

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ELECTRODEIONIZACIÓN, TECNOLOGÍA DE AGUA
ULTRAPURA.”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

POR LA MODALIDAD DE ACTUALIZACIÓN DE CONOCIMIENTOS

PRESENTADO POR:

CARRIÓN ABANTO , ERNESTO ROLANDS

LIMA - PERÚ

2006

RESUMEN

El Sistema de Electrodeionización EDI , remueve los elementos ionizados o ionizables del agua mediante el uso de potencial eléctrico para inducir el transporte de iones.

Esta nueva tecnología es una combinación de electrodiálisis e intercambio iónico, resultando en un proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica. Esta regeneración electroquímica se sirve de un medio eléctricamente activo y de un potencial eléctrico para influenciar el transporte iónico y sustituye a la regeneración química de los sistemas convencionales de intercambio iónico.

El EDI produce agua de proceso industrial de la más alta calidad, usando 95% menos de productos químicos que la tecnología convencional de intercambio iónico. Con el sistema de EDI, membranas y electricidad reemplazan a los millones de galones de productos químicos ácidos y cáusticos que los antiguos procesos requerían diariamente.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
I. INTRODUCCIÓN.....	5
II. CONCEPTOS GENERALES.....	7
2.1 Tipos de Agua fuente.....	7
2.2 Principales causas de contaminación.....	9
2.3 Técnicas de purificación de agua	11
2.4 Dispositivos y técnicas de tratamiento.....	14
III. FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE ELECTRODEIONIZACIÓN.....	19
3.1 Que es el sistema de Electrodionización EDI.....	19
3.2 Funcionamiento del equipo.....	20
3.3 Partes de equipo.....	21
3.4 Requerimiento de alimentación al sistema.....	43
3.5 Sílice y Boro.....	50
3.6 Consideraciones de proceso – Agua de ingreso al sistema.....	51
3.7 Consideraciones de proceso – Mecánica y Control.....	54
3.8 Factores que afectan al rendimiento del EDI.....	57
3.9 Limpieza y Sanitización del módulo EDI	69
IV. SISTEMA DE TRATAMIENTO POR ELECTRODEIONIZACIÓN	70
4.1 Caso central termoeléctrica - calidad de agua para lavado de compresores en línea.....	70
4.2 Análisis del Agua fuente.....	70

4.3 Selección de equipos de tratamiento de agua.....	71
4.4 Selección del equipo de Electrodeionización.....	72
4.5 Diagrama del sistema de tratamiento de agua seleccionado.....	74
V. RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE LA PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	75
5.1 Datos operacionales del sistema de tratamiento de agua propuesto.....	75
5.2 Resultados obtenidos de calidad de agua.....	77
VI. CONCLUSIONES.....	78
VII. BIBLIOGRAFÍA	82
VIII APÉNDICE.....	84

I. INTRODUCCIÓN

Hasta hace pocos años, el sistema para la obtención de agua desmineralizada de alta calidad estaba totalmente basado en la tecnología del intercambio iónico, en la cual se utilizan reactivos químicos para la regeneración de las resinas, provocando gran cantidad de aguas residuales contaminantes.

Debido a la cada vez más exigente reglamentación sobre la calidad de las aguas residuales antes de vertido, es necesario proceder al tratamiento de los efluentes generados en la regeneración con el consiguiente gasto que ello conlleva.

Las investigaciones se han centrado en el desarrollo de tecnologías de tratamiento que no usen prácticamente productos químicos. Actualmente se están utilizando dos sistemas que se complementan como son la ósmosis inversa (RO) y la electrodeionización continua (EDI), en la obtención de agua de alta calidad y que eliminan el 97 por ciento de los reactivos químicos empleados en los procesos de intercambio iónico.

El presente informe trata de explicar el funcionamiento, operación, aplicación y resultados obtenidos de un sistema de tratamiento de agua por electrodeionización, combina dos probadas técnicas de purificación del agua como son la electrodiálisis y el intercambio iónico. Mediante esta técnica revolucionaria, las sales disueltas pueden ser eliminadas con un bajo consumo energético y sin la necesidad de emplear reactivos regenerantes; el resultado es un agua de elevada calidad que puede ser producida en continuo y con elevados caudales.

La electrodeionización EDI, emplea una combinación de membranas selectivas de iones y resinas de intercambio, montadas a modo de sándwich entre dos electrodos [ánodo (+) y cátodo (-)] sometidos a una diferencia de potencial eléctrico de DC, la cual fuerza la migración en continuo de los iones desde la cámara de alimentación hasta las cámaras adyacentes de concentrado. Este

potencial también rompe las moléculas de agua produciendo iones hidrógeno e hidróxidos que continuamente producen la regeneración de la resina (no se emplean reactivos). El proceso de EDI reemplaza a los convencionales lechos mixtos (MB) de resinas produciendo agua de calidad ajustable, no necesitando paradas para la regeneración ni sustitución de resinas.

II. CONCEPTOS GENERALES

2.1 TIPOS DE AGUA FUENTE

El agua es esencial para la vida debido a su influencia en las diversas funciones de nuestro organismo, constituyendo el medio indispensable para que pueda producirse la normal absorción, transporte y utilización del resto de los nutrientes de los alimentos, además de participar en la regulación de la temperatura corporal. El agua es ubicuota y abundante en los seres vivos. Una célula es agua en un 80% de su peso, y en un adulto el contenido de agua corporal es de un 65 %.

Este agua se reparte en diferentes compartimentos de nuestro organismo. Tanto la ingesta como la eliminación del agua debe estar perfectamente regulada para que esas cantidades se mantengan dentro de los niveles correctos. Se calcula que precisamos diariamente dos litros de agua, que pueden aportarse mediante bebidas (agua, leche, infusiones, refrescos), con el que se encuentra en todos los alimentos (una lechuga es en un 95 % agua, una chuleta de ternera un 65 %; y el azúcar tan sólo tiene un 0,5 % de agua) y por el agua que se libera en respuesta al metabolismo del resto de macro-nutrientes de esos alimentos y de nuestros propios tejidos. La más fácilmente regulable por nosotros es la que constituye el aporte exógeno, ya que es la sed la que nos hace buscar el agua, y la sed está controlada, entre otras cosas, por la eliminación de agua por orina, heces, transpiración, respiración, y otras pequeñas pérdidas diarias que resultan más difícilmente cuantificables.

El agua mineral, estudiada en este comparativo, se obtiene de manantiales que llegan a la superficie mediante perforaciones de distinta profundidad. Lo que diferencia a esta de otras aguas de bebida es su naturaleza mineral y su pureza original, ya que su origen subterráneo protege el acuífero de contaminaciones químicas o bacterianas. El agua mineral natural se define como "aguas

bacteriológicamente sanas extraídas de yacimientos subterráneos y que brotan de un manantial en uno o varios puntos de alumbramiento naturales o perforados".

Otro tipo son las aguas de manantial: aguas potables de origen subterráneo que emergen espontáneamente a la superficie o se extraen mediante labores practicadas a tal efecto pero que previamente a su consumo precisan la aplicación de unos mínimos tratamientos físicos para la separación de materiales no deseables.

Sobre el agua mineral natural se permiten sólo dos operaciones, que mejoran su calidad sin variar sensiblemente la composición inicial: eliminar compuestos naturales inestables como hierro y azufre, y modificar su contenido en gas carbónico. La reducción o eliminación del hierro y del azufre se realiza para evitar que el agua presente un color, olor o sabor no deseables. El tipo y cantidad de sustancias disueltas en el agua dependen de la tipología geológica de la zona donde fluye la fuente.

Así, de las capas profundas sale un agua muy rica en minerales y carbonato. Si en su camino se filtra por piedra calcárea, se originan aguas duras (con elevado contenido en sales de calcio y magnesio); si es por arena compacta, tendremos agua semi-dura, y si discurre por granito y basalto, serán aguas blandas. Estas sustancias solubles también determinan su sabor: las aguas ricas en sodio y cloruros saben ligeramente saladas; las sales de calcio y magnesio proporcionan un sabor duro y terroso, y los sulfatos proporcionan un sabor un poco amargo.

Según el contenido global en minerales, o de algunos de ellos, se distinguen varios tipos de agua mineral natural:

- ✧ Aguas de mineralización muy débil: Residuo seco de hasta 50 mg/l
- ✧ Agua de mineralización débil: Residuo seco de hasta 500 mg/l
- ✧ Agua de mineralización fuerte: Residuo seco superior a 1500 mg/l
- ✧ Agua bicarbonatadas: más de 600 mg/l de bicarbonato

- ✧ Agua sulfatadas: más de 200 mg/l de sulfatos
- ✧ Agua cloruradas: más de 200 mg/l de cloruro
- ✧ Agua cálcicas: más de 150 mg/l de calcio
- ✧ Agua magnésicas: más de 50 mg/l de magnesio
- ✧ Agua fluoradas, o que contienen fluoruros: más de 1 mg/l de fluoruros
- ✧ Agua ferruginosas, o que contienen hierro: más de 1 mg/l de hierro
- ✧ Agua bivalente aciduladas: más de 250 mg/l de CO₂ libre
- ✧ Agua sódicas: más de 200 mg/l de sodio, indicadas para dietas pobres en sodio: no más de 20 mg/l de sodio.

2.2 Principales causas de contaminación del agua

Las fuertes concentraciones de población contribuyen a la rápida contaminación del agua y otros tipos de contaminación. Agua contaminada es el agua a la que se le incorporaron materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales o de otros tipos, o aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos.

Los principales contaminantes del agua son:

2.2.1 Substancias estéticas - Contaminantes por lo general inofensivos tales como cloro, azufre, hierro y manganeso que causan problemas de sabor, color, manchas y de olor.

2.2.2 Sedimento - Partículas sólidas que se asientan durante un período de tiempo.

2.2.3 Dureza - Un problema común de la calidad del agua, causado por calcio disuelto, y magnesio (caliza) en el agua. Dureza en el agua causa escamas en la tubería y calentadores de agua caliente y plomería, etc. Hace la limpieza y el lavado más difícil.

2.2.4 Color - Colores amarillo o marrón por el leaching de material vegetal en estado de descomposición que se encuentra en la tierra.

2.2.5 Sabor y olores - Olores y sabores a mojo (grasa), a tierra o madera que se encuentran en el agua de la tierra.

2.2.6 Azufre - Una sustancia desagradabilísima que contribuye a olor de “huevo podrido” en el agua de tomar también es conocida por ser muy corrosiva a los productos y materiales de plomería.

2.2.7 Acidez y alcalinidad - La acidez y alcalinidad se miden comúnmente como pH. PH Neutral es 7.0, mientras que un pH bajo 7.0 es ácido y un pH alcalino es sobre 7.0. Cambios en extremos de pH pueden causar que el agua sea corrosiva, de sabor desagradable, y de olor desagradabilísimo.

2.2.8 Turbidez - La turbidez es materia suspendida (partículas) que se encuentran en el agua y le dan la apariencia nublada u opaca. Arena, cieno (masa que resulta de la mezcla de tierra y agua), material relacionado y coloidal contribuyen a la turbidez. Niveles altos de turbidez también son indicativos de un posible problema de alcantarillado.

2.2.9 Trihalometanos (THMs) - THMs son las primeras sustancias químicas reguladas por el SWDA (Safe Water Drinking Act; regulación importante de los Estados Unidos regulada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental). THMs son un producto derivado del proceso de desinfección de cloro. THMs se forman cuando el cloro reacciona a otros compuestos orgánicos en el agua. THMs son conocidos como carcinógenos y se han ligado al cáncer de la vejiga.

2.2.10 Patógenos microbiológicos - Organismos que nacen del agua que se conoce que causan enfermedades en humanos. Patógenos comunes de agua incluyen coliforme fecal, disentería, cólera, hepatitis y quistes de microbios, tales como *Cryptosporidium*, *Giardia Lamblia*.

2.2.11 Sustancias radiológicas - Radium y sus primos relacionados se pueden encontrar en fuentes de debajo de la tierra. Se conocen como sustancias causantes de cáncer en los humanos. Exposición al Radium es a través del agua y cocinando mientras que la exposición a radón es regularmente mientras inhalan. Ambos son regulados por SDWA.

2.2.12 Cloruros - La intrusión del agua salina en los pozos pueden causar un aumento en cloruros. El agua tendrá un sabor salado y es corrosivo a las tuberías y griferías. Altos niveles pueden causar hipertensión. El nivel sano es bajo 250 ppm.

2.2.13 Nitratos - Los nitratos pueden entrar al agua de tierra del ecosistema, desbordarse de las gramas, jardines y de áreas de fincas que se fumigan intensamente, de áreas de Ganados, sistemas municipales de desperdicios de ganados, sistemas sépticos, sistemas de crías de pollos, estiércol y lagunas. Bebés de seis meses o menos son los más afectados por los excesos de nitratos en el agua. Ellos pueden desarrollar una condición llamada “methemoglobinemia” (síndrome de niño azul), el cual causa un color azulado alrededor de los labios y se riega hasta los dedos de las manos, de los pies y la cara y eventualmente cubre el cuerpo entero Si el problema no se resuelve inmediatamente, el bebé puede morir.

2.3 TÉCNICAS DE PURIFICACION DE AGUA

2.3.1 Por sedimentación

La sedimentación consiste en dejar el agua de un contenedor en reposo, para que los sólidos que posee se separen y se dirijan al fondo. La mayor parte de las técnicas de sedimentación se fundamentan en la acción de la gravedad.

La sedimentación puede ser simple o secundaria. La sedimentación simple se emplea para eliminar los sólidos más pesados sin necesidad de otro tratamiento

especial; mientras mayor sea el tiempo de reposo mayor será el asentamiento y consecuentemente la turbidez será menor, haciendo el agua más transparente.

El reposo natural prolongado también ayuda a mejorar la calidad del agua, pues provee oportunidad de la acción directa del aire y los rayos solares, lo cual mejora el sabor y elimina algunas sustancias nocivas del agua.

La sedimentación secundaria ocurre cuando se aplica un coagulante para producir el asiento de la materia sólida contenida en el agua.

2.3.2 Purificación de agua por filtración

La filtración es el proceso de separar un sólido del líquido en el que está suspendido al hacerlos pasar a través de un medio poroso (filtro) que retiene al sólido y por el cual el líquido puede pasar fácilmente.

Se emplea para obtener una mayor clarificación, generalmente se aplica después de la sedimentación para eliminar las sustancias que no salieron del agua durante su decantación.

2.3.3 Purificación de agua por desinfección

Se refiere a la destrucción de los microorganismos patógenos del agua ya que su desarrollo es perjudicial para la salud. Se puede realizar por medio de ebullición que consiste en hervir el agua durante 1 minuto y para mejorarle el sabor se pasa de un envase a otro varias veces, después se deja reposar por varias horas y se le agrega una pizca de sal por cada litro de agua. Cuando no se puede hervir el agua se puede hacer por medio de un tratamiento químico comúnmente con cloro o yodo.

2.3.4 Purificación de agua por cloración

Cloración es el procedimiento para desinfectar el agua utilizando el cloro o alguno de sus derivados, como el hipoclorito de sodio o de calcio. En las plantas de tratamiento de agua de gran capacidad, el cloro se aplica después de la filtración. Para obtener una desinfección adecuada, el cloro deberá estar en contacto con el agua por lo menos durante veinte minutos; transcurrido ese tiempo podrá considerarse el agua como sanitariamente segura. Para desinfectar el agua para consumo humano generalmente se utiliza hipoclorito de sodio al 5.1% (en masa). Se agrega una gota por cada litro a desinfectar.

2.3.5 Purificación de agua por ozono

Es el desinfectante más potente que se conoce, el único que responde realmente ante los casos difíciles (presencia de amebas, etc.). No comunica ni sabor ni olor al agua; la inversión inicial de una instalación para tratamiento por ozono es superior a la de cloración pero posee la ventaja que no deja ningún residuo.

2.3.6 Purificación de agua por rayos ultravioleta

La desinfección por ultravioleta usa la luz como fuente encerrada en un estuche protector, montado de manera que, cuando pasa el flujo de agua a través del estuche, los rayos ultravioleta son emitidos y absorbidos dentro del compartimiento. Cuando la energía ultravioleta es absorbida por el mecanismo reproductor de las bacterias y virus, el material genético (ADN/ARN) es modificado, de manera que no puede reproducirse. Los microorganismos se consideran muertos y el riesgo de contraer una enfermedad, es eliminado.

Los rayos ultravioleta se encuentran en la luz del sol y emiten una energía fuerte y electromagnética. Están en la escala de ondas cortas, invisibles, con una longitud de onda de 100 a 400 nm (1 nanómetro = 10^{-9} m).

2.4 DISPOSITIVOS Y TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

Luego de detectar la contaminación en la fuente de agua a utilizar es importante utilizar el dispositivo adecuado para su tratamiento en eliminar el contaminante.

2.4.1 Alúmina activada

Alúmina Activada es una forma granulada de óxido de aluminio. En este proceso, el agua que contiene el contaminante se pasa por un cartucho o canastilla de alúmina activada. La alúmina absorbe al contaminante y el agua fresca continúa al fregadero. El cartucho de alumina activada debe ser reemplazado regularmente. Es importante determinar a través de exámenes cuando la capacidad de eliminar el contaminante en el dispositivo ha llegado al agotamiento, para que la técnica de tratamiento elimine, no que contribuya, al contaminante. También dispositivos de Alúmina Activada acumulan gérmenes, así que el agua tratada tiene contenido más alto de gérmenes que agua sin tratar.

Contaminantes Eliminados: Arsénico, Fluoruro.

2.4.2 Carbón activado

Filtros de carbón activado absorben impurezas del agua según pasa por un cartucho o tanque de carbón. Tales filtros se utilizan para eliminar o despejar olores y sabores desagradables, compuestos orgánicos y residuos de cloro. Los filtros de carbón también eliminan algunos contaminantes sumamente peligrosos tales como el gas radón, sulfuro de hidrógeno, y varias sustancias químicas disueltas y trihalometanos. La mayoría de sustancias químicas inorgánicas no son eliminadas por estos filtros.

Contaminantes eliminados: H₂S, Radón, Cloruro, Compuestos Volátiles Orgánicos, Pesticidas, Benceno, Colores, Olores.

