



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

PLANTEAMIENTO DE OPCIONES
TECNOLÓGICAS PARA LA
DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE POZO
PARA SU USO EN EQUIPOS DE GENERACIÓN DE
VAPOR.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

JOSÉ ALEJANDRO PETRICHOLE GUTIÉRREZ



MÉXICO, D.F., NOVIEMBRE DE 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO.

Presidente:	Prof. Jesús Gracia Fadrique
Vocal:	Prof. Rodolfo Torres Barrera
Secretario:	Prof. Alfonso Durán Moreno
1er. Suplente:	Prof. Víctor Manuel Luna Pabello
2º Suplente:	Prof. Baldomero Pérez Gabriel

Sitio en donde se desarrolla el tema:

UNAM, Torre de Ingeniería
Nivel 4, Ala Norte
Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, México, D.F.
Tel.: (55) 56 23 35 00, Ext.: 1415

Asesor del tema

Dr. Alfonso Durán Moreno

Sustentante

José Alejandro Petrichole Gutiérrez



DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi mamá Maria Inés, a mi papá José Agustín, a Iris Magally y esa pequeña parte de los dos que viene en camino, a mis hermanas Carmen y Dulce, a mis hermanos Miguel y Agustín, a mis sobrinos Cache, Angy, Elenita y Axel.



Agradecimientos

Agradezco a Mis Padres; María Inés y José Agustín por apoyarme en todas las decisiones que he tomado. Gracias por guiarme y motivarme a lo largo de la vida ya que sin sus consejos esto no hubiera sido posible.

Agradezco a Iris Magally por su comprensión, motivación e impulso para que éste proyecto se lleve a cabo. Te amo.

Agradezco a mis herman@s Carmen, Agustín, Dulce y Miguel por el apoyo y los consejos recibidos a lo largo de mi carrera.

Agradezco a la Familia Sánchez Villagran por el apoyo recibido en los últimos meses, a mi tío Florentino Sánchez, a mi tía Alicia Villagran, a mis primos Tino y Edgar, gracias por todo.

Agradezco al Dr. Alfonso Durán Moreno por su asesoría y comentarios para que este trabajo llegara al final así como por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo.

A mis cuates de la carrera; Checo, Frantz, Benja, Espectro, Rubén

A mis compañeros de trabajo Jorge, Rulo, Belmont, Pam, Jonathan y Pavel.

A la UNAM por haberme formado profesionalmente..



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. POZOS DE AGUA Y SU CLASIFICACIÓN	3
1.1. Sistemas de perforación de pozos.....	6
1.1.1 Perforación por percusión.....	6
1.1.2 Perforación por rotación	8
1.1.3 Perforación con aire comprimido	9
1.1.4 Perforación a rotación con aire comprimido y vibropercusión.	10
1.1.5 Perforación con martillo neumático (jack hammer)	10
1.1.6 Perforación a rotopercusión.....	10
1.2. Calidad de agua de pozo.....	11
1.2.1 pH	12
1.2.2 Alcalinidad	12
1.2.3 Conductividad.....	14
1.2.4 Dureza total	14
1.2.5 Sílice	16
1.2.6 Cloruros	16
2. CALDERAS	17
2.1. Proceso de Combustión en calderas	19
2.2. Clasificación de calderas	21
2.2.1 Uso.....	22
2.2.2 Presión	22
2.2.3 Materiales	22
2.2.4 Tamaño	23
2.2.5 Contenido de los tubos	24
2.2.6 Forma y posición de los tubos	24
2.2.7 Combustión.....	24
2.2.8 Fuentes de calor.....	24
2.2.9 Clase de combustibles	25
2.2.10 Combustibles para calderas	25
2.2.11 Fluido utilizado.....	25
2.2.12 Sistema de circulación.....	25
2.2.13 Posición del hogar	25
2.2.14 Tipo del fogón	26
2.2.15 Forma general.....	26
2.2.16 Nombre registrado del fabricante	26
2.2.17 Propiedades especiales	27
2.3. Problemática en los equipos generadores de vapor.....	27
2.3.1 Incrustación	27
2.3.2 Corrosión	28
2.3.3 Fragilización cáustica	28
2.3.4 Oxidación	28
2.3.5 Formación de lodos	28
2.3.6 Arrastre o vómito.....	28
2.3.7 Contaminación del vapor/contaminación del condensado	29
2.3.8 Formación de espuma.....	29
2.3.9 Alta presión en el cabezal/mala transferencia de calor.....	29
2.4. Calidad de agua recomendada para calderas	29
3. TECNOLOGIAS DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA.....	31
3.1. MEMBRANAS	32



3.1.1	Características de los procesos de separación con membranas	32
3.1.2	Tipos de membranas	33
3.1.3	Configuraciones	35
3.1.4	Forma de operar de las membranas	38
3.1.5	Factores que reducen las características de las membranas	38
3.2.	Ósmosis inversa	42
3.2.1	Características del proceso	42
3.2.2	Tipo de Membranas usadas en la Ósmosis Inversa	44
3.2.3	Problemas específicos de ensuciamiento	45
3.2.4	Producción de agua ultrapura	47
3.3.	Intercambio iónico	47
3.3.1	Resinas de intercambio iónico	47
3.3.2	Síntesis	48
3.3.3	Estructura física y química de las resinas	49
3.3.4	Selectividad de resinas	51
3.3.5	Cinética	51
3.3.6	Tipos de resinas de intercambio iónico	52
3.3.7	Configuraciones para tratamiento de intercambio iónico	54
3.3.8	Modos de operación en el intercambio iónico en columna	55
3.4.	Electrodialisis	57
3.4.1	Membranas utilizadas en Electrodialisis	58
3.4.2	Causas de mal funcionamiento: polarización de la concentración.	59
3.4.3	Aplicaciones	61
3.5.	Electrodesionización (EDI)	61
3.5.1	Funcionamiento de EDI	63
4.	EVALUACIÓN DE OPCIONES DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE POZO	66
4.1.	Propuesta técnica del proceso de desmineralización mediante intercambio Iónico.	70
4.2.	Propuesta técnica del proceso de desmineralización mediante ósmosis inversa	73
	CONCLUSIÓN	81
	BIBLIOGRAFIA	83
	ANEXO 1: PREDIMENSIONAMIENTO SIMPLIFICADO DE LA UNIDAD DESMINERALIZADORA DE AGUA MEDIANTE INTERCAMBIO IÓNICO	86
	ANEXO 2: FICHA TECNICA DE UNA UNIDAD DESMINERALIZADORA DE AGUA	94

