas unidades, también pueden ser dotadas con equipos de inyección química para obtener posteriores aumentos en la recuperación. La flexibilidad del sistema de E.D.R. que permite, con modificaciones relativamente simples aumentar la recuperación cuando aumentan los costes de extracción del agua, puede ser una ventaja decisiva para la mayoría los usuarios de sistemas de agua.

ENLACES

www.mega.cz/electrodialysis.html

www.gewater.com/products/equipment/ed_edr_edi/edr.jsp