2.4.3 Aireación

Los sistemas de aireación rocían el agua a través de una cámara llena de aire entonces utilizan un abanico para mover el aire contaminado fuera del área.

Contaminantes eliminados: H₂S, Radón.

2.4.4 Intercambio de aniones

Las unidades de intercambio de Aniones utiliza una resina que intercambia el cloruro, o en algunos casos el hidróxido, por los aniones contaminantes. La mayoría utiliza cloruro que aumenta el contenido de cloruro en el agua según elimina aniones tales como el nitrato, sulfatos y bicarbonatos.

Contaminantes eliminados: Nitrato, Sulfato, Fluoruro, Taninos (son sustancias fenólicas amargas que proceden de la maceración de la uva y del roble).

2.4.5 Precipitación química

En la precipitación química ciertos compuestos se añaden al agua que reacciona químicamente con el contaminante. Los productos de la reacción precipitarán al fondo o flotarán a la superficie del tanque de almacenamiento, para que sean eliminados. Este método se utiliza mayormente en fuentes públicas de abastecimiento y no es una solución viable para fuentes de abastecimiento privadas.

En caso de detectarse un contaminante en una fuente de abastecimiento de agua privada utilice un método alternativo.

Contaminantes eliminados: Arsénico, Bario, Cadmio, Cloro, Plomo, Mercurio, Selenio y Plata.

2.4.6 Tratar con cloro

El método más común, más viejo y relativamente barato usado para desinfectar el agua es tratar con cloro. Una bomba química dispensa el cloro continuamente en la fuente de abastecimiento de agua. El Cloro, un agente oxidante, mata la mayoría de gérmenes y algunos virus. En las concentraciones adecuadas y bajo tiempo de exposición adecuado, el cloro es un desinfectante excelente.

El cloro reacciona con ciertos metales y materia orgánica en el agua para formar sustancias químicas orgánicas clorinadas y peligrosas. El uso de un filtro de carbón activado después de ser tratado con cloro eliminará cloro en exceso y cantidades limitadas de cualquier compuesto del cloro que se forme. Tratar con cloro también puede oxidar y eliminar alguna sustancia que cause olor y color, incluyendo al sulfuro de hidrógeno.

Contaminantes eliminados: Gérmenes, Hierro, Sulfuro de Hidrógeno, Algunos Virus.

2.4.7 Destilación

La destilación se da cuando se calienta el agua hasta que se evapora como vapor. Minerales, gérmenes y otras sustancias se quedan atrás cuando el vapor se vuelve a condensar a agua relativamente pura. Los destiladores eliminan gérmenes, minerales, cantidades con rastros de metales, varias sustancias químicas volátiles y nitrato. Contaminantes eliminados: Gérmenes, Plomo, Nitrato, Cloruro de Sodio, Sustancias Químicas Orgánicas, Varios Pesticidas.

2.4.8 Intercambio de iones – Ablandamiento del agua

Sistemas de intercambio de iones suavizan el agua dura eliminando los minerales (calcio y magnesio que causan la dureza. Este sistema también elimina eficazmente el hierro, manganeso y varios metales fuertes.

El agua dura pasa a través de un tanque que contiene la resina de intercambio. El Sodio en la resina reemplaza la dureza de los minerales. El sodio permanece en una forma soluble en el agua suavizada.

Contaminantes eliminados: Hierro, Magnesio, Calcio y Manganeseo

2.4.9 Filtración mecánica

Los filtros mecánicos, o micro-filtración, elimina material suspendido del agua incluyendo arena, masilla u otra materia orgánica. Estos filtros no eliminan partículas disuelta o muy fina y se utilizan regularmente en combinación con otro equipo de tratamiento. Los Filtros son comúnmente de tela, fibra, cerámica u otro material que sea de material protector.

Contaminantes eliminados: Sedimento

2.4.10 Filtros neutralizantes

Los filtros Neutralizantes tratan agua ácida. El filtro trata todas las fuentes de agua en el hogar pasándola a través del calcio granulado (mármol, carbonato de calcio ó cal) ó alimentando química en cenizas de soda, carbonato de sodio ó soda cáustica (hidróxido de sodio).

Contaminantes eliminados: Acidez.

2.4.11 Filtros que oxidan

Los filtros que oxidan utilizan un filtro cubierto de zeolita para oxidar hierro disuelto, manganeso u sulfuro de hidrógeno. Los contaminantes entonces forman grandes partículas que el filtro puede agarrar.

Contaminantes eliminados: Sulfuro de Hidrógeno, Hierro, Manganeseo

Artículos Relacionados: Filtros de Manganeseo Green-sand, Filtros Birm, Filtros Pyrolox

2.4.12 Osmosis inversa

Las unidades de Osmosis Inversa (RO) eliminan una cantidad considerable de la mayoría de sustancias químicas inorgánicas (tales como sales, metales, minerales), mayoría de microorganismos y muchas sustancias químicas orgánicas, no eliminan eficazmente algunos compuestos orgánicos.

Los filtros mecánicos y filtros de carbón activado casi siempre se utilizan con una unidad de pre-tratamiento. Primero, el filtro mecánico elimina sedimento y otras impurezas, que de otra forma tapan la membrana de osmosis inversa. Segundo, un filtro de carbón activado elimina compuestos orgánicos que pasan a través de la unidad de Osmosis Inversa. Luego dependiendo de la naturaleza del agua se da paso a un Equipo Ablandador, que posteriormente se va al sistema de Osmosis Inversa.

La Osmosis Inversa usa grandes cantidades de agua, típicamente, cerca de 70% el resto del agua es desechada con los contaminantes.

Contaminantes eliminados: Plomo, Sulfato, Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Manganeso, Aluminio, Cloruro, Nitrato, Fluoruro Boro , la mayoría de microorganismos.

2.4.13 Ultravioleta

Las lámparas de arca de mercurio producen luz ultravioleta que tiene propiedades germicidas. La radiación mata o desactiva los patógenos. Los gérmenes se matan con cantidades relativamente bajas de radiación, los virus son más resistentes, y los quistes y gusanos no son afectados. La radiación no deja residuos del producto que continua desinfectando más allá del período del tratamiento.

Contaminantes eliminados: Gérmenes, Virus, Quistes tales como: Cryptosporidium y Giardia.

III. FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE ELECTRODEIONIZACION

3.1 ¿Qué es el sistema de Electrodeionización EDI ?

Esta nueva tecnología es una combinación de electrodiálisis e intercambio iónico, resultando en un proceso que elimina de manera efectiva los iones del agua a la vez que las resinas de intercambio iónico son continuamente regeneradas por una corriente eléctrica. Esta regeneración electroquímica se sirve de un medio eléctricamente activo y de un potencial eléctrico para influenciar el transporte iónico y sustituye a la regeneración química de los sistemas convencionales de intercambio iónico.

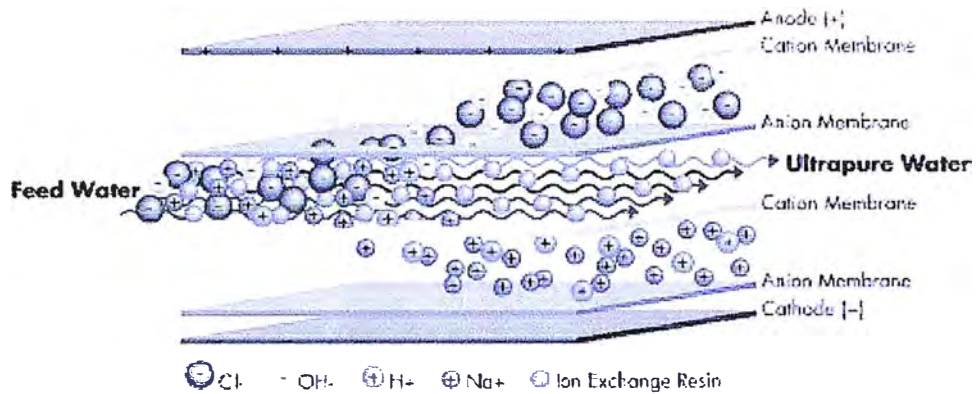
El EDI produce agua de proceso industrial de la más alta calidad, usando 95% menos de productos químicos que la tecnología convencional de intercambio iónico. Con el sistema de EDI, membranas y electricidad reemplazan a los millones de galones de productos químicos ácidos y cáusticos que los antiguos procesos requerían diariamente.

3.2 Funcionamiento del equipo

Un aparato de EDI tiene la estructura básica de una cámara de desionización. La cámara contiene una resina de intercambio iónico (aniónica y catiónica), empaquetada en un espacio entre una membrana de intercambio catiónico y una membrana de intercambio aniónico. Solamente los iones pueden pasar a través de las membranas, no el agua.

El agua de entrada pasa a través de la mezcla de resinas de intercambio iónico y, al mismo tiempo, una fuente externa de corriente suministra un campo transversal de corriente continua por medio de unos electrodos colocados en los extremos.

Figura 1: FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO DE ELECTRODEIONIZACIÓN CONTINUA



Fuente : J. Gifford, D. Atnoor [13]

El voltaje de corriente continua crea una corriente a través de la resina que arrastra a los cationes hacia el cátodo y a los aniones hacia el ánodo. En el camino de los iones hacia la membrana, estos pueden pasar dentro de las cámaras del concentrado (ver Figura 1) pero no se pueden acercar más al electrodo. Están bloqueados por la membrana contigua, que contiene una resina con la misma carga fija.

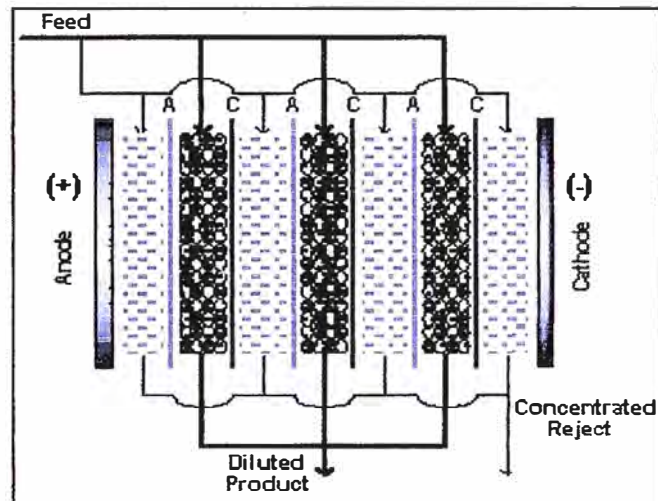
De esta forma las membranas de intercambio iónico eliminan eléctricamente los iones del agua de entrada y los pasan al agua concentrada que sale de ambas membranas de intercambio iónico, produciendo así agua ultra pura.

La regeneración de la resina es conocido como el régimen de electro regeneración. Este régimen es caracterizado por la regeneración continua de resinas por iones hidrógeno e hidróxido por la disociación eléctrica inducida del agua. Esta disociación preferentemente ocurre en interfaces bipolares en el compartimiento donde el Ion queda saturado por concentraciones bajas del soluto.

Los dos tipos primarios de interfaces bipolares en dispositivos EDI son resina / resina y resina / membrana. La posición óptima que permite la regeneración de la resina es en la interfase resina/ resina esta dado por la resina mixta catiónica y aniónica.

Una parte del agua de alimentación es usada para el retiro del agua de rechazo o concentrado, se muestra en la figura 2.

Figura 2: FLUJOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL EDI



Fuente : J. Gifford, D. Atnoor [13]

3.3 Partes del equipo:

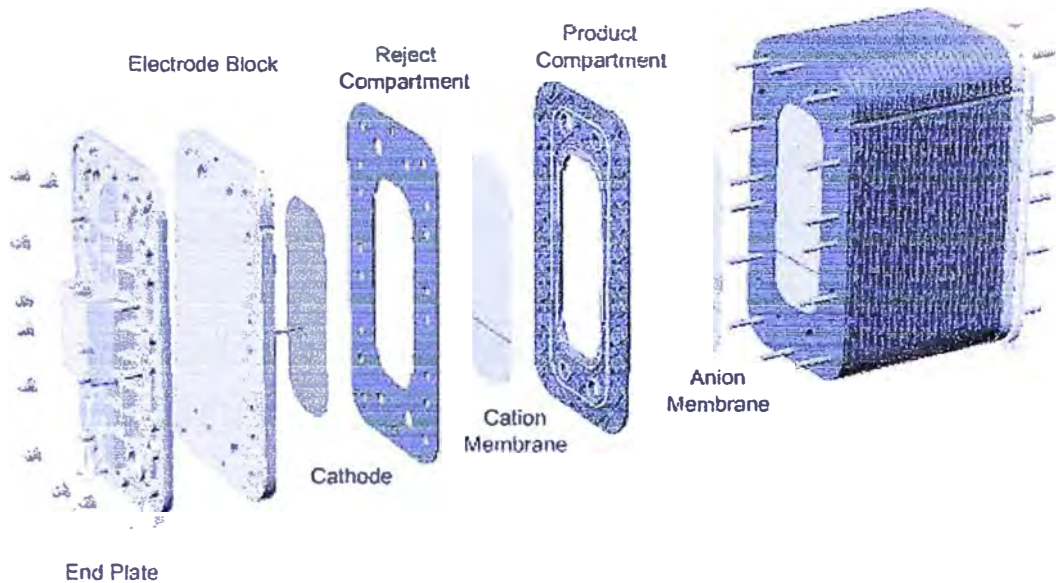
3.3.1 Compartimiento del módulo

Los dispositivos comercialmente disponibles están producidos en dos configuraciones principales: En plato y marco o espiral bobinado.

Los dispositivos del tipo plato son similares a un filtro prensa con múltiples compartimientos entre un set de varios platos y electrodos que son fijados por pernos. Los compartimientos están alternados para el agua producto y concentrado.

Los dispositivos están hidráulicamente en paralelo pero eléctricamente en serie. Una vista esquemática de un plato típico y dispositivo del marco EDI es mostrada en Figura 3.

Figura 3: VISTA ESQUEMÁTICA DEL MODULO EDI



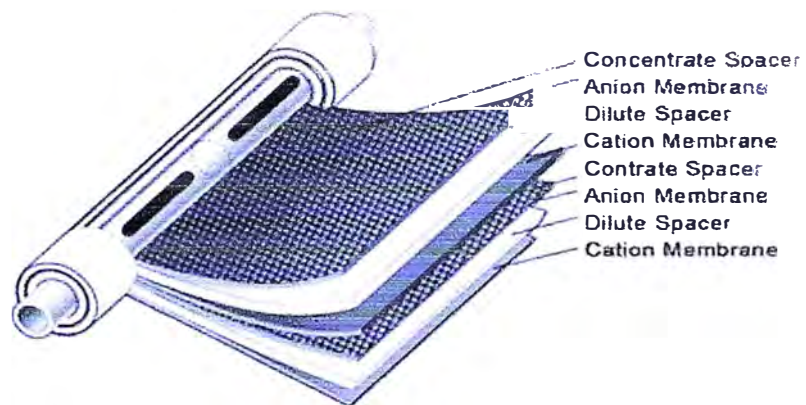
Fuente : Fuente : J. Gifford, D. Atnoor [13]

Los dispositivos EDI en espiral son análogos a una membrana de ósmosis inversa de espiral, donde la membrana semipermeable, las resinas, y espaciadores están en forma de espiral y el electrodo es el centro del tubo. Deben instalarse los dispositivos dentro de un housing, mientras los dispositivos del plato-y-marco incorporan algunos medios selladores en los compartimientos individuales, mientras el de espiral esta dado en housing. Los dispositivos espirales son algo más difíciles congregarse que las unidades del plato-y-marco. Un dispositivo espiral típico se muestra en Figura 4.

Las celdas mismas pueden estar clasificadas en delgada o gruesa. Los dispositivos de la celda delgada con un espaciamiento de aproximadamente 1.5-3.5 mm entre las membranas de intercambio iónico en los compartimientos del agua producto, mientras los dispositivos de la celda gruesa típicamente usan Inter-membrana espaciados entre 8-10 mm. Ambos celdas de plato-marco y el de espiral sus configuraciones son adecuadas en construcciones de celda gruesa y delgada. Las dispositivos de las celdas delgadas se usan íntimamente en las resinas mixtas de

intercambio iónico del compartimiento del producto, en cambio las celdas gruesas surtan mejor efecto en regiones separadas que contienen primordialmente resinas de la misma polaridad.

Figura 4: DISPOSITIVO DEL TIPO ESPIRAL



Fuente : Wood, JH,GC. Ganzi,PA [5]

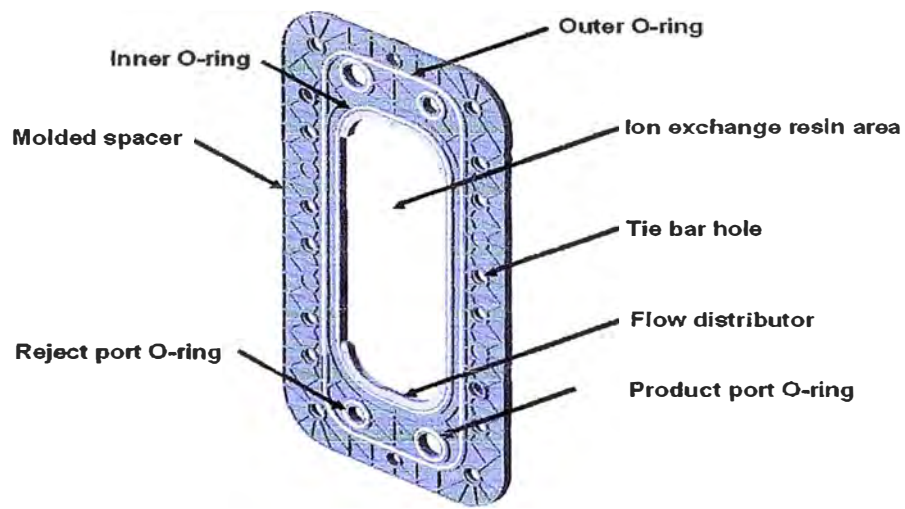
Los espaciadores de flujo:

Todos los dispositivos comerciales EDI usan resina de intercambio iónico en los compartimientos de dilución, por eso se requiere un componente para contener la resina. Este 'espaciador de resina' consta de un puerto de entrada, un distribuidor de entrada, compartimiento de resina, distribuidor de conexión de salida, y un puerto de conexión de salida. Hay que proveer una manera de impermeabilizar la membrana de intercambio iónico contra el espaciador para formar lados del compartimiento de resina. Un espaciador diluido típico para un plato y un dispositivo del marco EDI es mostrado en Figura 5.