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Usos de agua de pozo	5
Tabla 2.	Herramientas utilizadas en la perforación a percusión	7
Tabla 3.	Herramientas utilizadas en elementos de perforación a rotación.	9
Tabla 4.	Calidad de agua de pozo	11
Tabla 5.	Especies causantes de alcalinidad	13
Tabla 6.	Clasificación de aguas duras	15
Tabla 7.	Limites recomendados para los constituyentes del agua que se usa en calderas	29
Tabla 8.	Limites máximos permisibles en agua de suministro a calderas	30
Tabla 9.	Características de las membranas descritas anteriormente	38
Tabla 10.	Materiales y tipo de membranas	45



Tabla 11.	Comparación de agua ultrapura y de consumo.....	47
Tabla 12.	Ventajas e inconvenientes de los procesos de desmineralización de agua.	65
Tabla 13.	Calidades de agua de suministro a tecnologías de desmineralización....	67
Tabla 14.	Calidades de agua de salida de las tecnologías de desmineralización....	69
Tabla 15.	Calidad de agua de suministro a equipos desmineralizadores.....	70
Tabla 16.	Equipo principal para intercambio iónico	71
Tabla 17.	Calidad de agua en las etapas del proceso de intercambio iónico	73
Tabla 18.	Equipo para la desmineralización mediante ósmosis inversa.....	74
Tabla 19.	Calidad de agua en las diferentes etapas del proceso de ósmosis inversa..	76
Tabla 20.	Comparativo de costos de inversión de los procesos	77
Tabla 21.	Costos de operación de intercambio Iónico.....	78
Tabla 22.	Costos de operación de ósmosis inversa.....	79
Tabla 23.	Comparativo de costos de las dos opciones de desmineralización.....	79
Tabla 24.	Calidad de agua de suministro para el diseño del equipo de intercambio iónico.....	87

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Partes que componen una caldera.....	18
Figura 2.	Grafico de exceso de aire en función de CO ₂	20
Figura 3.	Diagrama de Ostwald para Gasóleo	21
Figura 4.	Representación de un cartucho de membrana	35
Figura 5.	Representación de módulos tipo placa-bastidor	36
Figura 6.	Membrana enrollada en espiral.....	37
Figura 7.	Representación de rechazo de membrana.....	39
Figura 8.	Proceso de ósmosis inversa	43
Figura 9.	Esquematación de columna durante la carga.....	56
Figura 10.	Esquematación de la regeneración de la columna	56
Figura 11.	Equipo de Electrodiálisis	57
Figura 12.	Polarización de la concentración en una membrana.....	59
Figura 13.	Diagrama de flujo de la desmineralización mediante intercambio iónico..	72
Figura 14.	Diagrama de flujo del proceso de ósmosis inversa	75



INTRODUCCIÓN

El agua subterránea o de pozo es una fuente de suministro más que se utiliza para diversos usos, uno de ellos es el industrial, en donde se destinan grandes cantidades para generación de vapor.

El agua extraída del subsuelo contiene sales de calcio, magnesio, sílice, cloruro, sodio, potasio, por mencionar las principales, las cuales si se encuentran en grandes cantidades la hacen perjudicial para los equipos generadores de vapor, ocasionando con ello incrustaciones, corrosión, oxidación, contaminación de vapor y condensados, entre otros problemas, trayendo consigo pérdida de eficiencia. Por tal motivo es necesario someter el agua a un tratamiento que garantice la eliminación de sales, conocido como desmineralización.

Existen diferentes tecnologías de desmineralización de agua, entre las cuales se encuentran: *la ósmosis inversa*, que es un tratamiento que funciona por medio de membranas; *el intercambio iónico*, que funciona mediante resinas catiónicas y aniónicas; *la electrodiálisis*, que funciona mediante membranas aniónicas y catiónicas con celdas donde se aplica una corriente eléctrica para hacer fluir las sales hacia las membranas y; *la electrodesionización*, que es una combinación de la electrodiálisis y el intercambio iónico, utilizada comúnmente como pulimento final. Dichas tecnologías tienen diferentes principios de operación, pero todas ellas tienen un objetivo en común que es eliminar las sales disueltas en el agua.

El objetivo del presente trabajo es recomendar la mejor opción técnica y económica de desmineralización que mejor se adecue a los requerimientos de calidad de agua de pozo de la región próxima a la Ciudad de Tula Hidalgo, así como la que proporcione la mayor relación costo-beneficio.

La estimación del coste de la inversión de las tecnologías de desmineralización seleccionadas, se realizará en base a cotizaciones de proveedores, catálogos de equipos y artículos de estimaciones rápidas de costos de equipos.



El presente trabajo está conformado por cuatro capítulos, conclusión, bibliografía y dos anexos.

El Capítulo I tiene la finalidad de presentar la clasificación de pozos, técnicas empleadas para la perforación, calidad de agua de pozo de la Ciudad de Tula Hidalgo y definición de los principales parámetros que afectan el funcionamiento de los equipos generadores de vapor.

El Capítulo II tiene por objetivo presentar conceptos generales de las calderas, la definición de las mismas, generalidades, partes principales de las que se componen, clasificación, forma de operar, problemas provocados por la mala calidad de agua y límites recomendados para los constituyentes del agua que se usa en calderas de baja, media y alta presión.

El Capítulo III presenta fundamentos teóricos, características, formas de operar, configuraciones, problemática, ventajas e inconvenientes de las cuatro tecnologías que se proponen para la desmineralización de agua de pozo.

El Capítulo IV presenta los criterios principales con los cuales se evaluaron las cuatro tecnologías de desmineralización así como la evaluación técnica-económica basada en cotizaciones de proveedores, catálogos de equipos y estimaciones rápidas de costos de equipos factibles de implementar a procesos industriales.

El Anexo I tiene el objetivo de presentar el predimensionamiento simplificado de una unidad desmineralizadora de agua mediante intercambio iónico con capacidad de 300 Ton/h.

El Anexo II presenta una ficha técnica con la cual se puede solicitar cotizaciones sobre un tren de desmineralización de agua.

CAPITULO I

POZOS DE AGUA Y SU CLASIFICACIÓN



1. POZOS DE AGUA Y SU CLASIFICACIÓN

De acuerdo a su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías: aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas meteorológicas.

Las aguas superficiales como su nombre lo indica son las que se encuentran en la superficie de la tierra, éstas comprenden los ríos, océanos, lagos y aguas embalsadas. Los cauces de agua sometidos a contaminación presentan una calidad variable a lo largo del curso del cauce. Las aguas de los lagos y pantanos o embalses, por otro lado, tienen una calidad relativamente uniforme.

Se consideran aguas subterráneas aquellas que se encuentren bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con ésta o con el subsuelo (parte profunda del terreno por debajo de la capa laborable). Se trata de un recurso de elevada cuantía con respecto a las aguas superficiales, que está sufriendo procesos acusados de contaminación procedente de distintos orígenes.

En cuanto a las aguas meteorológicas se encuentra el agua de lluvia, ésta es de mayor pureza física y química que las aguas superficiales o subterráneas.

Tal como se planteó en el objetivo para la evaluación de las opciones de desmineralización, el agua de suministro será tomada de pozos por lo cual no se hará más referencia de las aguas superficiales y meteorológicas.

Los pozos se clasifican de acuerdo a la NOM-003-CNA-1996 en pozos de absorción y pozos de infiltración o inyección, a continuación se presentan las definiciones de dicha clasificación en base a la misma norma.

Se entiende por pozo a la obra de ingeniería, en la que se utilizan maquinarias y herramientas mecánicas para su construcción, que permiten extraer agua del subsuelo.

*Pozo de absorción*¹: Es una obra de ingeniería diseñada especialmente para infiltrar agua de lluvia al subsuelo, constituida por una captación o alcantarilla, una caja desarenadora y una caja de infiltración; ésta última funciona como pozo o puede derivar sus excedentes a uno. En este tipo de pozos no se controla la calidad del agua, ya que ésta es infiltrada en la zona no saturada en

¹ NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-003-CNA-1996, *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*, México: Comisión Nacional del Agua 1996

la que se espera se obtenga una depuración adicional antes de llegar al acuífero.

*Pozo de infiltración o inyección*²: Obra de ingeniería que permite la recarga artificial del acuífero.

Una vez extraída el agua de pozos se usa de diversas formas las cuales se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Usos de agua de pozo³

USO	DESCRIPCIÓN
AGRICOLA	La utilización de agua nacional destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, y su preparación para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial.
AGROINDUSTRIAL	La utilización de agua nacional para la actividad de transformación industrial de los productos agrícolas y pecuarios.
DOMESTICO	Utilización del agua nacional destinada al uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y de sus árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de sus animales domésticos que no constituya una actividad lucrativa.
ACUACULTURA	La utilización de agua nacional destinada al cultivo, reproducción y desarrollo de cualquier especie de la fauna y flora acuáticas.
INDUSTRIAL	La utilización de agua nacional en fábricas o empresas que realicen la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como la que se utiliza en parques industriales, en calderas, en dispositivos para enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para la extracción de cualquier tipo de sustancias y el agua aún en estado de vapor, que sea usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación.
PECUARIO	La utilización de agua nacional para la actividad consistente en la cría y engorda de ganado, aves de corral y animales, y su preparación para la primera enajenación, siempre que no comprendan la transformación industrial.
PUBLICO URBANO	La utilización de agua nacional para centros de población o asentamientos humanos, a través de la red municipal.
SERVICIOS	La utilización de agua nacional para servicios distintos a los señalados en las fracciones 4.31 a 4.39 de esta norma.
USOS MULTIPLES	La utilización de agua nacional aprovechada en más de uno de los usos definidos en párrafos anteriores, salvo el uso para conservación ecológica, el cual está implícito en todos los aprovechamientos.

² NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-003-CNA-1996, *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*, México: Comisión Nacional del Agua 1996

³ Idem



1.1. Sistemas de perforación de pozos⁴

Se pueden hacer varios tipos de clasificaciones de los sistemas de perforación, en función de distintos criterios, siendo quizá el más correcto a considerar el del mecanismo en si utilizado en cada caso para romper y disgregar la formación geológica. Se puede hablar de dos esenciales: la rotura por impacto y el corte por cizallamiento o desgaste.

En el primero se trata de superar el límite elástico de los materiales fracturando las rocas o disgregando los materiales menos coherentes. En este grupo se encuentran los sistemas de percusión y rotopercusión.

En el segundo, el corte por cizallamiento o el desgaste por abrasión son los mecanismos de avance. En este se incluyen los sistemas de perforación a rotación, directa e inversa, etc.

A continuación se da una descripción de los sistemas de perforación para pozos.

1.1.1 Perforación por percusión⁵

El sistema de perforación mecánica por percusión, es de los sistemas más utilizados actualmente en la ejecución de pozos para la captación de aguas subterráneas. La perforación por percusión consta de un elemento metálico que golpea y deshace la formación: pico o trépano, y un elemento que recoge el terreno triturado: pala o cuchara de válvula. La facilidad de manejo del haber en relación con el del varillaje en la perforación por rotación es una ventaja, otra ventaja es la de no necesitar lodos o mezclas tixotrópicas nocivas al libre paso del agua por los acuíferos.

Las funciones que tiene que cumplir la máquina son:

Percusión. Se consigue por la repetición del ciclo de elevación y subsiguiente caída libre de una sarta de herramientas compuesta de distinta forma.

Extracción de detritus o limpieza de sondeo. Se hace con la cuchara de válvula y es preciso un mecanismo que permita, de forma rápida, su descenso al fondo del sondeo y su elevación a la superficie.

⁴ MARTINEZ RUBIO JUAN, *Aguas subterráneas: Captación y aprovechamiento*, Sevilla: Progenza, 1998, p. 160.

⁵ Idem, p. 161.



Manejo de tubería y herramientas. La máquina de perforar a percusión costa de dos partes principales: armazón con mecanismo y mástil. *El armazón*, que en décadas anteriores fue de madera, está formado de diversos perfiles unidos por soldadura o tornillos. Su forma es variable de unas marcas a otras y también la disposición de los distintos mecanismos. En el extremo contrario al mástil va el motor, que puede ser de explosión o de combustión generalmente son motores diesel, su potencia depende del tamaño de la máquina que depende de las profundidades y diámetros que se hayan de perforar con ella. La tabla 2 presenta los tipos de herramientas que se utilizan para la perforación por percusión.

Tabla 2. Herramientas utilizadas en la perforación a percusión.

Herramienta	Descripción
Trépano	Es la herramienta de perforar y la más importante de todas. Las funciones más importantes que cumple el trépano son: penetrar, triturar, escariar y mezclar.
Barrón	Es una barra cilíndrica de acero forjado. La misión del barrón es proveer a la sarta de herramientas con el peso necesario para la perforación y también como guía para el movimiento alternativo de la sarta.
Tijera destrabador	Se utiliza para desatascar la herramienta cuando ésta queda atascada en la perforación. Formada por dos eslabones que permiten un cierto juego longitudinal del orden de 10 a 20 cm.
Montera	Sirve para hacer la unión con el cable. El cable se une a un bulón cilíndrico alojado en el interior de la montera, permitiendo así el giro de la sarta de herramientas alrededor de su eje longitudinal, con lo que se consigue que la perforación sea cilíndrica y no aplastada.
Tubería	Para la entubación de sondeos. La más usada es tubería de chapa soldada, tiene la ventaja de su precio y, además, el tener el exterior liso la hace más fácilmente hincable cuando eso es necesario.