Todos los dispositivos del EDI también requerirán los compartimientos de flujo para el concentrado y también para el electrodo. Los dos tipos son normalmente usados para que pasen a través de una pantalla o en un compartimiento de la resina. Generalmente consiste en una pantalla de malla plástica tejida que viene

acompañado de un sello de empaquetadura de caucho ubicado en el perímetro de la pantalla.

Figura 5: ESPACIADORES DE FLUJO



Fuente : J. Gifford, D. Atnoor [13]

El uso de pantalla del tipo espaciadores en el concentrado es bastante común en los dispositivos del EDI, como ellos es bastante barato y relativamente fácil de fabricar. Su desventaja mayor es que ellos no son conductivos a pesar de los iones que se transfieren en el concentrado desde el compartimiento de dilución. Por ejemplo, un sistema EDI que se alimenta de un Osmosis Inversa penetra con una conductividad de $5 \mu\text{S}/\text{cm}$, operando al 90% recuperación de agua tendrían una conductividad en el concentrado de aproximadamente $50 \mu\text{S}/\text{cm}$. Esto es bastante bajo para limitar la cantidad de corriente que puede pasarse a través del módulo. Varios fabricantes recomiendan inyección de sal en el concentrado para levantar la conductividad a $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ o más.

Una alternativa al uso de espaciadores del tipo pantalla para el concentrado y compartimientos del electrodo es utilizar un compartimiento resina similar a los usados para los compartimientos de dilución. Empleando un relleno conductivo, el

uso de inyección de sal puede evitarse. Se ha encontrado que la inyección de una solución de sal en un compartimiento concentrado resina tiene el efecto pequeño en la resistencia del módulo.

3.3.2 Electrodo del modulo EDI

3.3.2.1 Las reacciones en el electrodo y selección del material

CATODO

El cátodo o electrodo cargado negativamente, los electrones son cedidos de un circuito externo para los iones de una solución, por la siguiente reacción:

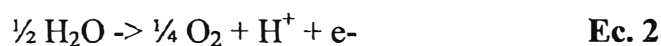


Fuente : Ionpure Technology [8]

Según la ecuación se requiere de un electrodo que sea estable en presencia de base e hidrógeno. El material del cátodo más común para los dispositivos del EDI es el acero inoxidable.

ANODO

El ánodo o electrodo cargado positivamente, los electrones son cedidos de los iones de una solución para el circuito externo por uno o mas de acuerdo a las siguientes reacciones



Fuente : Ionpure Technology [8]

Los materiales del ánodo normalmente usados son: titanio – iridio recubierto y Titanio – Platino recubierto.

Los gases son producidos por las reacciones del cátodo y ánodo. Éstos deben quitarse para prevenir que se forme una capa en la superficie de los electrodos, permitiendo una reducción de voltaje aplicada a las celdas del EDI. La remoción de los gases se realiza manteniendo un flujo de agua por la superficie de los electrodos durante el funcionamiento del equipo. Esto requiere el uso de un compartimiento de flujo adyacente al electrodo. Tales compartimientos podrían ser los espaciadores de tipo pantalla - empaquetadura o compartimientos relleno resina.

Desde que el alambre de cobre se usa comúnmente para conducir corriente eléctrica a los electrodos, la unión del alambre de cobre y el electrodo de poco cobre puede estar sujeto a corrosión, particularmente si está húmedo. Es mejor tener una proyección del material de electrodo que atraviese la celda para tener una conexión externa que permita estar seco evitando la corrosión.

3.3.3 Resina y Membrana de intercambio iónico en modulo EDI

3.3.3.1 Selección de la resina intercambiadora de iones.

Las resinas intercambiadora de iones funcionan diferentemente en los dispositivos del EDI que en un demineralizador convencional. En el EDI, la habilidad del relleno de la resina de transportar los iones rápidamente a la superficie de las membranas de intercambio de Ion es mucho más importante que la capacidad de intercambio de Ion de la resina. Las resinas no se perfeccionan por consiguiente para la capacidad, pero para otras propiedades que influyen en el transporte, como la retención de agua y selectividad.

También deben escogerse cuidadosamente las combinaciones de Membrana / resina catalizar el fraccionamiento electroquímico de agua selectivamente a las varias situaciones dentro del dispositivo del EDI. La investigación considerable ha entrado en la optimización de rellenos de la resina para los dispositivos del EDI, principalmente por los fabricantes de los dispositivos del EDI en lugar de los fabricantes de las resinas intercambiadora de iones.

3.3.3.2 Selección de la membrana intercambiadora de iones.

Las membranas de intercambio de iones son diferentes a las membranas de la filtración, en eso ellos son esencialmente impermeables al agua. Ellos combinan la habilidad de actuar como una pared de la separación entre dos soluciones (permeado y concentrado) con las propiedades químicas y electroquímicas de la resina intercambiadora de iones. Las membranas de intercambiadora de iones son selectivamente permeables. Cuando se tenga la solución de agua y el campo eléctrico, la membrana catiónica sólo permitirá el pasaje de cationes, mientras la membrana aniónica sólo permitirá el pasaje de aniones.

Hay dos tipos principales de membranas de intercambio de iones disponibles comercialmente, heterogéneo y homogéneo. Las membranas homogéneas consisten en películas delgadas de material de intercambio de Ion continuo, típicamente en un soporte de tejido. Éstos son esencialmente equivalentes a una resina intercambiadora de iones, solamente en la forma de una hoja delgada. Las membranas heterogéneas consisten en partículas pequeñas de intercambio de Ion empotradas en una carpeta incrtc, con o sin soporte.

Algunas de las propiedades más importantes de membranas de intercambio de Ion usados en los dispositivos del EDI incluyen lo siguiente:

- ✧ Baja permeabilidad del agua
- ✧ Baja resistencia eléctrica
- ✧ Alta resistencia
- ✧ La resistencia a reducción o expansión
- ✧ La resistencia a pH alto y bajo

Membranas de intercambio iónico que se desarrollaron para la electrodiálisis no pueden tener fuerza mecánica suficiente para el uso en dispositivos EDI, así que la mayoría de los fabricantes ha desarrollado membranas de intercambio especiales que se perfeccionan para sus dispositivos EDI. Membranas heterogéneas basadas en una carpeta del polyolefin (polímero) se han puesto muy populares para esta aplicación. Son relativamente bajos en costo, flexibilidad en la formulación.

3.3.4 Tipo de celda del EDI

Los primeros dispositivos del EDI comerciales eran de celda delgada, con la resina mixta de intercambio iónico en las celdas del producto (dilución). Aunque ellos han sido modificados durante los años para mejorar su operación, los principios básicos han permanecido constantes y la tecnología ha demostrado ser eficaz y fiable.

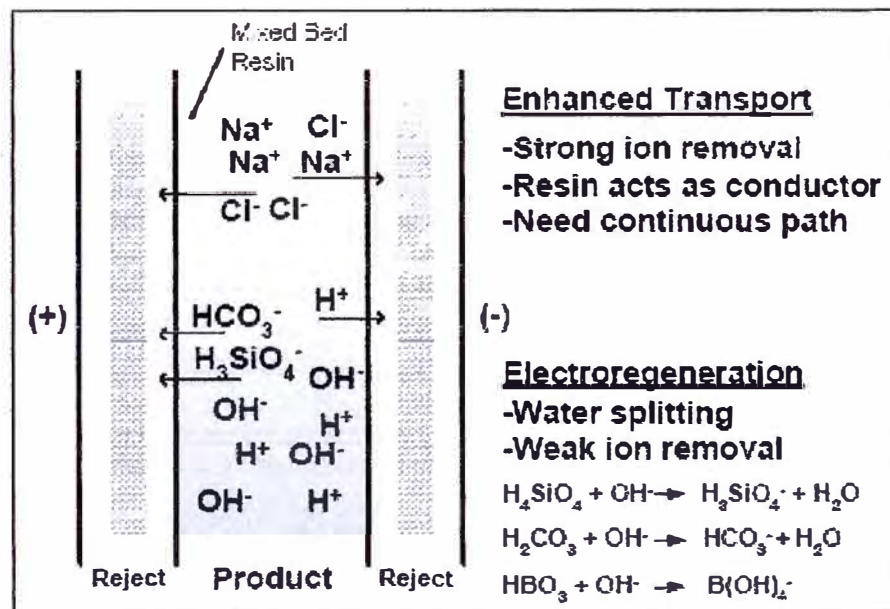
Los dispositivos de electrodeionización de celdas mixtas delgadas requieren un área mayor de membrana de intercambio iónico por volumen de agua procesada, y no es por consiguiente los dispositivos de celdas gruesas que incrementan su costo. En el EDI la celda delgada mixta, se crean dos zonas distintas dentro de los compartimientos de dilución. Las sustancias fuertemente ionizadas están primero y las sustancias que están débilmente ionizadas están alejadas, el agua continúa a través del camino de flujo. Nosotros nos referimos respectivamente a estas zonas como el transporte y regeneración del electro.

En la producción de agua ultra pura, el alimento a un dispositivo EDI es el permeado de la ósmosis inversa. El agua que ingresa al EDI contiene cantidades bajas de sales, como sólidos ionizados y algunas sustancias débiles ionizadas como el anhídrido carbónico y sílice. Debido a la carga baja, el dispositivo puede quitar la mayoría de las sustancias fuertemente ionizadas en la zona del paso del agua a través de la resina. Aquí, la resina intercambiadora iónica simplemente actúa como un conductor en acelerar el pasaje de iones a través del compartimiento de la membrana, y en el compartimiento del concentrado. Esto se debe a que la resina intercambiadora de iones en varios órdenes de magnitud es más conductivo que el agua. Esto se muestra en la Figura 6.

Después que la mayoría de las sustancias fuertemente ionizadas ha estado alejado de la celda, la conductancia de la celda en la dilución se mantiene por las resinas intercambiadora de iones. Situaciones donde el voltaje termodinámico mínimo para el fraccionamiento de agua es aplicado, las concentraciones de hidrógeno (H^+) e hidróxido (OH^-) aumentan los iones. Esto se muestra en la figura en la zona de la electro-regeneración. La reacción de descomposición de agua se cataliza por

las condiciones de resina / resina o membrana / resina. Aquí, los iones liberados H^+ y OH^- convierten a las resinas en estado regenerado, por tanto permite el paso de los iones a través de las membranas selectivas permaneciendo en el flujo del concentrado.

Figura 6: ELECTROREGENERACION DE LAS RESINAS



Fuente : Jonathan Wood and Joseph Gifford [2]

3.3.4.1 Celda gruesa en EDI

Los dispositivos de celdas gruesas EDI llegaron comercialmente a 1996, diferentes tipos están disponibles, otra cosa que diferencia estos dispositivos EDI de celda delgada es el hecho que la zona de dilución las celdas pueden usarse resinas separadas o combinación de resinas separadas y resinas mixtas, tienen el mismo principio que la celda delgada.

3.3.4.2 Material de Construcción del módulo EDI

Wetted component	Material	Federal Register
Dilute spacer,	Polysulfone	21 CFR 177.1655
Concentrate spacer	Polysulfone	21 CFR 177.1655
End block	Polypropylene	21 CFR 177.1520
Resin compartment o-rings	FDA-grade silicone	21 CFR 177.2600
Anion exchange resin 1	Styrene/DVB, strong base, Type I	21 CFR 173.25
Anion exchange resin 2	Styrene/DVB, strong base, Type II	21 CFR 173.25
Cation exchange resin	Styrene/DVB, strong acid	21 CFR 173.25
Anion exchange membrane	Heterogeneous: PE/AER	21 CFR 173.20
Cation exchange membrane	Heterogeneous: PE/CER	21 CFR 173.20
Anode	Platinized titanium	N/A *
Cathode	316 stainless steel	N/A *

*The electrodes contact only the reject, not the product water

Figura 7: MATERIAL DEL MODULO EDI

Fuente : Ionpure Technology Manufactures [8]

3.3.5 Voltaje de corriente continua CD en modulo EDI

3.3.5.1 La Ley de Faraday

En un dispositivo del electrodeionización continua la corriente DC es la fuerza motriz de remoción de iones, mientras el voltaje CD aplicado es la manera de obtener la corriente requerida. Las condiciones de la ley de Faraday indica que la carga eléctrica para liberar un equivalente gramo de una sustancia por electrólisis es 96,487 culombios (un culombio es la cantidad de carga eléctrica que cruza una superficie en uno segundo cuando una corriente estable de un amperio fluye a

través de la superficie). En electrodiálisis y electrodeionización, la Ley de Faraday se usa para relacionar el traslado de sales a través de las membranas y cantidad de corriente que fluye a través de las membranas. Un formulario común de esta relación se da en la siguiente ecuación:

$$I_a = \frac{Q_d (C_{ai} - C_{ao}) F}{\eta_c N_{cp}} \quad \text{Ec. 4}$$

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

Esto muestra que la cantidad DC actual requerida es directamente proporcional a la proporción de flujo a través de los compartimientos de dilución y cantidad de equivalente iónicos para ser removidos, e inversamente proporcional a la eficiencia de corriente.

3.3.5.2 La Eficiencia de corriente y E-factor

Puede definirse la eficiencia de corriente como la proporción de la corriente mínima teórica por la ley de Faraday (a 100% eficiencia) a la corriente real aplicada a los electrodos del dispositivo:

$$\eta_c = \frac{I_t}{I_a} \quad \text{Ec.5}$$

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

En un dispositivo EDI, la corriente que no causa el traslado de sal causará al agua (H^+ y OH^-) para dividir los iones en hidrógeno (H^+) e hidróxido (OH^-), permitiendo regeneración electroquímica de las resinas intercambiadora de iones dentro del dispositivo. Por ejemplo en un módulo que está operando a 25% eficiencia de corriente y está dando 4 amperios de corriente DC, 1 amperio está causando el traslado de sal y 3 amperios está causando fraccionamiento de agua que no esta relacionado al traslado del Ión. Las fugas pueden causar alguna pérdida de corriente, pero éstos son normalmente pequeños comparado con el fraccionamiento del agua.

Para producir agua de pureza alta (encima de 1 megohm/cm) con un sistema EDI, es generalmente necesario que el agua de ingreso sea con TDS bajo (proviene del permeado del Osmosis Inversa, normalmente menos de 0.0005 equivalents/litro) y para operar a una eficiencia de corriente de menos del 35%. Para el levantamiento óptimo de sales ionizado débil como Sílice y Boro, las eficiencia de corriente baja al 5% es empleado.

Algunos autores prefieren usar el término E-factor. Esto está definido como la proporción de la corriente aplicada a la corriente teórica, y es por consiguiente el recíproco de la eficiencia de corriente:

$$EF = \frac{I_a}{I_t} \quad \text{Ec. 6}$$

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

3.3.5.3 La Ley de ohm y Resistencia del Módulo

Las condiciones de la ley de ohm es la corriente continua que fluye en un circuito eléctrico es directamente proporcional al voltaje aplicado, e inversamente proporcional a la resistencia del elemento:

$$I = \frac{E}{R} \quad \text{Ec 7}$$

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

La mayoría de los fabricantes de dispositivos del EDI limitan el voltaje aplicado a 600 VDC para evitar la necesidad de construcción de cables eléctricos más caros que se requiere para altos voltajes. Dado la limitación de voltaje, la resistencia eléctrica del módulo, controla por consiguiente cuánta corriente puede pasar a través de las celdas. Desde que la corriente DC determina cuánta agua puede procesarse para dar una calidad de producto (o que la calidad será dado por una

proporción de flujo), es importante perfeccionar la resistencia eléctrica del módulo.

La resistencia global del módulo EDI puede ser afectado por lo siguiente:

- ✧ La resistencia de las membranas selectivas aniónicas
- ✧ La resistencia de las membranas selectivas catiónicas
- ✧ La resistencia de las resinas intercambiadora de iones
- ✧ La resistencia de flujo del concentrado
- ✧ La resistencia del electrodo del ánodo
- ✧ La resistencia del electrodo del cátodo
- ✧ Temperatura de agua de ingreso
- ✧ Composición iónica del agua de ingreso

Además de la selección apropiada de resina y membranas, hay varios métodos que reducen la resistencia eléctrica de la celda y por consiguiente permiten pasar mayor corriente DC.

La primera técnica usada para cumplir esto fue aumentar la recuperación de agua y por consiguiente la cantidad de sal en los compartimientos de los concentrados. Esto generalmente se hizo incorporando un arreglo del ingreso, usando una bomba para recircular el flujo del concentrado y asegurar la distribución de flujo adecuado, disminuyendo la proporción de flujo del concentrado para el drenaje.

Un método alternativo de reducir la resistencia de la celda es inyectar una sal conductiva como NaCl en el alimento a los compartimientos de los concentrados usando una bomba dosificadora. Hay varias posibles desventajas a este método. Aumentando el TDS puede impedir la toma del concentrado para otros usos, y puede aumentar la posibilidad de que la sal crea un puente que permita pérdidas de corrientes DC. Si el concentrado se usado como ingreso a los compartimientos del electrodo puede llevar a la generación de gas cloro al ánodo.

Un tercer método es incorporar un relleno de resina en el compartimiento del concentrado (y en algunos casos en el electrodo) eliminan la necesidad de inyección de una sal conductiva. También se ha visto que la resina ayuda a transferir iones a la superficie del lado del concentrado que pasa a través de la membrana de intercambio iónico, mejorando la remoción de sales.

3.3.6 Remoción de los elementos iónicos del EDI

La remoción de los elementos iónicos por el proceso EDI no son dados con la misma eficiencia. Este hecho impacta la calidad y pureza del agua producto.

3.3.6.1 La remoción de iones.

Los iones con carga fuerte, masa pequeña, y adsorción alta a las resinas son removidos con alta eficiencia. Éstos incluyen típicamente: H^+ , OH^- , Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} , y SO_4^{-2} (y los iones similares).

En la primera sección del módulo EDI, estos iones son preferencialmente removidos que los otros iones. La cantidad relativa de estos iones afecta la remoción de los otros iones. El pH cercano a 7.0 en esta sección el H^+ y OH^- se equilibran los iones.