Si al comienzo el terreno es blando conviene cavar con pala un agujero inicial de un metro de profundidad, se llena el agujero de agua y se comienza la perforación. Si el terreno es duro conviene colocar un trozo de tubo como guía. Al comenzar la perforación debe llevarse la percusión a una velocidad pequeña hasta que se hayan obtenido un par de metros de perforación, y entonces se puede aumentar la velocidad. Con la válvula no se perfora ningún sondeo, no obstante, es un elemento necesario y pocos sondeos pueden perforarse sin su uso. No se debe parar la perforación hasta que la válvula esté lista para funcionar. Tres o cuatro minutos antes de parar el movimiento de perforación, se vierte un cubo de agua para aclarar el lodo y, de esta manera, la válvula se hundirá hasta el fondo y recogerá una carga completa. Tres viajes de la válvula

limpian el pozo. La cantidad de agua vertida en el pozo y el periodo de tiempo entre cada vez que se echa el agua, tienen bastante efecto sobre los metros perforados. Se debe vigilar el movimiento de las herramientas perforadoras, y cuando se observe algún arrastre o lentitud de las herramientas, hay que echar agua. Se añade agua en pequeñas cantidades cuando el lodo está bajo en el pozo y, a medida que este se profundiza.

1.1.2 Perforación por rotación ⁶

Existen regiones en las cuales los recursos hídricos superficiales son muy escasos, se comprende que a veces haya que recurrir a captaciones de agua que sobrepasen los 500 m de profundidad sin que por ello dejen de ser rentables, dicha perforación alcanza profundidades de 600/700 M.

La perforación por el sistema de rotación consiste en desgastar por medio de un efecto de abrasión y cincelado, que proporciona una broca susceptible de introducirse en profundidad y animada de un movimiento rotatorio. La roca que se va fraccionando, se extrae a la superficie por medio de un fluido sometido a presión hidráulica que desciende por una tubería y sale por la broca, para limpiar los detritus ascendiendo por el espacio anular entre la tubería y el terreno. Los elementos que componen la perforación a rotación son:

Elementos de perforación. Son las herramientas que juegan un papel decisivo en la perforación de las rocas:

Elementos de suspensión. Son aquellos elementos que sirven para la extracción e introducción de las herramientas de perforar, así como para suspender las mismas en periodo de perforación.

Elementos mixtos de perforación y suspensión. Todos estos elementos componen la columna de perforación cuya misión a cumplir es sostener y hacer girar la broca, conducir el fluido de perforación para extraer el detritus y lubricar la broca, imprimir peso a la broca, bajar y subir la broca. La tabla 3 presenta las diferentes herramientas que se utilizan en los elementos que componen la perforación a rotación.

⁶ MARTINEZ RUBIO JUAN, *Aguas subterráneas: Captación y aprovechamiento*, Sevilla: Progenza, 1998, p. 171.

Tabla 3. Herramientas utilizadas en elementos de perforación a rotación.

Elemento	Herramienta	Descripción
De perforación	Brocas	Las que se usan actualmente son las de rodillos (para rocas de mediana dureza o duras) y las llamadas "colas de pez" utilizadas para perforar rocas plásticas.
	Mesa de rotación	Su misión es prestar un movimiento de rotación a la tubería que lleva en su extremo inferior la broca.
De suspensión	Cabestrante	Se utiliza para arrollar el cable de acero que suspende toda la tubería de perforación.
	Torre	Las torres son telescópicas y se abaten para su transporte sobre el cuerpo de la perforadora, su altura oscila entre los 15 ó 20 metros.
	Cable	Es un elemento esencial del sistema de suspensión, ya que por su continuo trabajo se expone a roturas que acarrear serios inconvenientes. Todos los cables de la perforadora a rotación deben ser preformados ya que éstos tienen mayor duración, mayor resistencia a vibraciones, poca tendencia a girar sobre sí mismos y no saltan al romperse.
	Estructuras de los cordones	El tipo de cable usado en la perforación es aquel en que los cordones están formados por alambres de diversos diámetros. Hay tres tipos de estructura de cordones: "Séale", "Warrington" y "Fille-Wire".
Mixtos de perforación y suspensión	Barras de carga	Su uso está condicionado a proporcionar peso sobre la broca, además de mantener el pozo vertical. Desde el punto de vista de rendimiento efectivo de una perforación, las barras es una de las partes de la columna de perforación que iguala en importancia a la broca.
	Varillaje	Para que una perforación sea vertical es imprescindible mantener tensas las varillas de perforación.
	Barra conductora	Desempeña las funciones de suspender el varillaje, hacer que éste gire y conducir al fluido de perforación.
	Cabeza de inyección y sustentación	Suspende la columna de perforación, permite la rotación libre de la columna de perforación y proporciona la conexión de la manguera de lodos.

1.1.3 Perforación con aire comprimido⁷

Es un sistema en el que se sustituye el lodo como fluido de perforación por aire comprimido. El aire comprimido hace las funciones del lodo, arrastrando y transportando el detritus. Para ello se dota a la perforadora de un compresor de aire que se inyecta a presión a través del varillaje hasta la herramienta de corte. Estos equipos, además cuentan con bomba de lodos lo que permite sustituir o alternar en función del tipo de terreno que se va a perforar con aire y lodo tradicional, alcanzando profundidades superiores a los 2000 m. Existen diversos sistemas de perforación por aire comprimido, a continuación se describen estos.

⁷ MARTINEZ RUBIO JUAN, *Aguas subterráneas: Captación y aprovechamiento*, Sevilla: Progenza, 1998, p. 185.



1.1.4 Perforación a rotación con aire comprimido y vibropercusión⁸.

Este sistema aplica los principios de la circulación inversa. Consiste en perforar mediante un doble tubo. Un tubo exterior, que funciona además como revestimiento de protección, desciende al estar sometido a un movimiento de sinusoidal vibratorio. Al mismo tiempo se aplica el tren de varillaje, que funciona como una tubería de descarga, un movimiento de rotación y percusión que repercute sobre las herramientas de corte, generalmente un tricono con inserciones de carburo de tungsteno.

1.1.5 Perforación con martillo neumático⁹

Consistía en un martillo neumático en superficie que golpea un tren de varillaje, al final del cual se encuentra un útil de perforación o tallante. Aunque en las primeras decenas de metros perforados resulta un sistema rápido, sobre todo si la perforación es de pequeño diámetro, a medida que avanza la perforación el sistema en sí va presentando limitaciones e inconvenientes debidas en parte a que la efectividad en la transmisión de la energía entre el martillo y la herramienta se ve amortiguada por los efectos de absorción del varillaje, y al desvío que se produce en la perforación debido a la flexibilidad del varillaje. A estos inconvenientes se le suma el alto nivel sonoro del equipo, la mala recuperación de muestra a partir de una determinada profundidad y la prematura fatiga de los materiales del tren de perforación sometidos a fuertes vibraciones.

1.1.6 Perforación a rotopercusión¹⁰

Este sistema de perforación se basa en el golpeteo de la formación con un martillo neumático situado en el fondo de la perforación accionado mediante aire comprimido generado por uno o varios compresores dispuestos sobre la plataforma de perforación. Al colocar el tallante (herramienta de corte, también llamada boca) en el propio martillo la percusión se transmite de forma directa por lo que se optimiza el aprovechamiento de la energía y se superan muchas

⁸ MARTINEZ RUBIO JUAN, *Agua subterráneas: Captación y aprovechamiento*, Sevilla: Progen, 1998, p. 185.

⁹ Idem, p. 187

¹⁰ Idem, p. 187



de las limitaciones e inconvenientes que presentaba el sistema perforación con martillo neumático.

Los elementos que conforman el equipo son similares a los de otros sistemas, presentan como elementos diferenciadores el compresor y el martillo neumático. No obstante, las modernas perforadoras tienen capacidad para perforar con varios sistemas: rotopercusión, circulación inversa con lodos, directa con aire, etc.

1.2. Calidad de agua de pozo

La calidad del agua subterránea o de pozo varía según la región de donde sea extraída, para los fines del presente trabajo se toma como referencia la calidad de agua de pozo de la Ciudad de Tula Hidalgo, agua que contiene diversos parámetros entre los cuales se encuentran los contenidos en la tabla 4.

Tabla 4. Calidad de agua de pozo¹¹

Parámetro	Unidades	Promedio
Calcio	mgCaCO ₃ /L	234
Magnesio	mgCaCO ₃ /L	182
Sodio	mgCaCO ₃ /L	500
Potasio	mgCaCO ₃ /L	35
<i>Total de cationes</i>	mgCaCO ₃ /L	951
Hidróxido	mgCaCO ₃ /L	-
Bicarbonatos	mgCaCO ₃ /L	460
Cloruros	mgCaCO ₃ /L	305
Sulfatos	mgCaCO ₃ /L	186
Nitratos	mgCaCO ₃ /L	-
<i>Total de aniones</i>	mgCaCO ₃ /L	951
Dureza Total	mgCaCO ₃ /L	416
pH		7.35
Conductividad	μS/cm	1715
Alcalinidad	mgCaCO ₃ /L	460
Bióxido de carbono	mgCaCO ₃ /L	40
Sílice (SiO ₂)	mg/L	66

Frecuentemente son perjudiciales para la operación de los equipos generadores de vapor, éstos se definen a continuación.

¹¹ Comisión Nacional del Agua, Departamento de Saneamiento y Calidad del Agua, Resultados de la Red Nacional de Monitoreo, Periodo de Informe: Enero – Diciembre de 2006.

1.2.1 pH¹²

El pH es una expresión del carácter ácido o básico de un sistema acuoso. Es una medida de la “actividad del ion hidronio” en un sistema acuoso. El pH, es una medida de la intensidad ácida o alcalina de una muestra de agua, que difiere de los términos “acidez y/o alcalinidad”, en la medida en que estos últimos expresan esencialmente “la capacidad amortiguadora de la muestra”, más que su carácter ácido o básico propiamente dicho.

Los conceptos de pH, alcalinidad y acidez se relacionan mutuamente debido a que el pH de la muestra se utiliza como criterio para determinar si la capacidad amortiguadora de una muestra de agua se ha de medir en función de su acidez o en función de su alcalinidad. El origen de la escala de pH proviene del valor de la constante de ionización del agua a 25 °C.

La escala de pH es simplemente una escala de medición de carácter ácido o básico de un sistema acuoso, entre dos extremos opuestos: uno molar ácido y uno molar básico”. La escala de medición del carácter ácido o básico, así definida, ha resultado ser muy útil pues, aun cuando existen en la naturaleza sistemas acuosos más ácidos que el pH=0, o más básicos que el pH=14, en el 99.99% de los casos, el pH de los sistemas acuosos naturales se halla comprendido dentro del rango de esta escala.

1.2.2 Alcalinidad¹³

La alcalinidad de una muestra de agua es su capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio (H^+) hasta un valor de pH igual a 4.5. La alcalinidad es causada principalmente por los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes en solución y, en menor grado, por los boratos, fosfatos y silicatos, que puedan estar presentes en el agua. En un sentido estricto las principales especies causantes de alcalinidad y su asociación con una posible fuente de aguas, se presentan en la tabla 5.

¹² JIMENEZ CISNEROS BLANCA ELENA, *La contaminación ambiental en México, Causas efectos y tecnología apropiada*, México: Limusa, 2001, p.133-134

¹³ GERMAIN L, COLAS L, ROUQUET J, *Tratamiento de las aguas, redes de distribución de aguas potables e industriales, alimentación de calderas de vapor y circuitos de refrigeración*, México: Ediciones Omega, S:A., p. 4-6.



Tabla 5. Especies causantes de alcalinidad

Especie	Tipo de agua
Hidróxidos, OH^-	Aguas naturales, residuales e industriales
Bicarbonatos, HCO_3^-	Aguas naturales y residuales
Carbonatos, CO_3^{2-}	Aguas naturales y residuales
Bióxido de carbono, CO_2	Aguas subterráneas, residuales y/o profundas
Silicatos, SiO_3^{2-}	Aguas subterráneas
Bi-Silicatos, HSiO_3^-	Aguas subterráneas
Boratos, BO_3^{3-}	Aguas subterráneas y residuales agrícolas
Monoboratos, HBO_3^-	Aguas subterráneas y residuales agrícolas
Biboratos, H_2BO_3^-	Aguas subterráneas y residuales agrícolas
Fosfatos, PO_4^{3-}	Aguas residuales domesticas, agrícolas e industriales
Monofosfatos, HPO_4^{2-}	Aguas residuales domesticas, agrícolas e industriales
Bifosfatos, H_2PO_4^-	Aguas residuales domesticas, agrícolas e industriales

La tabla 5, en la mayoría de los cuerpos de aguas naturales, la alcalinidad se halla asociada al sistema carbonato, esto es, a los carbonatos, bicarbonatos y ácido carbónico presentes. Por esta razón la alcalinidad suele tomarse como un indicativo de la concentración de estas sustancias, sin que ello quiera decir que, para todos los casos, la alcalinidad se deba exclusivamente al sistema carbonato.

La alcalinidad en el agua se expresa como la concentración equivalente de iones hidroxilo, en mg/L, o como la cantidad equivalente de CaCO_3 , en mg/L. la alcalinidad, entendida como la concentración de metales alcalinotérreos, tiene importancia en la determinación de la calidad del agua para riego y es, además, un factor importante en la interpretación y el control de los procesos de purificación de aguas residuales.