3.3.6.1.1 La primera sección del módulo EDI es conocido como “ Trabajo del lecho”.

Los iones moderadamente ionizados y polarizados son los siguientes que serán removidos (por ejemplo, CO₂).

La remoción del CO₂ (Anhídrido carbónico)

El CO₂ es el siguiente a remover, es el constituyente mas común de ingreso al EDI. El CO₂ tiene química compleja que depende de la concentración local de protones, y es considerado moderadamente ionizado:



Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

En esta sección el pH se obliga a estar cercano a 7.0, la mayoría del CO₂ esta en forma de bicarbonato (HCO_3^-). El bicarbonato es el adsorbente débil para la resina del anión, para que no puede competir con " los iones fáciles" como Cl^- y SO_4^{-2} .

3.3.6.1.2 En la segunda sección (" Puliendo la Sección") del módulo EDI

El CO₂ (en todos sus formas) está removido preferencialmente por los iones más débiles. La cantidad de CO₂ y HCO₃⁻ en el ingreso del EDI afecta fuertemente la resistividad final del agua producto y eficiencia de Sílice y remoción del Boro.

Se tiene que mientras el CO₂(en todos sus formas) está menos de 5 mg/l, la calidad de agua ultra-pura puede lograrse. Si la concentración de CO₂ es mayor que 10 mg/l, puede interferir con la remoción total de iones e impactar fuertemente en la calidad del agua producto y remoción de sílice.

3.3.6.1.3 Las especies débilmente ionizadas son las ultimas removidas (por ejemplo, disolución de Silica y Boro).

La remoción de Sílice

Desde las especies moleculares tal como el sílice son débilmente ionizado, y difícil de absorción para la resina de intercambio iónico, ellos son los más difíciles de quitar usando cualquier proceso de deionización.

Si todos los iones son "fáciles" de remover, y todo el CO₂ es removido, el módulo EDI puede enfocar su fuerza en remover estas especies débilmente ionizadas. El tiempo de residencia disponible en esta tercera sección del módulo es importante. El más largo tiempo de residencia disponible en el módulo y alta eficiencia de remoción. Un amplio tiempo de residencia en la tercera sección puede lograrse minimizando la conductividad del agua producto del Osmosis Inversa (la cantidad de iones "fáciles" para ser removidos), minimizando la cantidad de CO₂ en el producto del Osmosis Inversa.

La segunda y tercera sección del módulo EDI son conocidos como " pulido del lecho" . Sílice es uno de los minerales más importantes de remoción del agua para plantas de generación eléctrica y aplicaciones en semiconductores. Es también uno del más difíciles de remover.

La química de sílice es compleja. En el nivel más básico, las formas del sílice viene de manera "coloidal" y " reactiva." El nivel de sílice del agua de ingreso

depende de la geología de la región, fuente del agua superficial o de pozo. El rango de sílice en el agua cruda será menor a 2 ppm y superior de 100 ppm.

En los procesos físicos tales como el Osmosis Inversa (RO) quitará la sílice coloidal. El EDI removerá sólo sílice reactiva.

La remoción de sílice reactiva depende de su carga. La carga del sílice es pequeña, si cualquier carga neutral en pH cercano de 7 desde el pK1 de ácido silícico es 9.8 hace difícil intercambiar con la resina de intercambio de iones, o remover con Osmosis Inversa o EDI. Levantando el pH por encima de 9.8 ayuda a la remoción del sílice molecular.

La incrustación del sílice es un problema. La solubilidad de sílice a pH 6-8 está sólo 120 ppm en las 25°C. esto significa que 30 ppm de sílice en un ingreso de Osmosis Inversa con 75% la recuperación empezará a incrustar. Hay dos técnicas de prevención de incrustación de sílice. Uno es el uso de un anti-incrustante en el proceso del Osmosis Inversa que retardará la precipitación de sílice sólida. El otro está levantando el pH incrementando el límite de solubilidad de sílice. En pH 10 el Sílice es soluble hasta 310 ppm. Claramente a pH altos el agua causará incrustamiento de dureza si el ingreso de agua no se ablanda adecuadamente.

Es importante mantener la sílice de ingreso al EDI por debajo de 0.5 ppm para:

- ✧ Evitar incrustamiento en la línea de concentrado del EDI
- ✧ Minimizar los niveles de sílice en el agua producto

Los módulos comerciales típicos de Osmosis Inversa sólo rechazarán dos veces sílice al pasaje de Ion cloruro. La mayoría de los fabricantes de módulos espirales Osmosis Inversa exigen 99.7% rechazo para los elementos de calidad altos individuales. 99.0% - 99.5% es un razonable sílice de rechazo por un sistema de Osmosis Inversa bien diseñado.

Con 20ppm de sílice de alimentación, 75% recuperación, y 99.0% de rechazo mantendrá el producto Osmosis Inversa a 0.5 ppm de sílice.

Para los niveles superiores de sílice en el alimento, el sistema Osmosis Inversa debe diseñarse con la calidad superior de los elementos de Osmosis Inversa y/o baja recuperación. Usando 99.7% rechazo y 65% recuperación, el ingreso al

Osmosis Inversa puede acercarse a 90 ppm y mantendrá 0.5 ppm de sílice en el producto .

3.3.6.2 La descomposición de agua y resistencia del módulo

La descomposición de agua es crítica para la remoción de especies ionizadas débiles como sílice, anhídrido carbónico, y Boro. También es crítico para remoción de iones fuertes en la celda y lecho del EDI. La cantidad de agua a descomponerse puede ser cuantificado usando la ley de Faraday para comparar la cantidad teórica de corriente que necesita para transferir una cantidad dada de especies ionizadas salientes de una celda electroquímica a la corriente real aplicada a través de esa celda.

$$I = \frac{(Eq)(F)}{t} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

I = la corriente teórica, amperios

Eq = Número de equivalente transferidos por celda

t = tiempo, segundo

F = Constante de Faraday = 96,500 coulombs/equivalent

Si nosotros definimos la eficacia actual como la corriente teórica dada por la ley de Faraday, dividida por la corriente aplicada real, obtenemos la ecuación siguiente:

$$\eta = \frac{(Eq)(F)100}{(Ia)(t)} \quad \text{Ec. 10}$$

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

Donde:

η = Eficiencia de corriente,(%)

Ia = Corriente aplicada, amperios

Para hacer esta ecuación más fácil de usar, podemos sustituir lo siguiente:

$$\eta = \frac{(3.22)(TDS)(Q/n)}{Ia}$$

Ec. 11

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

Donde:

TDS = Sólidos Disueltos Totales, mg/l como CaCO₃

Q/n = Razón de flujo producto por la celda, l/min/celda

3.22 = Factor de conversión

En la Ec. 11 se muestra el TDS como la carga de ingreso total a la celda pero la carga del ingreso total también incluye especies débilmente ionizadas, como el anhídrido carbónico y sílice que también son removidas. Para tenerlos en cuenta, Ionpure (fabricante de módulos EDI) usa un término llamado el Equivalente de Conductividad de Ingreso (FCE) y usa el E-celda un término llamado el Total los Aniones Desmontables (el T_É). Calcular la verdadera eficiencia de corriente, puede sustituirse el T_É directamente para TDS en la Ec. 11. Sin embargo para calcular la eficiencia de corriente usando FCE el factor de conversión cambia como sigue:

$$\eta = \frac{(1.31)(FCE)(Q/n)}{Ia}$$

Ec. 12

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

De la Ec. 10 y 11 , podemos tener un par de conclusiones importantes.

Primero, El EDI de celda gruesa opera a flujo mayores que el EDI de celda delgada, pero requiere mayor corriente para mantener la misma eficiencia de corriente.

Segundo, la eficiencia de corriente puede ser aminorada desde el incremento de separación del agua, aumentando la corriente aplicada en una proporción de flujo constante y concentración de ingreso. La eficiencia de corriente es especialmente importante con aprecio para remoción de iones débiles. No es raro operar debajo del 10% eficiencia de corriente para mejorar la remoción de Sílice, Boro, etc.,

E-cell. (Grupo de General Electric, fabricante de módulos EDI) usa un término que es una variación de eficiencia de corriente. Realmente se refieren al E-factor a lo inverso de la eficiencia de corriente fraccional. Por consiguiente, aumentando el E-factor es análogo a bajar la eficiencia de corriente.

En cualquier caso, aumentando la corriente requiere también aumentar el voltaje o disminuir la resistencia eléctrica del modulo. Aumentar el voltaje imparte varias desventajas que incluyen consumo máximo de corriente y aumento de riesgo en la seguridad. Por tanto en el diseño de los módulos EDI se reduce su resistencia.

Todos los dispositivos EDI usan resina intercambiadora de iones en las celdas de dilución, la corriente de concentrado es realmente la resistencia que limita en un módulo. Para módulos que no tienen resinas en el concentrado, la única manera de aumentar la conductividad es aumentar la conductividad del agua ya sea aumentando el recovery o inyectando Sal (NaCl) al concentrado. Además, muchos fabricantes usan recirculación de flujo del concentrado con alto recovery o inyección de sal para proveer una menor variable de concentración a lo largo de la longitud del módulo.

Hay varias desventajas en usar la recirculación del concentrado. La recirculación del concentrado requiere el uso de una bomba y equipo auxiliar adicional de control como encendido de motor y válvulas de regulación de flujo. Esto agrega complejidad al diseño de sistema y aumenta el costo global. En sistemas donde hay variaciones de operación el proceso puede hacer significativamente con mano de obra intensiva. También, al exigir operar la bomba puede ser una porción grande del consumo máximo total del sistema. Un sistema típico industrial EDI con recirculación concentrada consumiría aproximadamente 1 a 2 kilovatio-horas por mil galones de agua producto (el kWh/kgal), donde aproximadamente 0.5 kWh/kgal es exclusivamente para la bomba de la recirculación.

La inyección de sal tiene varios inconvenientes, aumentado la concentración en el flujo del concentrado:

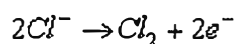
- ✧ limita la habilidad de recuperar esa corriente

- ✧ Aumenta la gradiente de concentración entre las celdas de dilución y concentrado facilitando la difusión de retorno de iones si las membranas no son idealmente selectivas permeables.
- ✧ Aumenta la posibilidad de un puente eléctrico, poniendo en cortocircuito, y
- ✧ Conduce a la formación de cloro en el ánodo cuando es alimentado con agua de recirculación del concentrado.

3.3.7 Generación de gas en el compartimiento del Electrodo

3.3.7.1 Producción de gas cloro

Normalmente la reacción al ánodo producirá la formación de oxígeno, pero con el voltaje suficiente y presencia de Ion cloruro, puede formarse el gas cloro. En particular éste es un problema en sistemas de electrodeionización donde inyectan el cloruro de sodio en la corriente del concentrado y electrodo con el fin de reducir la resistencia del módulo y mejorar su actuación. Porque muchos dispositivos EDI alimentan el agua de rechazo a las cámaras del electrodo, la inyección de sal en el concentrado incrementan la concentración de cloruro en el electrodo, tal como se muestra en la Ec. 13, el cloruro en el ánodo se convierte en gas cloro, es un oxidante fuerte y gas tóxico que pueden dañar las membranas de intercambio de iones y pueden crear un riesgo de seguridad para aquellos que se acerquen al dispositivo.



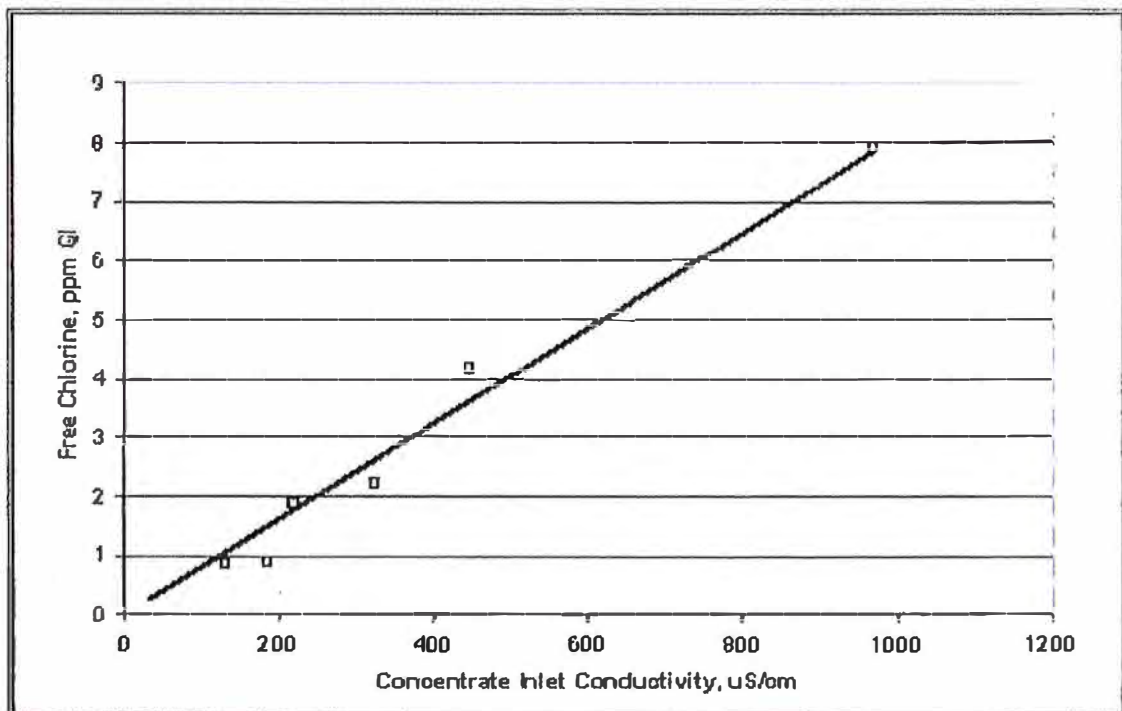
Ec. 13

Fuente :Ion pure Technology Manufacture [8]

Para Investigar la magnitud de formación del cloro, un E-cell módulo MK-1 (modelo EDI) se operó a 600 voltios DC y 3.0 amperios. La temperatura del agua de ingreso era variada entre 15 y 25oC tal que la resistencia del módulo cambió proporcionalmente. Entonces la concentración de cloruro de sodio estaba variada en la entrada de las celdas del concentrado, superar este cambio en la resistencia y

mantener 3.0 amperios. El cloro libre fue medido en el agua producto del electrodo. Tal como se muestra en la Figura 7, una cantidad importante de cloro libre fue detectada. Hubo también asfixia de cloro evidenciado por el olor cerca del dispositivo. concentraciones en el rango mostrado en la Figura 7 pueden causar daño significativo en las membranas de intercambio de iones o resinas en contacto con el flujo del electrodo. En particular éste es un problema con sistemas de electrodeionización cuya inyección de cloruro de sodio vierten en el flujo del concentrado y electrodo con el fin de la resistencia del módulo y mejorar la actuación.

Figura 8: GENERACIÓN DE CLORO EN EL ELECTRODOS DE UN MÓDULO E-CELL



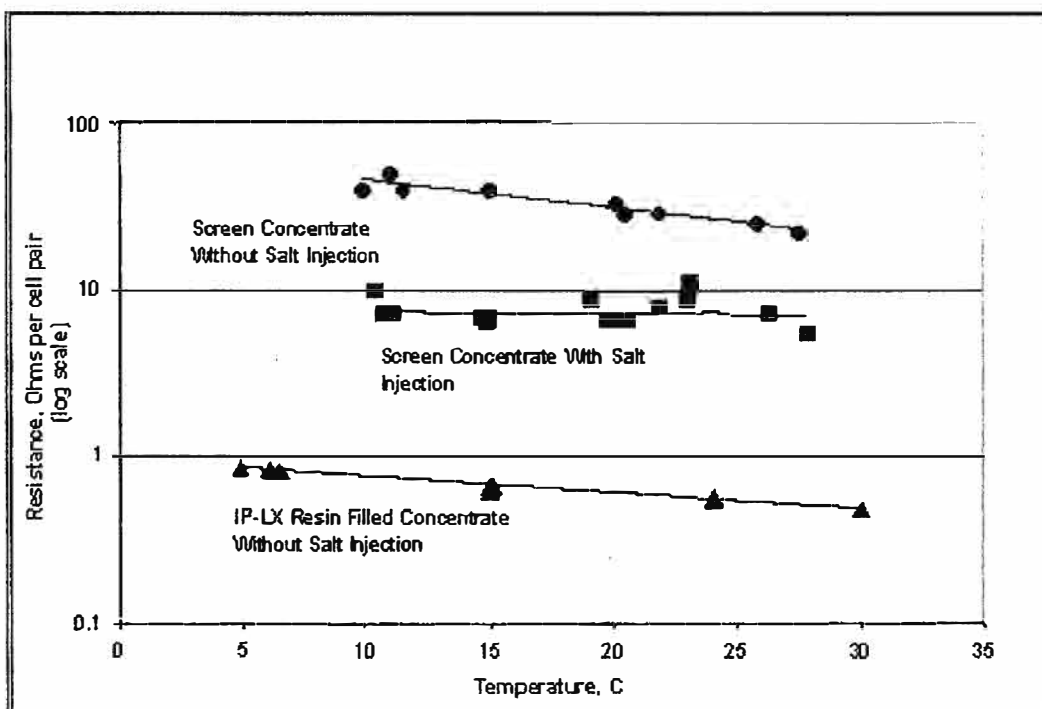
Fuente :J Gifford D. Atnor [13]

Otros sistemas no requieren de inyección de salmuera porque ellos usan un relleno de resina de intercambio de Ion en los compartimientos del concentrado para minimizar la resistencia eléctrica del módulo. Este en sí mismo limita la

posibilidad de generación del cloro en el ánodo reduciendo la concentración de cloruro. Esto es debido a que la resina en órdenes de magnitud es más conductivo que el agua producto típico de un Osmosis Inversa, este remueve la conductividad del agua como un factor de contribución en la resistencia global. Esto alivia la necesidad de inyección de sal o recirculación. Además, la producción del cloro se elimina virtualmente. Una ventaja adicional de este diseño es con la eliminación de inyección de sal y producción del cloro, el concentrado del EDI generalmente será de calidad buena que el agua cruda y puede reciclarse a menudo.