La alcalinidad se mide por titulación de una alícuota de muestra con HCl o H_2SO_4 de concentración 0.02N, utilizando indicadores como fenolftaleína, cuando las muestras tienen un pH mayor de 8.3 o naranja de metilo, en caso contrario. En el primer caso se habla de “alcalinidad P” o alcalinidad Phenolphthaleine, mientras que en el segundo se habla de “alcalinidad M” o alcalinidad al Methyl orange.



1.2.3 Conductividad¹⁴

Es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga o valencia y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura a la cual se realiza la medición. De los muchos factores que afectan el comportamiento de los iones en solución, las atracciones y repulsiones eléctricas entre iones y la agitación térmica, son quizá los más importantes. Estos efectos se expresan a través de un parámetro conocido como la “fuerza iónica” de la solución, μ :

$$\mu = 1/2 \sum C_i * Z_i^2$$

En donde “ C_i ” y “ Z_i ” representan la concentración y la carga iónica del componente “ i ”. Las soluciones de la mayoría de los ácidos, bases y sales inorgánicas son relativamente “buenos conductores” de la corriente eléctrica. Inversamente, las soluciones acuosas de solutos orgánicos, que no se disocian o que se disocian muy poco en el agua, poseen conductividades eléctricas muy bajas o similares a las del agua pura. En la mayoría de las soluciones acuosas, cuanto mayor es la concentración de las sales disueltas, mayor es su conductividad eléctrica. Este efecto continúa hasta el punto de saturación de la sal o hasta que la solución se halla tan concentrada en iones que la restricción del movimiento, causada por un aumento posterior en la concentración, disminuye la conductividad eléctrica del sistema. Puesto que a mayor temperatura menor viscosidad y a menor viscosidad mayor libertad de movimiento, la temperatura también tiene una marcada influencia sobre la conductividad eléctrica de un sistema acuoso. Si bien el incremento de la conductividad eléctrica con la temperatura puede variar de un ión a otro, en general se acepta que ésta aumenta en promedio un 3% por cada grado centígrado que aumente la temperatura.

1.2.4 Dureza total¹⁵

Es una propiedad que refleja la presencia de metales alcalinotérreos en el agua. De estos elementos, el calcio y el magnesio constituyen los principales

¹⁴ JIMENEZ CISNEROS BLANCA ELENA, *La contaminación ambiental en México, Causas efectos y tecnología apropiada*, México: Limusa, 2001, p.128-129

¹⁵ Idem, p.130



alcalinotérreos en aguas continentales, mientras que el bario y el estroncio se presentan, adicionalmente a los anteriores, en cuerpos de agua con algún tipo de asociación marina. La dureza en el agua es el resultado de la disolución y lavado de los minerales que componen el suelo y las rocas. Así por ejemplo, el calcio que representa el 3.5% de la corteza terrestre, se encuentra en la naturaleza bajo la forma de mármol, CaCO_3 , yeso CaSO_4 , dolomita, MgCO_3 , CaCO_3 y patita, CaF_2 . A su vez, el magnesio que representa el 2,2% de la corteza terrestre, se encuentra en la naturaleza bajo la forma de magnesita, MgCO_3 , asbesto, $\text{CaMg}_3(\text{SiO}_3)_4$ y dolomita. Aunque los carbonatos de calcio y magnesio son frecuentes en la corteza terrestre, su solubilidad es muy baja, tal como puede deducirse a partir de sus constantes de solubilidad. Sin embargo, en aguas ácidas la solubilidad de estas sales aumenta apreciablemente y eso es precisamente lo que ocurre con las aguas subterráneas en las zonas de recarga. Se acidifica con CO_2 , al paso por la zona radicular de los suelos. El efecto de la acidez del bióxido de carbono sobre la solubilidad de los carbonatos, consiste básicamente en su transformación a bicarbonatos, los cuales forman sales mucho más solubles. Aunque la dureza en el agua es una de las principales características de las aguas subterráneas, (mayor grado de mineralización) y/o de la afectación de aguas continentales por aguas marinas, ésta también puede estar asociada a los vertimientos de aguas residuales, como por ejemplo, a las aguas residuales agrícolas. Con respecto a la dureza, las aguas pueden clasificarse como se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de aguas duras.

Clasificación	Dureza mg CaCO_3/L
Blanda	0-100
Moderadamente duras	101-200
Duras	201-300
Muy duras	> 301

Dicha agua tiene efectos adversos para muchos fines industriales, como por ejemplo, para el uso del agua en calderas, debido a que las incrustaciones que ocasiona pueden provocar la explosión de las mismas. Pese a ser la dureza una expresión de la concentración de los elementos alcalinotérreos en el agua, normalmente se toma ésta como una medida casi exclusiva de la concentración de los iones calcio y magnesio; esto, debido a que estos dos

elementos son mucho mas abundantes y frecuentes en las aguas naturales, que todos los demás alcalinotérreos.

1.2.5 Sílice¹⁶

La sílice SiO_2 es una de las impurezas que más problemas ocasiona por el tipo de incrustaciones que llega a formar. Su presencia en el agua se debe principalmente a la acción destructiva de ésta sobre las rocas y su cantidad varía de acuerdo con los terrenos que atraviesa.

La NMX-K-437-1978 establece el método de prueba para la determinación de la sílice en muestras de aguas para alimentación de calderas o algún tipo de agua industrial cuyo contenido de sílice no exceda de 1000 $\mu\text{g/L}$.

1.2.6 Cloruros¹⁷

El ion cloruro se encuentra con frecuencia en las aguas naturales y residuales, en concentraciones que varían desde unos pocos ppm hasta varios gramos por litro. Este ion ingresa al agua en forma natural mediante el lavado que las aguas de lluvias realizan sobre el suelo, sin embargo, como quiera que la superficie de contacto entre el agua y los materiales del suelo es relativamente baja en las aguas superficiales, la concentración de cloruros en estos cuerpos de agua tiende a ser también, relativamente baja, salvo que estas hayan sido afectadas por eventos antrópicos. No obstante, en las aguas subterráneas, en donde la superficie de contacto entre el agua y los materiales del subsuelo es mucho mayor, la concentración de ion cloruro suele estar directamente relacionada con la litología predominante y/o con el tiempo de permanencia del agua en el acuífero. Un contenido de cloruro elevado en el agua, interfiere en el desarrollo y crecimiento vegetal y, en este sentido, su medición es importante cuando el propósito del agua es la evaluación de su aplicabilidad para el riego de cultivos. Así mismo, las concentraciones elevadas de cloruro corroen las tuberías de conducción y demás estructuras metálicas en las aguas que se utilizan para fines industriales. A nivel industrial, el ion cloruro es considerado como un veneno para los aceros.