Para mostrar el efecto de relleno de resina en el concentrado, dos módulos se probaron con y sin inyección de sal bajo condiciones similares. Se muestra en la Figura 8, la resistencia por par de celda para un módulo con relleno de resina en el concentrado comparado con un módulo sin relleno de resina en el concentrado, como una función de temperatura. La resistencia eléctrica del módulo con un relleno de resina en el concentrado fue bajo por dos órdenes de magnitud.

Figura 9. EFECTO DE RELLENO DE RESINA EN EL CONCENTRADO EN LA RESISTENCIA DEL MÓDULO



Fuente :J Gifford D. Attnor [13]

3.3.7.2 Producción de gas Hidrógeno

Las personas expresan a menudo su preocupación sobre el gas hidrógeno producido en el cátodo, desde que se conoce que el hidrógeno bajo ciertas condiciones puede ser explosivo. Sin embargo, la cantidad de gas que se produce por módulo EDI es tan pequeña que no presenta un riesgo de seguridad cuando el sistema EDI se instala en una área con ventilación normal. Se requiere que los edificios tengan cambios múltiple de aire todos los días, un cambio de aire equivale a una producción de aire al volumen interno del edificio. El número de cambios de aire varía, dependiendo del uso del edificio y de los códigos locales, un valor ampliamente aceptado es la mitad un cambio de aire por hora.

Para mostrar cómo un riesgo pequeño se presenta por los gases del electrodo, realicemos un ejemplo de cálculo, se asume un módulo EDI se instalara en un cuarto de 4m x 4m x 4m que tiene ventilación normal de mitad de cambio de aire por hora. Esto es equivalente a un flujo de aire de 32 m³/h. Asumiendo que el módulo EDI está operando con un DC actual de 10 amperios, por consiguiente el hidrógeno producido a razón de 74.6 ml/min (equivalente a 0.0045 m³/h). Si todo el gas hidrógeno sale del agua y entra en el aire al cuarto, entonces la concentración resultante de hidrógeno en el aire sería aproximadamente 0.014% (el v/v), o aproximadamente 141 ppm. Esta por debajo del límite explosivo de una mezcla de hidrógeno / aire (4.2% v/v en STP) y también muy debajo de la concentración en que la asfixia puede ocurrir. Incluso no hay riesgo de seguridad con el máximo rendimiento de corriente EDI (suministro de energía DC) con tal que el edificio reúna los requisitos de ventilación

3.4 Requerimiento de alimentación al sistema EDI

Los contaminantes críticos que afectan adversamente a los sistemas EDI son:

- ✧ Oxidantes (Cloruros y ozono)
- ✧ Dureza Total (Calcio y Magnesio)

- ✧ Dióxido de Carbono (CO₂)
- ✧ Orgánicos (TOC)
- ✧ Partículas y sólidos suspendidos (SDI)
- ✧ Metales Activos (Hierro y Manganeseo)

El pre-tratamiento de diseño para el sistema Osmosis Inversa / EDI deberán contemplar quitar estos contaminantes de alimentación al sistema como sea posible. El pre-tratamiento apropiado reforzara la performance del sistema EDI, se enumeran las estrategias de pre-tratamiento adecuado para el sistema EDI:

3.4.1 Decloración

La principal causa de falla en los sistemas Osmosis Inversa (RO) y EDI es la oxidación por cloro, son causa de perforación en las membranas RO y desprendimiento de las resinas en modulo EDI cuyo resultado hace que el sistema tenga un incremento de caída de presión a lo largo del modulo.

Por tanto es importante la remoción de cloro en la alimentación del sistema con:

- ✧ Carbón activado
- ✧ Metabisulfito de sodio
- ✧ Decoloración con UV

En resumen:

- ✧ No debe haber ningún cloro perceptible en el ingreso al EDI
- ✧ El daño del cloro a los sistemas RO y EDI es irreversible
- ✧ El cloro es una causa común de fracaso en los sistemas EDI
- ✧ Tomar lecturas de Cl₂ en la entrada del RO y EDI
- ✧ El permeado del RO puede contener mas cloro libre que el ingreso del RO

3.4.2 Reducción de Dureza

La dureza puede causar incrustamiento en los sistemas RO y EDI , si esto ocurre tendrá lugar en la cámara del concentrado, se tendrá un incremento de PH en la superficie de la membranas aniónica. Esta formación de incrustación incrementa la resistencia eléctrica del modulo, así como también la caída de presión en el concentrado, reduciéndose la eficiencia de corriente. La reducción de dureza en la entrada alargara el tiempo entre limpieza del modulo.

Todos los módulos EDI toleran una dureza de ingreso de 1 ppm como CaCO_3 , algunos fabricantes recomiendan a 0.1 ppm como CaCO_3 , en algunos casos la dureza limita el recovery del sistema EDI . Si la fuente de ingreso de agua tiene poca dureza el uso de ablandador puede o no ser requerido. En caso de ser requerido se dispone de tres métodos:

3.4.2.1 Ablandador antes del Osmosis Inversa:

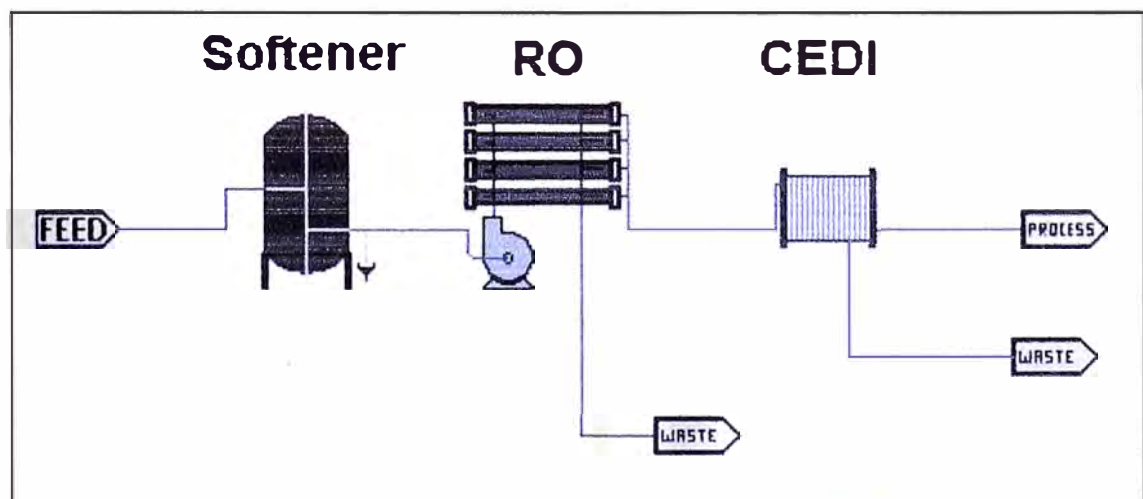


Figura 10: EQUIPO ABLANDADOR ANTES DEL OSMOSIS INVERSA

Fuente :Ionpure Technology [8]

3.4.2.2 Ablandador después del Osmosis Inversa:

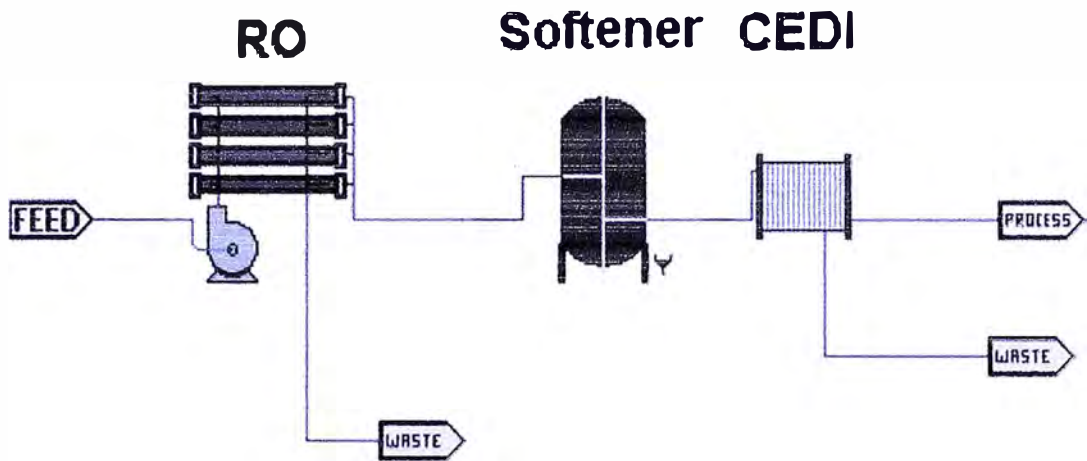


Figura 11: EQUIPO ABLANDADOR DESPUES DEL OSMOSIS INVERSA

Fuente :Ionpure Technology [8]

3.4.2.3 Uso de Anti-incrustante

El usos de químicos anti-incrustantes que eviten el incrustamiento del Calcio y Magnesio.

En resumen:

- ✧ Todos los dispositivos EDI son sensibles a la dureza, la mayoría toleran un máximo de 1 ppm como CaCO_3 , otros dispositivos pueden tolerar un máximo de 5 ppm a bajo recovery.
- ✧ Algunos recomiendan a 0.1 ppm como CaCO_3
- ✧ La dureza puede limitar el recovery del sistema
- ✧ El incrustamiento por dureza incrementa la resistencia eléctrica del modulo, reduce la calidad del agua producto, incrementa la caída de presión del rechazo y frecuencia de limpieza del modulo.

3.4.3 Reducción del Dióxido de Carbono (CO_2)

El Dióxido de Carbono esta típicamente en un estado disuelto en el agua de ingreso al sistema. Deben tomarse medidas para reducir el CO₂ de ingreso al EDI, porque es una carga iónica para el modulo. Por tanto debe ser medido y agregado a la carga iónica del permeado del RO.

Cada ppm de CO₂ como CO₂ = 2.66 μS/cm o ppm como CO₂ x 2.66 = μS/cm

3.4.3.1 Métodos de reducción:

3.4.3.1.1 Uso de soda cáustica antes del ingreso al Osmosis Inversa

Una manera de remover CO₂ es incrementar el PH antes del ingreso al RO, para convertir el CO₂ a carbonato. El carbonato es retenido por la membrana del RO y enviado al drenaje. Usualmente se requiere de un incremento de PH de 8 a 8.5

A continuación se muestra la relación de alcalinidad del bicarbonato y CO₂ en el PH (Ver figura en la Página 49)

3.4.3.1.2 Degasificación:

Otro método para reducir CO₂ disuelto es a través de la Degasificación. Hay dos métodos principales : 1) Corriente forzada 2) Uso de membrana de Degasificación. Un fabricante de módulos de membranas degasificación es Liqui Cel.

Membranas degasificadora

Es un proceso por el cual se busca eliminar casi todo el 80% del dióxido de carbono CO₂ contenido en el agua.

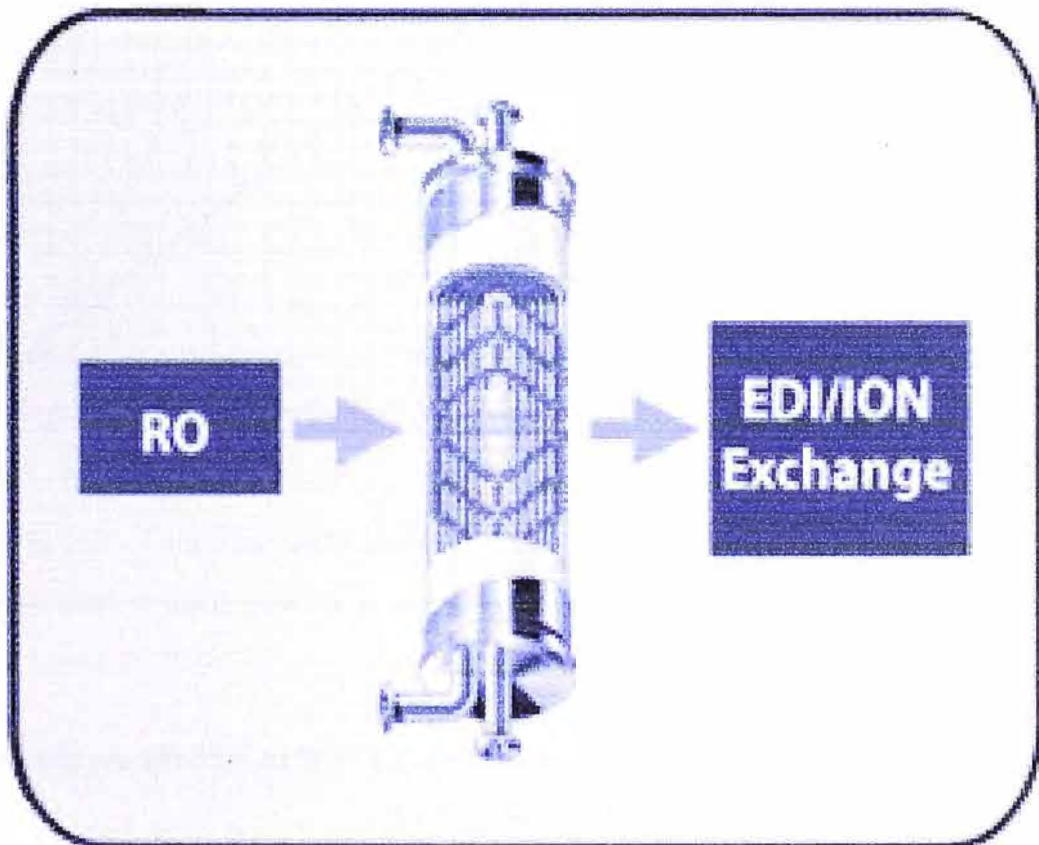
Se forma el dióxido de carbono de proceso cuando el agua que contiene sales disueltas como el bicarbonato de sodio se calienta en una caldera. Esto se ilustra

en el diagrama abajo. El dióxido de carbono disuelve en el agua condensada en los tubos; esto crea un ambiente ácido que ataca la superficie interna del tubo.

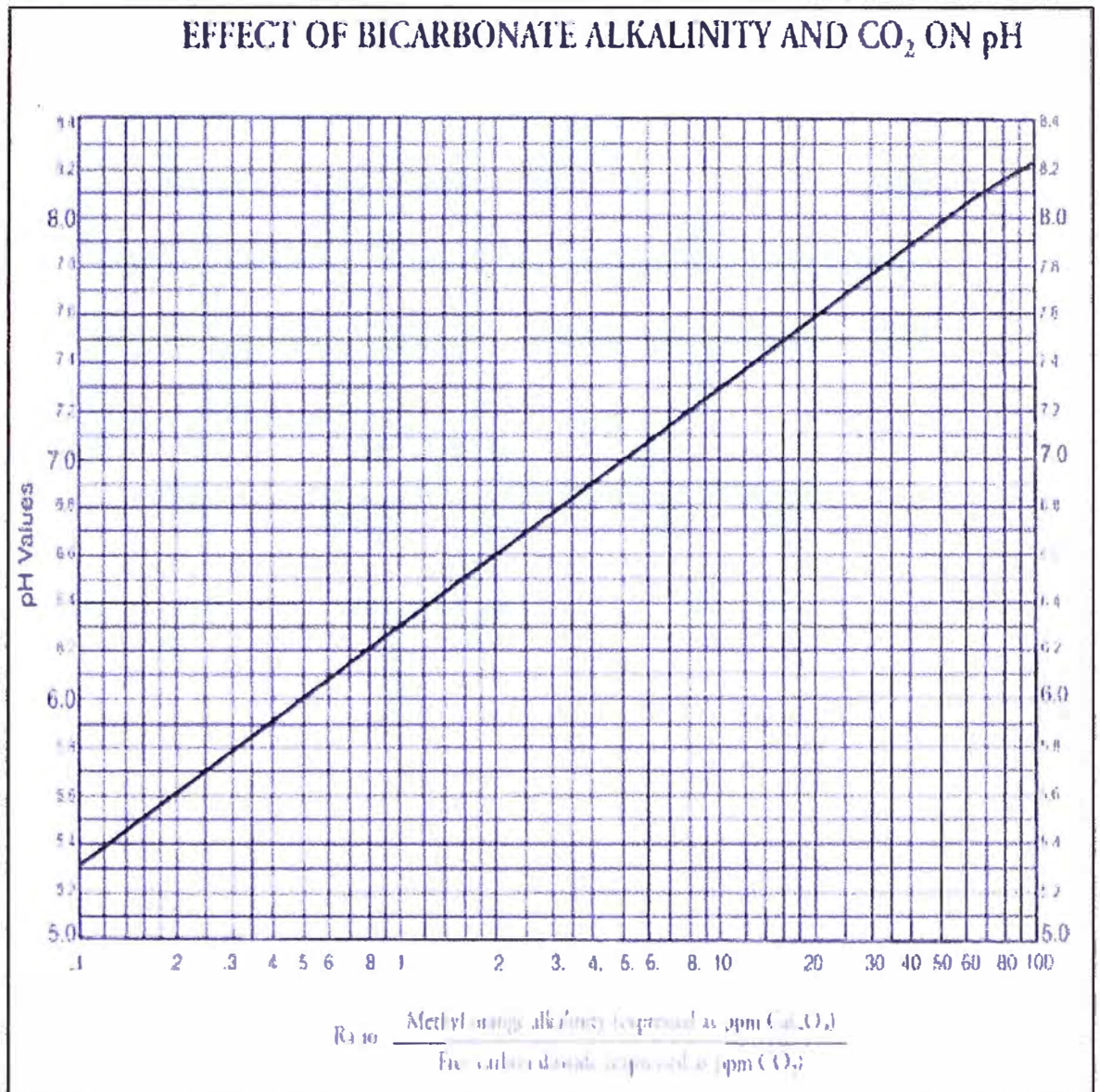
Los contactores de membrana son los únicos dispositivos que se diseñan para quitar el gas disuelto del agua. En este sistema se retira el dióxido de carbono disuelto de que están presentes en el agua.

De esta manera, se obtiene un agua pura sin gases disueltos de tal manera que no afecte el dispositivo de Electrodeionización.

Figura 13: MEMBRANA DEGASIFICADORA



Fuente : Liqui-Cel Membrane Contactor [1]



**Figura 12: RELACIÓN DE ALCALINIDAD DEL BICARBONATO
Y CO₂ EN EL PH**

Fuente :C. Griffin y T Withman [9]

En resumen:

✧ Reduzca el CO₂ disuelto que alimenta el sistema EDI tanto como sea posible.

3.4.4 Partículas, metales y TOC

El TOC son adsorbidas por las resinas de intercambio iónico y membranas iónicas, esto causa ensuciamiento de los lugares activos. El ensuciamiento de las resinas y membranas son ineficientes en remover y transportar iones. La resistencia eléctrica aumentaría. La partículas (SDI), coloides y sólidos suspendidos causan taponamiento y ensuciamiento en la cámara de la resina y membranas. El taponamiento de la resina incrementa la caída de presión a lo largo del modulo.

El Hierro y otros metales activos (Ejem. Mn) puede catalizar la oxidación de la resina, podría fuertemente y permanentemente adsorber y reducir la capacidad interna de las resinas y membranas. Esto pasa aun en sub-ppm de concentración.

3.5 Sílice y Boro

El Sílice y Boro son dos de los iones mas difíciles de remover debido a su naturaleza ionizada débil. Ambos usualmente son unos de los últimos en ser removidos y primeros iones en pasar a través del dispositivo EDI, además si el ingreso de sílice es alto puede causar incrustamiento aumentando la resistencia eléctrica, afectando la eficiencia de remoción del campo eléctrico del modulo. Como resultado la calidad del producto disminuye. A continuación se dan algunas pautas cuando el Sílice y Boro son un problema:

3.5.1 Recuperación (Recovery)

En los sistemas EDI que incluye sistemas de ablandamiento pueden usualmente operar a 95% de recovery.

En los sistemas EDI que no incluye sistemas de ablandamiento puede operar por debajo del 90% de recovery. En algunos casos el recovery podría estar limitado por la concentración de Sílice en el agua de ingreso al sistema donde el máximo recovery podría ser calculado como:

$$\text{Recovery máximo (\%)} = 100 - (4 \times \text{ppm ingreso Sílice}) \quad \text{Ec. 14}$$

Fuente :Ionpure Technology Manufacture [8]

En el campo, la concentración de sílice de ingreso al EDI puede medirse usando un equipo de prueba de Sílice.

El Equipo de prueba sugerido: Uso el kit de prueba de Sílice 0.02ppm (20ppb).

Hach Modelo #2255000

3.6 Consideración de proceso – Agua de ingreso al sistema.

3.6.1 Conductividad equivalente de ingreso de agua (FCE)

El concepto de conductividad equivalente del agua de ingreso en modulo EDI, surge de la necesidad de un método simple de estimación la cargas iónicas de los dispositivos EDI. Ciertamente la mejor manera de determinar la carga iónica es realizar un análisis del agua completo y determinar los iones y componentes ionizables, pero en algunos casos esto no es practico. Lo que frecuentemente se había sustituido por un análisis de agua completo era una medida simple de conductividad del agua de ingreso al EDI. Esto podría introducir a un error considerable, cuando una medida de conductividad no registra el valor integro de especies ionizadas débiles tales como CO₂ y SiO₂.

Por ejemplo 10 μS/cm de agua podría contener 4 ppm como NaCl o 60 ppm CO₂. Tendría un gran impacto ciclo de servicio de un demineralizador convencional, puede tener un impacto mayor en clasificar según sea el tamaño del sistema EDI.

Por esta razón nosotros hemos desarrollado el concepto EDI de ingreso de conductividad equivalente que intenta tener en cuenta los iones débiles como CO₂ y sílice.

3.6.1.1 Cálculo del FCE

- ✧ Mida la conductividad del agua de ingreso al EDI ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- ✧ Mida el ppm de CO_2
- ✧ El ppm como $\text{CO}_2 \times 2.66 = \mu\text{S}/\text{cm}$
- ✧ Mida el ppm SiO_2
- ✧ El ppm $\text{SiO}_2 \times 1.94 = \mu\text{S}/\text{cm}$
- ✧ Agregue la medida de conductividad al CO_2 & SiO_2 en $\mu\text{S}/\text{cm}$

En campo, la concentración de CO_2 de ingreso al EDI puede medirse usando un test de prueba marca Hach Modelo CA-23 (#143601). El incremento más pequeño para este equipo de prueba es de 1.25 mg/l. El agua de ingreso al EDI puede medirse la conductividad con un medidor portátil marca Mirón, modelo 4P.

Ejemplo de Cálculo FCE

- La medida de conductividad = 6 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- CO_2 medido = 5 ppm como CO_2
- SiO_2 medido = 0.5 ppm como SiO_2
- $\text{FCE} = 6 + (5 \times 2.66) + (0.5 \times 1.94) = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$

3.6.2 Voltaje DC y Amperios

- ✧ El voltaje (potencial) causa el flujo de corriente
- ✧ La corriente causa transferencia de sales y regeneración de resina,
- ✧ La cantidad de corriente requerida es proporcional al flujo de agua producto, y cantidad de sales removidas.
- ✧ Use la ley de Faraday para calcular la corriente requerida.

3.6.2.1 Calculo de Amperaje requerida

- ✧ La Ley de Faraday:
 - $I = 1.31 (Q)(\text{FCE}) / (\# \text{ celdas})(\text{Eff})$

- I = Corriente DC, amperios (por módulo)
- Q = la proporción de flujo de producto, el litros/min/modulo,
- ◇ FCE = Conductividad equivalente de ingreso $\mu\text{S/cm}$.
- ◇ Eff = Eficiencia de corriente,% (asuma 10% eficiencia de corriente)

Ejemplo de cálculo de corriente DC

- ◇ Flujo Producto = 50 lpm
- ◇ Conductividad de ingreso = $5 \mu\text{S/cm} + 3.75 \text{ ppm CO}_2$
- ◇ $\text{FCE} = 5 + (3.75 \times 2.66) = 15 \mu\text{S/cm}$
- ◇ $I = 1.31(50 \text{ lpm})(15 \mu\text{S/cm})/(24 \text{ celdas})(10\%)$
- ◇ = 4.1 amps por modulo

3.6.2.2 Establecer el amperaje DC

- ◇ Use el suministro de energía de corriente constante
- ◇ Estime el amperaje requerido por módulo
- ◇ Fijar el amperaje al valor calculado
- ◇ Ajuste el suministro de voltaje de energía para mantener la corriente
- ◇ Importante registrar (la tendencia) del voltaje y amperaje

3.6.3 Recovery (%) EDI

- ◇ $\% \text{ Recovery (R)} = (\text{QP})(100)/(\text{QP} + \text{QR})$
- ◇ QP = Flujo producto (Dilución)
- ◇ QR = Flujo de rechazo (Concentrado)

3.6.3.1 Calculo de flujo de rechazo

- ◇ $\text{Rechazo} = ((100 - R)/R) \times \text{flujo de producto}$
 - Donde R = Recovery (%)
- ◇ Ejemplo:
 - Flujo producto = $50 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Recovery = 90%

- Rechazo = $((100-90)/90) \times 50 = 5.6 \text{ m}^3/\text{h}$

3.7 Consideraciones de Proceso – Mecánica y Control

3.7.1 Curso básico de flujo

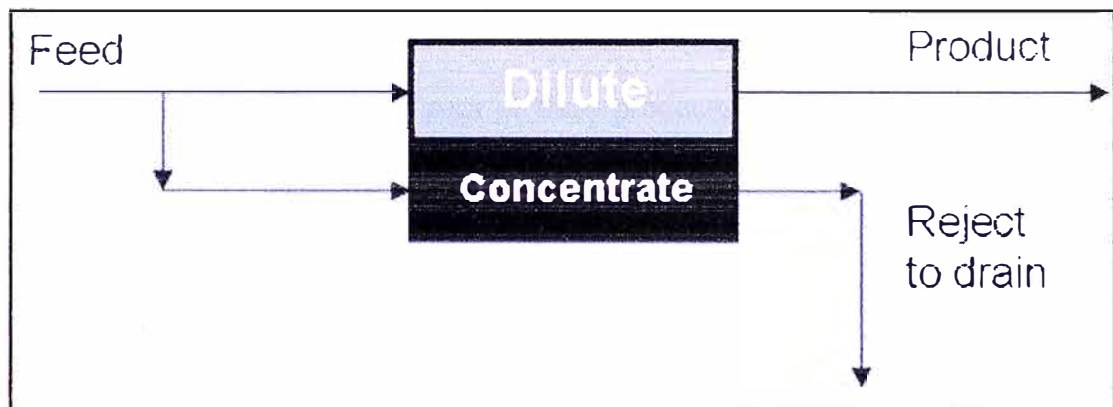


Figura 14: DILUCION Y CONCENTRADO EN EL EDI

Fuente :Ionpure Technology Manufacture [8]

El ingreso (permeado del RO) se divide en dos corrientes de entrada:

- 1) Ingreso en la dilución
- 2) Ingreso en el concentrado

Existen dos salidas:

- 1) Producto
- 2) Rechazo

Para obtener los mejores sistemas EDI tiene que ofrecer (operación consistente y continua, libre de producto químico), diseño correcto de pre-tratamiento y diseño de sistema EDI es necesario.

3.7.2 Seguridad de los sistemas EDI

Hay algunas llaves de resguardos que todo sistema EDI debe tener en el lugar para proteger los módulos EDI de operación inapropiada. Algunos son requeridos, algunos son muy recomendados.

✧ Requieren resguardo

- Alarma de bajo flujo para el flujo producto y rechazo - mostrado en la figura 14 como FE para el Elemento de Flujo y FAL (Alarma de bajo flujo)
- RO (o electro bomba que alimenta al EDI) enclavado para que el EDI " sólo opere" cuando el RO o la electro bomba de ingreso está en el funcionamiento Mostrado energía de control DC como un enclavamiento.

✧ Resguardo Opcional

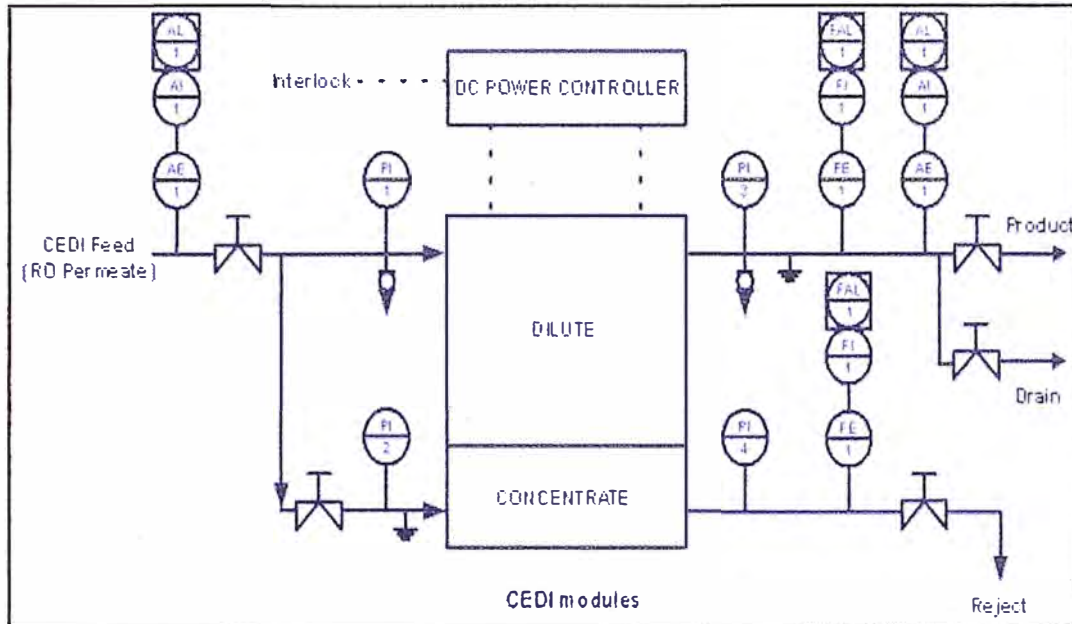
- El flujo producto desviado por válvula (Envía calidad baja de producto al drenaje).
- Alarma de baja calidad de ingreso al EDI (Protege al EDI de dureza alta o cloro /ORP), mostrado en la figura 15 como AE (Elemento del Análisis) y AL (Alarma de baja calidad).

3.7.3 Recovery

$$\text{Recovery máximo (\%)} = 100 - (4 \times \text{ppm ingreso Sílice})$$

En el campo, la concentración de sílice de ingreso al EDI puede medirse usando un equipo de prueba de Sílice.

El Equipo de prueba sugerido: Uso el kit de prueba de Sílice 0.02ppm (20ppb).
Hach Modelo #2255000

Figura 15: ALARMA Y CONTROL DEL MODULO EDI

Fuente :Ionpure Technology Manufacture [8]

3.7.4 Uso del agua de rechazo EDI

Normalmente no hay ningún problema en usar el agua de rechazo EDI para otros propósitos en planta con tal de que se envíe a un tanque de venteo atmosférico que permita el venteo de gas hidrógeno.

Hay dos problemas potenciales en reciclar el flujo de rechazo EDI como flujo de ingreso al sistema RO: Dióxido de Carbono (CO_2) e Hidrógeno (H_2).

3.7.4.1 Contenido de CO_2 en agua de rechazo EDI

El CO_2 del agua de ingreso pasará a través del sistema RO (ósmosis inversa), se removerá por el módulo EDI y transferido al flujo de rechazo EDI. Reciclando el flujo de rechazo EDI como ingreso al sistema RO producirá típicamente un incremento de tres veces (3x) en la entrada de concentración de CO_2 en modulo EDI, afectando la operación del EDI. Esto debe tenerse en cuenta al realizar la proyección de operación del EDI. El uso de degasificación o inyección de soda

cáustica como pre-RO puede prevenir el aumento a tres veces la concentración de CO_2 .

3.7.4.2 Contenido de H_2 en agua de rechazo EDI

Para prevenir el aumento de hidrógeno en rechazo EDI debe ser retornado a un tanque de venteo atmosférico. No retorne el rechazo EDI directamente en una línea presurizada.

Resumen - Uso del agua de rechazo EDI

- ✧ El electrodo del agua de rechazo contiene gases y CO_2
- ✧ Retornando el rechazo al RO incrementa al ingreso del EDI el CO_2 por 3 (si no se utiliza ninguna degasificación o inyección de NaOH antes del RO)
- ✧ Puede afectar la calidad de agua producto EDI

Otros cuidados externos hidráulicos

- ✧ Golpeteo del agua
- ✧ Operación simultánea de producto y desvío de válvulas
- ✧ Debe abrirse uno antes de cerrar otro
- ✧ Diferencial de presión entre compartimientos
- ✧ Mantener la presión ligeramente superior en el lado del producto (2-5 psi recomendado)

3.8 Factores que afectan el rendimiento del EDI

3.8.1 Voltaje

El voltaje es la tendencia de fuerza que permiten que los iones con impureza del flujo de ingreso pasen a través del flujo del concentrado. La gradiente de voltaje permiten que el H_2O se divida en iones H^+ y OH^- . La formación constante y la

concentración alta de estos iones permiten el estado de las resinas puliendo dentro del módulo EDI estar de hidrógeno lleno y forma de hidróxido, y totalmente capaz en quitar las especies débilmente ionizadas como CO₂ y sílice. Éstos también previenen el crecimiento de bacterias dentro del módulo EDI. El exceso H⁺ y OH⁻ son arrancados los iones del flujo de ingreso al flujo de concentrado que también compiten con cualquier Ion de impureza para los sitios de transporte.

3.8.1.1 Voltaje óptimo

El voltaje óptimo depende primero del número de celdas por módulo. El rango de voltaje de operación normal es aproximadamente 5 a 8 Volts/celda. El voltaje óptimo también depende de:

- ✧ La temperatura
- ✧ La conductividad del concentrado
- ✧ La proporción de flujo concentrada (Recovery).

3.8.1.2 Calidad vs. Voltaje

Hay un voltaje óptimo para lograr que el agua sea de calidad más alta. A voltajes bajos que estos, la tendencia de fuerza es inadecuada en mover los iones en la cámara purificadora por el lecho de resina y luego por las membranas antes de las salidas de flujo producto del módulo. A voltajes superior que el óptimo, el sobre-voltaje crea fraccionamiento del agua de exceso y por consiguiente corriente en exceso, y también causa la polarización de Ion de esta manera se tiene el retorno de difusión que baja la resistividad del agua producto.

Dentro del rango puesto para cada tipo del módulo, el voltaje óptimo depende de la carga del ión y de la proporción de recovery del agua. A una Superior carga de Ion en el ingreso y superior proporción de recovery lleva a una concentración de ión superior en las cámaras del concentrado que baja la resistencia del módulo a lo más bajo resistencia de pila a un más bajo voltaje óptimo.

3.8.2 Corriente vs. Conductividad de ingreso

La corriente típica trazada para un módulo EDI al voltaje nominal es de 2-4 amperios con una conductividad de ingreso de 4-10 uS/cm. la Corriente puede ser tan baja como 1 amperio o menos. Corriente en altas conductividades de ingreso (20-30 uS/cm) llevara a la altas corrientes de 8 amps, superiores. Fundamentalmente, la corriente es proporcional al número total de iones movidos. Estos iones incluyen los iones de impureza del permeado del RO, como Na^+ y Cl^- , y iones causados por el fraccionamiento de agua, H^+ y OH^- . La proporción de fraccionamiento del agua depende de la gradiente de voltaje local, para que voltajes superiores a lo largo de la cámara de resina lleven cantidades superiores de H^+ y OH^- en ser movidos.

Una porción de la corriente es entonces directamente proporcional al contenido de iones de ingreso (TDS, o uS/cm). La otra porción de corriente, es proporcional al fraccionamiento del agua, aumenta non-linealmente con el sobre-voltaje. La eficiencia de corriente es la fracción de la corriente total que es requerido para mover los iones de impureza de ingreso al EDI.

Si la corriente del módulo es superior al esperado, podría ser porque el voltaje es superior al fijo óptimo, y el exceso de fraccionamiento del agua resulta del exceso de corriente.

La corriente también depende del flujo del concentrado, y por consiguiente en la recuperación de agua del módulo. El flujo del concentrado nominal es 10% del flujo del ingreso. Si el flujo del concentrado es más bajo que recomendado, el concentrado será más conductivo y la corriente aumentará.

3.8.3 Estado de operación continua

Normalmente un módulo EDI comenzará con agua producto de calidad alta. Esto es porque el módulo EDI tiene exceso de resinas de lecho mixto de intercambio iónico en este el H^+ y OH^- forma una sección de pulido.

Sin embargo, después de que las condiciones de operación han cambiado, un módulo tomará entre 8 y 24 horas para alcanzar un nuevo estado estable. El verdadero estado estable está definido en alcanzar un equilibrio de masa en los iones de entrada y salida del módulo. En la condición estable, la cinética de migración del Ion igualado con la proporción de Ion de ingreso. El estado estable para el trazo de iones como sílice puede llevarse de largo como 2-4 semanas.

Si el voltaje es bajo o la carga del ión es aumentado, las resinas de intercambio iónico inferior empezarán en adsorber los iones del exceso. En esta condición, menos iones dejan que el módulo entre. Eventualmente un nuevo estado estable es alcanzado. Durante este tiempo, el frente del Ion activo progresa en el lecho de resina cerca del fondo del módulo hacia arriba.

Si el voltaje es elevado o la carga del ión se baja, las resinas perderán algunos de sus iones de exceso en el flujo del concentrado, y más iones estarán terminando el módulo que entre en él. Durante este tiempo, la situación del frente del Ion activo crece más mas cerca a la entrada del módulo. Este último es el mecanismo de procedimiento de regeneración.

Un equilibrio del Ion hecho en el modulo(s) durante la operación es una herramienta valiosa en determinar si el sistema EDI está operando en estado estable.

En estado estable: Iónes totales de salida = Iónes totales de entrada

Módulo relleno de iones: Iónes totales de salida < Iónes totales de entrada

Módulo que recupera la carga excesiva (sobrecargas): Iónes totales de salida > Iónes totales de entrada

3.8.4 Especies Iónicas

La habilidad del EDI de remover iones de un flujo depende en parte de las propiedades de las especies iónicas. En un lecho de resina estándar, la fuerza de adsorción y cinética dependen del tamaño iónico, el grado de hidratación, y el tipo de resina.

En el EDI, la carga iónica es aún mas importante que esto es la tendencia de fuerza a mover los iones a lo largo de las superficies de la resina a la membrana, y a través de él.

3.8.4.1 Tamaño iónico

Los siguientes tamaños iónicos son los tamaños efectivos en solución acuosa a 25°C. Estos tamaños incluyen la completa hidratación. Mientras mayor sea el tamaño efectivo más lento es la razón de difusión de iones mayores y son menos adecuadamente removidos por EDI. Mientras mayor sea el tamaño efectivo, más distribuido es la carga y menos adecuadamente adsorbido por la resina.

Tabla 1: TAMAÑO DE LOS IONES

Radio Iónico	Catión	Anión
< 3.0	$\text{NH}_4^+, \text{K}^+$	$\text{Cl}^-, \text{NO}_3^-$
3.5		OH^-, F^-
4.0-4.5	Na^+	$\text{SO}_4^{-2}, \text{CO}_3^{-2}$
6.0	$\text{Li}^+, \text{Ca}^{+2}, \text{Fe}^{+2}$	
8.0-9.0	$\text{H}^+ \text{Mg}^{+2}, \text{Fe}^{+3}$	

Fuente :Ionpure Technology Manufacture [8]

3.8.4.2 La carga iónica

Mientras mas alta sea la carga iónica más fuerte es el voltaje aplicado que permitirá pasar el Ion a través de la membrana. Esto se contrapesa por los grados superiores de hidratación y moléculas más grandes, más pesadas cuya difusión es lenta.

3.8.5 Coeficientes de selectividad de Iones para la resina

La tabla 2 muestra la selectividad, de iones diferentes para la resina. Esto es una medida de fuerza de adsorción a la resina. La adsorción fuerte significa baja fuga a través de un lecho de resina o módulo EDI.

Tabla 2: COEFICIENTE DE SELECTIVIDAD

Catión	Coefficiente de selectividad	Anión	Coefficiente de selectividad
Li ⁺	0.8	HSiO ₃ ⁻	
H ⁺	1.0	F ⁻	0.1
Mg ⁺²	1.2	HCO ₃ ⁻	0.5
Na ⁺	1.6	OH ⁻	0.6
Ca ⁺²	1.85	Cl ⁻	1.0
NH ₄ ⁺	2.0	NO ₃ ⁻	3.3
K ⁺	2.3	I ⁻	7.3

Fuente :Ionpure Technology Manufacture [8]

3.8.6 Iones fáciles (Na⁺, Cl⁻, Ca⁺², H⁺, y OH⁻)

El Sodio (Na⁺), Cloruro (Cl⁻), Calcio (Ca⁺²), Hidrógeno (H⁺), e Hidróxido (OH⁻) es considerado iones fáciles para el EDI. Todos estos iones son bien adsorbidos por la resina y tienen un cargo definida y difícil de polarizar. Estos iones son bastante fáciles de remover " sección activa" del módulo EDI.

3.8.7 Iones grandes, Iones con carga débil (Dióxido de carbono, Sílice y Boro)

El Dióxido de carbono (CO₂), Sílice (SiO₂), y Boro (H₃BO₃) tienen carga aniónica débil bajo el funcionamiento normal y pH. Debido a esto, ellos son

débilmente adsorbidas por las resinas y el voltaje aplicado tiene la tendencia de fuerza pequeña.

Para remover eficazmente estos iones, se usan otras estrategias del sistema.

- ✧ Minimice el contenido iónico de ingreso
- ✧ Minimice el CO₂ en el ingreso
- ✧ Aumente la remoción de Sílice y Boro por RO

Si la carga iónica total del EDI se baja, la sección activa del módulo será pequeña, y la sección de pulido relativamente será más grande. La sección de pulido más grande ayudará a la remoción dura para remover iones.

El CO₂ puede ser removido por el RO, si el pH de ingreso es aumentado (el pK1 de ácido carbónico (H₂CO₃) es 6.35), con el pH ligeramente alto, el Ion Bicarbonato puede ser removido, primeramente los cationes de dureza (Ca⁺², Mg⁺²) debe removerse para operar el RO a pH alto. Luego el CO₂ puede removerse como un gas después del RO (vea Liqui-Cel®) que se ayuda con el pH bajo (así el CO₂ no este en forma iónica). El pK1 de ácido silícico (H₂SiO₃) es 9.77. El pK1 del ácido orto-borico (H₃BO₃) es 9.28. sólo con el pH > 10 pueden el Sílice y Boro ser removidos eficazmente.

Aumentando el pH de ingreso al EDI es lo opuesto productivo. Desde los iones Na⁺ y OH⁻ son "iones fáciles" de remover, la adición de NaOH antes del EDI levanta la carga del Ion simplemente para la sección activa del EDI, y el pH retorna a 7.0 a finales de la sección activa. Adicionalmente el tamaño de la sección pulidora es ahora menor.

3.8.8 Temperatura

La caída de presión depende principalmente de la temperatura debido al efecto de la viscosidad del agua. La tabla 3 muestra la viscosidad absoluta del agua (Cp) a temperatura de interés y viscosidad relativa (basado a 25oC). La caída de presión

aumentará o disminuirá proporcionalmente a la viscosidad. Nótese a 5°C la viscosidad de agua es superior a 70% que 25°C.

Tabla 3: RELACION DE LA TEMPERATURA Y VISCOSIDAD

Temperatura	Viscosidad Relativa	Viscosidad Absoluta (Cp)
5°C (41°F)	+70%	1.51
15°C (59°F)	+28%	1.14
20°C (68°F)	+12%	1.00
25°C (77°F)		0.89
30°C (86°F)	-10%	0.80
35°C (95°F)	-19%	0.72

Fuente :lonpure Technology Manufacture [8]

3.8.8.1 La resistencia de los electrodos contra la Temperatura

Como la temperatura aumenta, la resistencia de los electrodos disminuirá. A un voltaje dado, la corriente aumentará. Una causa de este fenómeno es el incremento de iones activos a temperaturas superiores. Todas las otras cosas que son iguales, la resistencia de los electrodos cambiará aprox. 2% por 1oC.

La optimización de calidad dependerá de otros factores (indicado en líneas abajo), donde el escenario óptimo de voltaje cambie con la temperatura.

3.8.8.2 Calidad vs. Temperatura (re-optimización en condiciones de operación)

Hay una temperatura óptima de operación. Como los aumentos de temperatura a 35oC, la calidad del producto aumentaría generalmente debido a que los iones son más fáciles de mover. Superior a esta temperatura, la calidad disminuirá debido al aumento de fuga de iones. Esto es causado por la baja adsorción de los iones internos de las resinas intercambiadores de iones. Además, el aumento de la

resistividad iónica real, descompensada por la temperatura habrá menos exactitud en la lectura

- ✧ A bajo voltaje se requiere altas temperaturas para mover los iones en el concentrado.

La disminuciones de temperatura a 15°C, la calidad del producto puede disminuir. Algo de esto es debido a los errores en la medida de resistividad con la compensación de temperatura; alguna mejora es debido a la mayor adsorción de los iones internos de la resina intercambiadora de iones. Como la temperatura decrece mas distantesmente, la activación de difusión a través de la membrana se pondrá más grande y la calidad disminuirá.

- ✧ A bajas temperaturas, un alto voltaje se necesita para continuar eficientemente la descomposición del agua, y mover los iones lentos más rápidamente.

3.8.8.3 La Corrección de medida de resistividad con la temperatura

La medida de la resistividad cambia fuertemente con la temperatura, y normalmente se corrige a temperatura estándar (25°C). Los iones de impureza en el agua tienen una conductancia eléctrica superior a las temperaturas superiores porque los iones son más móviles. Semejantemente, el agua ultra pura tiene una baja resistencia eléctrica y la temperatura se eleva para que sea mas la disociación del H^+ y OH^- .

- ✧ La corrección de la temperatura en metros es grande, y está sujeto a errores. Un metro de resistividad de calidad alta se recomienda.

La corrección de conductividad con la temperatura para el agua de caño y permeado del RO es aproximadamente 2%/°C. La corrección de resistividad con la temperatura para agua ultra pura es 5-7%/°C. En ambos casos la corrección de temperatura es grande y grandes errores podrían ser introducidas. La compensación de temperatura exacta se pone más importante cuando la temperatura de trabajo son diferentes de 25°C

Tabla 4: RELACION DE LA TEMPERATURA Y RESISTIVIDAD

Temperatura, °C	Descompensación de resistividad, Megohm.cm
15	31.8
25	18.2
35	11.1

Fuente :lonpure Technology Manufacture [8]

3.8.9 Flujo

3.8.9.1 Caída de presión vs. Flujo

Hay dos o tres caídas de presión del módulo a considerar, dependiendo de la construcción del módulo:

- 1) Alimentación para agua producto.
- 2) Ingreso y salida de agua en concentrado.
- 3) Entrada y salida del electrolito (no presente en todos los sistemas).

La caída de presión aumentará en cada uno de estos flujos, como el flujo para cada uno es aumentado. La caída de presión está definida como la medida de entrada y salida al módulo.

3.8.9.1.1 Caída de presión del electrolito

A 0.05 gpm (10 lph) la caída de presión será aproximadamente 20 psi (1.4 barra). Si la caída de presión sube por encima de esto , entonces la entrada puede ser ensuciado y bloqueado con incrustaciones. El agua de ingreso debe filtrarse finamente. Este flujo deberá ser independiente del tamaño del módulo y del número de celdas desde que hay un sólo ánodo / cátodo por módulo.

3.8.9.1.2 Caída de presión en el concentrado

El flujo concentrado será diferente para cada diseño, para cada operación, y para cada modelo EDI. Típicamente, el concentrado de salida de flujo se pondrá entre 5% y 10% del flujo producto EDI.

Si la caída de presión incrementa durante su operación, puede necesitar limpieza o puede tener escombros o incrustamiento en la entrada del concentrado. El agua de entrada debe filtrarse finamente (efluente de RO).

3.8.9.1.3 Caída de presión de ingreso - producto

La caída de presión de ingreso-producto aumenta con el flujo. La caída de presión está cerca de ser lineal (primer orden) con el flujo; es decir, dos veces el flujo causará caída de presión dos veces.

Para un nuevo módulo, la caída de presión típica será por debajo de 10 psi (0.7 bar) a rango inferior de flujo o tan alto como 60 psi (3.4 bar) a rango superior de flujo.

- ✧ La caída de presión cambiará dramáticamente cuando la temperatura del agua varía de 25oC.
- ✧ Puede haber pérdida de presión sustancial en las líneas del Manifold, válvulas, flujómetros, válvulas solenoide, codos, y tees.

3.8.9.2 El efecto de la calidad de presión de salida y fuga interna

Todos los módulos de plato-y-marco son sellados con empaquetaduras interiores, habrá alguna fuga interna. En módulo EDI, las fugas del concentrado serán dentro del flujo producto entonces la resistividad del producto sufrirá.

- ✧ La presión de salida del producto debe ser mayor que la presión de salida del concentrado.

Asegurar la fuga interior que no impacta la calidad del producto, la salida del producto debe tener una presión superior que el concentrado o el flujo de salida

del electrolito. Esta manera, cualquier fuga interna no agregará iones al flujo del producto.

Para sistema más simple y más fácil, no debe haber ninguna presión de retorno aplicada al flujo de salida del concentrado. En sistemas con válvulas de control manual de presión de retorno de concentrado, el resultado es a menudo complicado, puede ocurrir un error del operador.

Para enviar flujo de concentrado a la entrada RO, en la salida es enviado a un tanque luego será bombeado al sistema de pre-tratamiento antes del ingreso al RO. Cuando esto se hace, el módulo EDI puede acercarse a un 99% recuperación.

3.8.10 Conductividad de ingreso

3.8.10.1 La Calidad del producto (diseño y flujo máximo):

La calidad del producto depende de la habilidad del módulo de remover los iones de la cámara purificadora antes que salgan del módulo. Más iones de agua de ingreso producirá baja calidad de agua producto. Esto es en verdad para ambos conductividad iónica general (NaCl) y iones débiles (Sílice, Boro, y Bicarbonato). Adicionalmente si adicionamos una carga iónica tiene dos resultados.

La primera deterioración de calidad ocurre en la más baja remoción de especies cargadas débiles.

✧ Reduciendo la conductividad de ingreso ayuda a mejoran la remoción de sílice y CO₂.

El segundo resultado es que la corriente del módulo traza con los aumentos de conductividad de ingreso. Moviendo más iones toma más electrones. El incremento de la corriente no es lineal porque la corriente que también mueve el agua ha sido descompuesta.

✧ El aumento de la conductividad de ingreso aumenta la corriente.

3.9. Limpieza y Sanitización del modulo EDI

3.9.1 El propósito de la limpieza del modulo EDI

- ✧ Mejorar la calidad del agua
- ✧ Mejorar la caída de presión y flujo

3.9.2 Cuando se debe limpiar?

- ✧ La calidad del agua producto se reduce (esta fuera de especificación del cliente).
- ✧ Reduce el flujo de agua producto
- ✧ Reduce el flujo del concentrado
- ✧ Cuando se incrementa en un 50% la caída de presión sin ningún cambio de temperatura o flujo
- ✧ Cuando se incrementa en un 25% la resistencia eléctrica (Ohms) sin ningún cambio de temperatura de ingreso.

3.9.3 Químicos usados en la limpieza

- ✧ Ácido Clorhídrico
 - Uso de limpieza
 - Remueve incrustación de Calcio y óxidos de metales.
- ✧ Cloruro de sodio / Hidróxido de Sodio
 - Uso de limpieza
 - Remueve ensuciamiento de orgánicos en resinas y membrana
- ✧ Hidróxido de Sodio
 - Limpieza y sanitización
 - Remueve biofilm y sílice

IV SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA POR ELECTRODEIONIZACION

4.1 Caso: Central Termoeléctrica – Calidad de agua para lavado de compresores en línea:

Se tiene el caso de una central termo-eléctrica, requiere una calidad de agua ultra-pura para que pueda ser usado en el lavado de compresores en línea:

Los parámetros requeridos de calidad de agua son:

Parámetros	Valor Requerido
Caudal Requerido	0.5 GPM
Aspecto	Limpia
Sabor	Insípido
Olor	Inodoro
PH	6-8
Conductividad (US/cm)	< 0.5 @ 25 °C
Sílice (mg SiO ₂ /L)	< 0.5 ppm

Tabla 5: PARÁMETROS REQUERIDOS DE CALIDAD DE AGUA POR EL
CLIENTE

4.2 Análisis del agua fuente:

4.2.1 Parámetros de Calidad de agua fuente:

Parámetros (mg Ion / lts)	Valor diseño
Origen	POZO
Aspecto	Limpia
Sabor	Insípido
Olor	Inodoro

Parámetros (mg Ion / lts)	Valor diseño
pH	6.4
Turbidez (NTU)	< 1
Cloruros	1
Nitratos	< 0.1
Amoníaco	0.04
Calcio	20.26
Magnesio	2.514
HCO ₃	69
Hierro	0.053
Manganeso	0.002
Sílice	21.2
Cobre	<0.010
Estroncio	0.162
Bario	0.032
Sulfatos	0.8
Fluor	0.07
Potasio	2.59
Sodio	4.72
Sólidos Totales Disueltos	< 150 *
Rango de temperatura (supuesto)	20-40° C

Tabla 6: PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA FUENTE

NOTA:

**Tomar en consideración que valores mayores a estos pueden aumentar el TDS del Agua producto o requerir de una mayor presión en la línea de agua bruta.*

4.3 Selección de equipos de tratamiento de agua:

Debido a que la procedencia del agua es de pozo, se debe tener en cuenta la presencia de materia orgánica, dureza, sílice, potasio, sulfatos, de acuerdo a los datos proporcionados por el cliente se diseñara un sistema que permita tener la calidad de agua requerida para el lavado de compresores en línea.

Dado que el sistema de tratamiento de agua será ubicado en la selva, no requieren de uso de químico debido a que son controlados y estos necesitan de documentación para que puedan ser utilizados y transportados en la selva.

El sistema se va a diseñar sin el uso de químicos controlados por el estado, como Soda Cáustica, Metabisulfito de sodio, Ácido clorhídrico, etc.

El sistema de tratamiento de agua consta de lo siguiente:

4.3.1 Etapa de pre-tratamiento

- Filtro Multimedia (reducción hasta 10 micras)
- Filtro de Carbón Activado (reducción de materia orgánica)
- Equipo Ablandador Twin (reducción de dureza total del agua fuente)
- Filtro pulidor de 5 micras
- Equipo Ultravioleta

4.3.2 Etapa de tratamiento

- Equipo de Osmosis Inversa

4.3.3 Etapa de post-tratamiento

- 3.1 Equipo Degasificador
- 3.2 Equipo Electrodeionización Continua

4.3.4 Unidad de recirculación de agua y distribución a punto de uso

- 4.1 Equipo Deionización de lecho mixto
- 4.2 Equipo Ultravioleta

4.4 Selección del equipo de Electrodeionización – Datos estimados

4.4.1 Unidad de Electrodeionización EDI

Esta unidad se encarga de la purificación final del agua proveniente del sistema de Osmosis Inversa y que pasa a través del degasificador.

Recibe el agua producto que debe ser dividida en dos corrientes:

- Una como ingreso de flujo de alimentación del EDI
- El otro como ingreso de flujo de concentrado

En el interior se establece un campo magnético que remueve los iones del flujo de alimentación. Este campo formado al energizar el cátodo y el ánodo del EDI con corriente continua, estando el cátodo con polaridad negativo (-) y el ánodo con polaridad positiva (+).

El ánodo atrae todos los iones negativos o aniones del agua de alimentación a través de las membranas aniónicas contenidas dentro del EDI ingresándolas a la corriente de reyección.

El cátodo atrae todos los iones positivos o cationes del agua de alimentación a través de las membranas catiónicas contenidas dentro del EDI ingresándolas a la corriente de reyección, Datos de diseño del equipo de Electrodeionización:

Especificaciones del módulo	
Flujo Producto, mínimo gpm (lph)	0.27 (62.5)
Flujo Producto, nominal gpm (lph)	0.55 (125)
Flujo Producto, máximo gpm (lph)	0.825 (187)
Peso: transporte, lbs. (kg)	25 (11)
Peso: Operación, lbs. (kg)	27 (12)
Parámetros de operación	
Recuperación típica (%)	90-95
Presión nominal de alimentación, psi (bar)	75 (5)
Caida de presión nominal, psi (bar)	10-20 (0.7-1.4)
Temperatura máxima de presión	113 °F (45° C)
Voltaje DC	0-600

Tabla 7: ESPECIFICACIONES DEL MODULO EDI

4.4.2 Calidad de agua tratada

Parámetros	Valor Requerido
Aspecto	Limpia
Sabor	Insípido
Olor	Inodoro
PH	6 – 7
Conductividad (US/cm)	< 0.0065 @ 25 °C
Sílice (mg SiO ₂ /L)	< 5 ppb

Tabla 8: CALIDAD DE AGUA TRATADA

Fuente: Datos proporcionados por el cliente

4.5 Diagrama del sistema de tratamiento

(Ver apéndice)

V. RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE LA PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA

5.1 Datos operacionales del sistema de tratamiento de agua seleccionado:

Descripción	Medidas
Filtro Multimedia:	
Presión de ingreso (PSI)	40
Presión de salida (PSI)	36
Osmosis Inversa	
Presión ingreso filtro 5 micras (PSI)	36
Presión de salida filtro 5 micras (PSI)	33
Presión de Bomba de alta RO (PSI)	250
Presión de ingreso membrana (PSI)	120
Presión de concentrado (PSI)	105
Caudal de Agua producto (GPM)	1.75
Caudal de Agua Rechazo (GPM)	0.9
Caudal de Recirculación (GPM)	3
Equipo Degasificador	
Flujo de aire (SCFM)	3.6
Presión de ingreso de aire (PSI)	6.5
Presión de línea de mando neumático (PSI)	50
Equipo de Electrodeionización (EDI)	
Flujo de agua producto (GPM)	0.5
Flujo de agua rechazo (GPM)	0.2
Presión de ingreso producto (PSI)	16
Presión de salida producto (PSI)	17
Presión de ingreso rechazo (PSI)	3
Presión de salida rechazo (PSI)	2
Voltaje (V)	130
Amperaje (Amp)	0.6
Sistema de Recirculación	
Presión de ingreso filtro 1 micra (PSI)	44
Presión de salida filtro 1 micra (PSI)	40
Presión ingreso filtro 0.45 micras (PSI)	40
Presión salida filtro 0.45 micras (PSI)	36

Panel de control de conductividad	
Conductividad de ingreso RO (US/cm)	133.1
Conductividad de ingreso EDI (US/cm)	7.32
Conductividad de salida del EDI (US/cm)	0.006
Conductividad de recirculación (US/cm)	0.006
Panel de control de PH	
Salida del degasificador	6.9
Salida del lecho mixto	7.1

Tabla 9 : PARAMETROS OBTENIDOS LUEGO DE LA PUESTA EN MARCHA DE LOS EQUIPOS

Fuente: Datos proporcionados por el cliente

Luego de la puesta en marcha del sistema de tratamiento de agua se puede observar que la conductividad de ingreso al equipo de osmosis inversa es de 133.1 US/cm , la conductividad del agua producto es de 7.32 US/cm que ingresa al equipo degasificador, a través de un compresor de aire ingresa aire en sentido contrario al flujo del agua para remover CO₂ se puede apreciar que el PH en la salida del degasificador es 6.9.

La conductividad de ingreso al sistema de Electrodeionización es de 7.32 US/cm , la salida del agua producto del EDI es de 0.006 US/cm, luego es enviado al sistema de recirculación para mantener el agua en condiciones favorables cuando no es utilizado, la conductividad en el sistema de recirculación es de 0.006 US/cm ye esta conformado por un filtro de resinas de lecho mixto intercambiable, también equipo UV y filtros pulidores de 1 y 0.45 micras. Cuando el filtro de resina mixta estén saturado las resinas se retorna a Lima para su regeneración, de igual forma se hace con las membranas del equipo de osmosis inversa y con el modulo EDI evitándose en cualquier momento el uso de químicos en planta de agua.

5.2 Resultado obtenido de calidad de agua

De acuerdo a los datos obtenidos se tiene que la calidad del agua requerida por el cliente supera enormemente la exigencia de conductividad y sílice.

Parámetros	Valor Requerido
Aspecto	Limpia
Sabor	Insípido
Olor	Inodoro
PH	6 – 7
Conductividad (US/cm)	< 0.006 @ 25 °C
Sílice (mg SiO ₂ /L)	< 5 ppb

Tabla 10: RESULTADOS OBTENIDOS DE CALIDAD DE AGUA

Fuente: Datos proporcionados por el cliente

VI CONCLUSIONES

1. Los sistemas EDI son mas sensibles a Cloro que las membranas de Osmosis.
2. Los sistemas EDI al trabajar con altos niveles de recovery necesita muy bajos niveles de Dureza;
3. Todos los dispositivos EDI son sensibles a la dureza, la mayoría toleran un máximo de 1 ppm como CaCO_3 , otros dispositivos pueden tolerar un máximo de 5 ppm a bajo recovery., algunos recomiendan a 0.1 ppm como CaCO_3 ,
4. El incrustamiento por dureza incrementa la resistencia eléctrica del modulo, reduce la calidad del agua producto, incrementa la caída de presión del rechazo y aumenta la frecuencia de limpieza del modulo.
5. Altos niveles de Fe y Mn pueden ser removidos por la resina pero pueden causar problemas en el EDI, por que ellos son fuertemente sujetado por la resina y pueden oxidar y precipitar en la resina antes de que ellos pueden ser transferidos hacia el concentrado
6. Temperaturas mayores a 35°C no son restricciones de la resina sino de los materiales plásticos con lo que se construyen la unidades EDI;
7. Temperaturas menores a 10°C disminuyen la eficiencia de remoción de Sílice;
8. EDI puede trabajar OUTDOOR siempre y cuando sea protegido de la humedad, altas temperaturas u otros elementos naturales (lluvia, neblina, nieve, etc);
9. El pH debe ser ajustado antes del RO con Soda Cáustica;
10. Vida Util Típica de los “Celdas” en operación continua es de 3-5 años llegando inclusive hasta 10 años;

Principales características

1. EDI trabaja en forma continua;
2. Remueve materiales ionizables;
3. Resina son regeneradas con electricidad;
4. Es bacteriostático;
5. Remueve TOC;
6. Unidades compactas;

Ventajas

La diferencia mas grande es que la electrodeionización continua elimina toda regeneración química. El costo de inversión de un equipo EDI puede ser superior con sistemas continuos de desionización, pero los gastos operativos son sumamente inferiores porque no hay productos químicos de regeneración, neutralización y los trabajos de mantenimiento es mucho menor.

Los requisitos nominales de un sistema típico de electrodeionización continua usa un kilovatio-hora (KwH) de electricidad para deionizar 1,000 galones, basados en un ingreso de 50 micromhos/cm y un resistividad de agua producto de 10 megohm-cm.

Los sistemas continuos de electrodeionización no requieren un sistema duplex (dos unidades de tratamiento) que puede aumentar el costo y tamaño del sistema.

En ambos casos los sistemas de ionización y electrodeionización continua pueden requerir agua pre-tratada para impedir problemas de incrustaciones, depósitos coloidales y partículas. En el pre-tratamiento se reducen niveles altos de cloro residual y materia orgánica. El tipo de pre-tratamiento requerido es determinado por requisitos de calidad de agua del producto. Para la obtención de agua ultra pura un pre-tratamiento de Osmosis Inversa (RO) es requerido.

Con el pre-tratamiento de RO, los sistemas continuos de electrodeionización pueden lograr mejor un 99.5 por ciento de sales disueltas, pueden reducir los

niveles de iones individuales a partes por el billón, inclusive a partes por trillon, produciendo una calidad de agua pura de resistividad de 10 a 18 megohm-cm (o conductividad de 0.1 a 0.055 micromho/cm).

Los sistemas continuos de electrodeionización típicamente convierten del 80 a 95 por ciento del agua de alimentación en agua producto. La corriente de rechazo o concentrado permiten tener valores de concentración de 20 a 50 veces del agua de ingreso por tanto puede ser descargada sin tratamiento o puede ser recircularse a la unidad de pre-tratamiento RO.

Algunas de las ventajas de la EDI frente a los sistemas convencionales de intercambio iónico son:

- Operación simple y continua
- El uso de productos químicos de regeneración es totalmente eliminado
- Operación y mantenimiento económicos
- Bajo consumo energético
- Requiere muy pocas válvulas automáticas o secuencias complejas de control que puedan necesitar de la atención de un operador
- Ocupa menos espacio
- Produce calidad constante de agua sin fluctuaciones de flujo
- No contaminante, seguro y fiable: no hay manejo de productos químicos, no se producen efluentes peligrosos, no se vierten resinas.
- Elimina efectivamente las partículas inorgánicas disueltas
- En combinación con la ósmosis inversa como pre-tratamiento, elimina más del 99,9% de los iones del agua

Desventajas

- No se puede usar para aguas de dureza superior a 1 ppm, ya que el carbonato de calcio crearía una costra en la cámara del concentrado, limitando la operación
- Necesita de una purificación previa.

Nuevas avances EDI

- Muchos esfuerzos han sido dirigidos a desarrollar la tecnología EDI como un pulidor en reemplazo de los lechos de resina mixta en aplicaciones de Microelectrónica y Plantas de Poder;
- EDI es capaz de producir calidades cerca de 18 Mohmios-cm con 99.9% de remoción de Sílice y Boro;
- Durante 6 meses se comparó un Sistema de Osmosis Inversa de Doble Paso y Resina de lecho mixto como pulidor. Estos pulidores debían ser regenerados con una frecuencia de una vez por semana. Por otro lado el EDI produjo una calidad mayor a 18 Mohmios y niveles de Sílice no detectables (< 0.05 ppm).
- Una planta en Asia utiliza un EDI

Calidad de agua de alimentación de:

Conductividad = 7 uS/cm

Dureza Total = 0.01 ppm CaCO₃

CO₂ = 5 ppm

Calidad del agua producto:

18.2 Mohm-cm

Sílice no detectable (< 0.01 ppm)

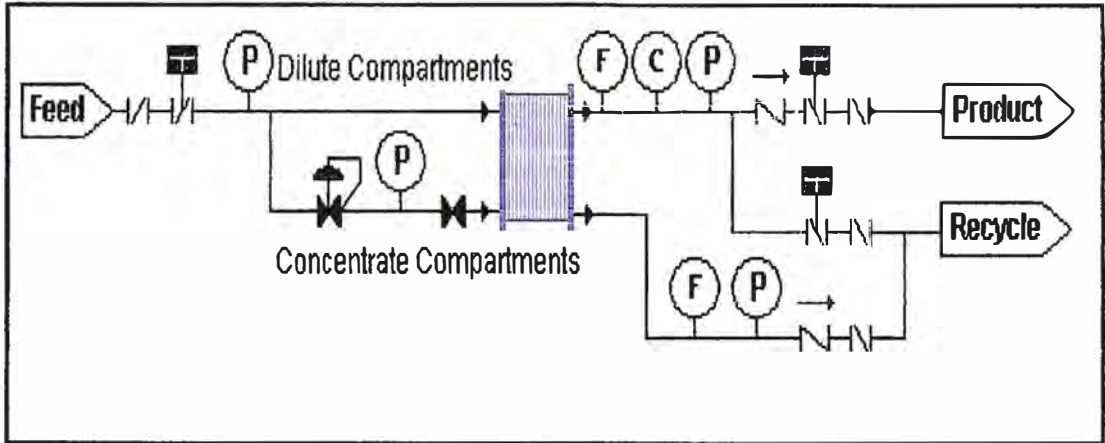
VII. BIBLIOGRAFIA

1. Liqui-Cel Membrane Contactor are Manufactured by Membrane Charlotte, leader in separation technology, Degasification Membrane. www.liqui-cel.com
2. WOOD, Jonathan and GIFFORD ,Joseph; “ Improvements in Continuous Electrodeionization For Power Plant Applications” , US Filter Corporation, Lowell.
3. MOREA, Lucas: “Contaminación del Agua” (12 de febrero de 2005).
<http://www.monografias.com/trabajos/contamagua/contamagua.shtml>
4. RAMÍREZ, Alberto. Recursos Naturales en Grave Deterioro. (4 de marzo de 2004).http://www.cepredenac.org/05_nove/a_prensa/2004/mar_04/mar_04d.htm
5. WOOD, J.H., G.C. Ganzi, P.A. Springthorpe, “Continuous Electrodeionization: Module Design Considerations for the Production of High Purity Water”, Ion Exchange Conference, England, July 2000.
6. Excel Water Technologies. Desinfección por Ultravioleta (9 de abril de 2005)..
<http://www.excelwater.com/spa/b2c/uvprocess.php>
7. PUTZEYS de David, Licda. Evelyn. Desinfección e Identificación de Organismos. (2 de abril de 2005). Entrevista personal.
8. Ionpure Technology Manufactures Electrodeionization Module, www.ionpure.com
9. C. GRIFFIN y T. WITHAM, “ Continuos Electrodeionización or Ion Exchange” , Water Technology, Junio 1996

10. BROS, Marialba. “ La Purificación del Agua.” (10 de abril de 2005).
<http://html.rincondelvago.com/la-purificacion-del-agua.html>
11. A.T. Export. Desinfección. (9 de abril de 2005).
<http://www.atexport.com/pagesp/info/desinfpis.htm>
12. URBIETA, Jissel. Contaminación y Purificación del Agua. (12 de febrero de 2005). <http://www.monografias.com/trabajos12/conpurif/conpurif.shtml>
13. J. GIFFORD, D. Atnoor, An Innovative Approach To Continuous Electrodeionización Module and System Design for Power Applications; International Water Conference, Novembre 2000, Pag 00-52,
14. J. PRETZ, E KORNGOLD and O. KEDEM; A chlorine-free anode for electrodiálisis; Separation and Purification Technology, 15 (1999) Pag. 147-152
15. “ Gas explosion”, Handbook, Chamter 4, “Combustion Properties of Fuel – Air “ Mixtures, <http://www.cmr.no/english/gexcon/Handbook/GEXHBchap4.htm>,
13-Jul-99

VIII. APENDICE

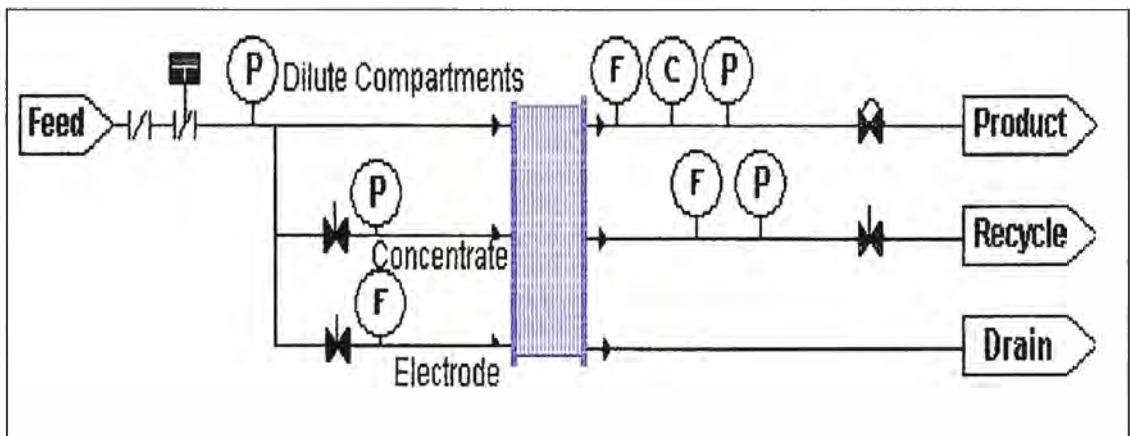
1. Diseños típicos EDI



P&ID del Sistema EDI

No requiere recircular el concentrado o inyección de sal

(Fabricante: Ionpure Technologies)



P&ID del Sistema EDI

No requiere recircular el concentrado o inyección de sal

(Fabricante : Electropure)