¹⁶ L. GERMAIN L, COLAS L, ROUQUET J, *Tratamiento de las aguas, redes de distribución de aguas potables e industriales, alimentación de calderas de vapor y circuitos de refrigeración*, México: Ediciones Omega, S:A., p. 4-6.

¹⁷ JIMENEZ CISNEROS BLANCA ELENA, *La contaminación ambiental en México, Causas efectos y tecnología apropiada*, México: Limusa, 2001, p.129-130



CAPITULO II

CALDERAS



2. CALDERAS

Existen diversos equipos generadores de vapor, las calderas son los equipos más utilizados a nivel industrial por lo cual para los fines del presente trabajo sólo se hará referencia de éstas.

Una caldera puede describirse como un generador de vapor o como la combinación de equipos para producir o recuperar calor, junto con aparatos para transferir el calor disponible a un fluido (según código ASME), mientras que generador de vapor puede definirse como un equipo que, dentro de sus capacidades genera y entrega vapor en la cantidad, calidad y oportunidad requerida, en forma continua y en operación económica y segura.

Las principales partes que componen una caldera son:

- ✓ *Hogar*: sección que se encuentra en contacto directo con la flama.
- ✓ *Quemador*: dispositivos en donde se lleva a cabo la comunicación
- ✓ *Humos*
- ✓ *Intercambiador de calor*
- ✓ *Fluido caloportador*
- ✓ *Chimenea*

La figura 1 presenta las partes principales de una caldera.

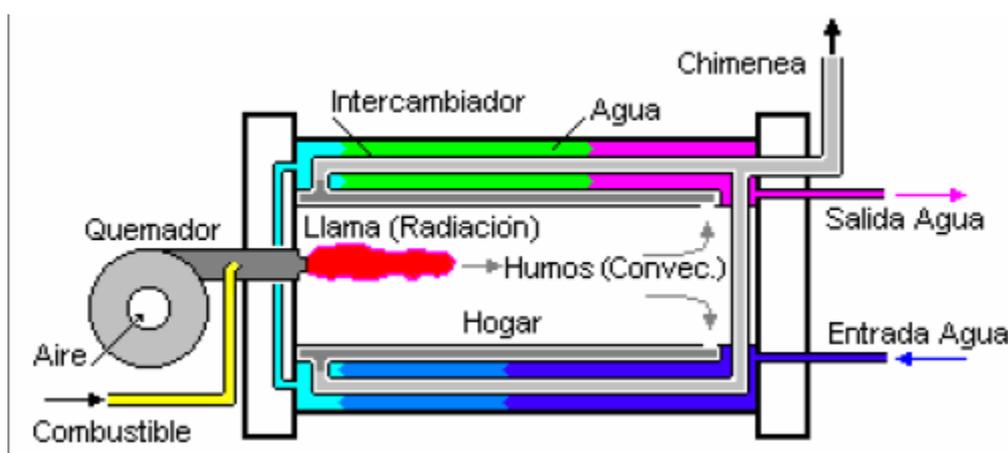


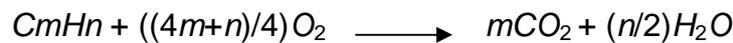
Figura 1. Partes que componen una caldera¹.

¹ CARL D. SHIELD, *Calderas. Tipos, características y sus funciones*, 1^{er} ed, México: CECSA, 1965.

2.1. Proceso de Combustión en calderas²

A continuación se describe el proceso de combustión que se lleva a cabo en el interior de las calderas.

Se entiende por combustión, la combinación violenta, con desprendimiento de calor y luz, del oxígeno del aire con el carbono, hidrógeno y azufre, que constituyen los elementos activos de los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. La combustión se efectúa en proporciones de peso bien determinadas, de acuerdo a la composición especificada de cada combustible y respetando el modelo de reacción siguiente:



El quemador es el encargado de que la mezcla sea la apropiada. La cantidad de calor por unidad de masa que desprende un combustible al quemarse es el poder calorífico (kJ/kg).

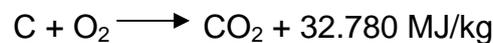
Los elementos básicos que reaccionan son:

Oxígeno del aire como comburente (aprox. 1 m³ por kWh)

Carbono y el hidrógeno del combustible

Otros elementos (azufre), e inertes (cenizas).

Reacciones del Carbono:



La reacción del hidrógeno:



Si el agua se condensa:



La reacción de Azufre es:



La combustión completa se llama estequiométrica, todo el carbono se oxida en CO₂.



² RICHARD J. REED & JOST. O. WENDT, *Applied combustion technology*, 1991.



La combustión incompleta se produce si existe CO en los humos. El aire contiene el 21% de O₂, se necesitan 4.76 veces más de aire para la combustión. Conociendo la composición del combustible es posible conocer la cantidad de oxígeno necesaria. Para obtener una combustión completa se requiere un exceso de aire, que depende de: El combustible, y de la homogeneidad de la mezcla combustible comburente que se consiga en el quemador. El exceso de aire empleado se deduce del contenido de CO₂ en los humos. La figura 2 presenta la gráfica que relaciona el exceso de aire con el CO₂ empleado en la combustión.

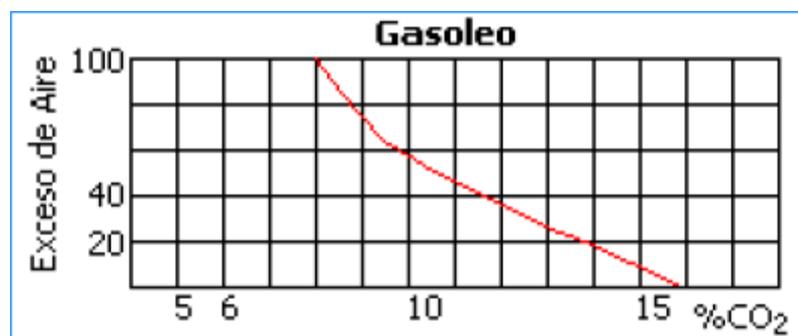


Figura 2. Grafico de exceso de aire en función de CO₂

El exceso de aire no es deseable, es una masa que absorbe calor y disminuye la temperatura final y el nivel energético. Se calcula mediante:

$$\text{ExcesodeAire} = \frac{\text{AireSu ministrado} - \text{AireEstequiometrico}}{\text{AireEstequiometrico}} * 100\%$$

Para combustiones incompletas se emplea el Diagrama Ostwald; para el Gasóleo C es el que se presenta en la figura 3:

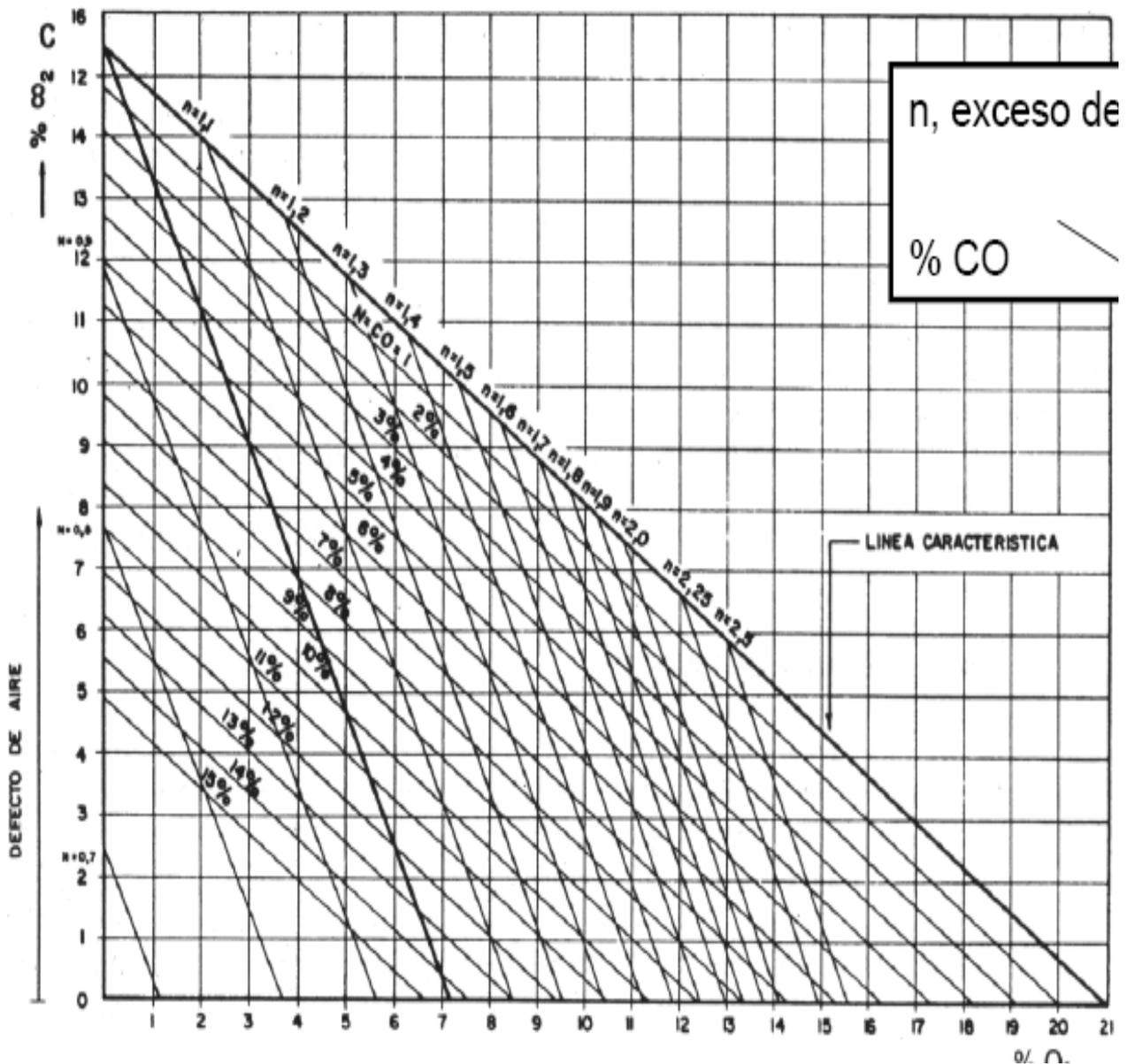


Figura 3. Diagrama de Ostwald para Gasóleo

2.2. Clasificación de calderas³

Las calderas se clasifican basándose en algunas de las características siguientes:

- (1). Uso, (2) Presión, (3) Materiales de construcción, (4) tamaño, (5) contenido de los tubos, (6) forma y posición de los tubos (7) sistema de fogón, (8) fuente de calor, (9) clase de combustible, (10) fluido utilizado, (11) sistema de circulación, (12) posición del hogar, (13) tipo del fogón, (14) forma general, (15)

³ CARL D. SHIELD, *Calderas. Tipos, características y sus funciones*, 1^{er} ed, México: CECSA, 1965, p.23

nombre registrado de fabricante y (16) propiedades especiales, dicha clasificación se describe a continuación.

2.2.1 Uso

Se han desarrollado muchos y variados tipos de unidades de unidades generadoras de vapor, algunos se diseñan para proporcionar fuerza en general o calefacción. Sus características varían de acuerdo con la naturaleza del servicio que prestan. Las calderas reciben básicamente las denominaciones de estacionarias (instaladas en tierra) y móviles (para navíos y locomotoras).

Las estacionarias se utilizan para calefacción central de servicio público, como plantas de vapor para procesos industriales, plantas de vapor para centrales termoeléctricas locales, centrales de fuerza para servicio público o unidades generadoras para servicios especiales. Las calderas portátiles incluyen las de tipo locomóvil, usadas en los campos petroleros y en los aserraderos. La mayoría de las calderas con caja de fuego de acero, se califican entre las calderas portátiles.

2.2.2 Presión

Calderas estacionarias. Para mantener un control de seguridad sobre las características de construcción de toda caldera estacionaria susceptible de aseguramiento, dicha construcción debe someterse a las normas prescritas por el “Código de Calderas y Tanques de Presión” de la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos; conocido como el código de calderas ASME: Este código diferencia las calderas para las siguientes características:

Calderas de calefacción de baja presión, que comprenden todas las calderas de vapor que no exceden de 1.05 kg/cm^2 (15 lb/plg^2) y todas las calderas para agua caliente que operan a presiones que no exceden de 11.25 kg/cm^2 (160 lb/plg^2) y cuyas temperaturas no sobrepasan los 121°C (250°F).

Calderas para generación de fuerza. Son todas aquellas que no sobrepasen los límites señalados en el punto anterior.

2.2.3 Materiales

La selección de los materiales para la construcción de calderas, está controlada por lo dispuesto en la Sec. II del Código de Calderas “ASME”



(especificaciones de materiales). Las calderas para la generación de fuerza se construyen usualmente con aceros especiales. Las calderas de calefacción de presión baja, se fabrican, por lo general, de hierro colado o de acero.

Las calderas de hierro colado, producidas por las fundiciones de hierro gris, se componen de cierto número de secciones, interconectadas por niples de presión o individualmente por medio de cabezales exteriores.

Las calderas de acero son fabricadas con láminas de acero, procedentes de los trenes de laminación y con fluxes de acero. Las planchas de acero son unidas por medio de costuras de remaches o por costuras de soldadura: Los tubos se insertan dentro del tambor, en los cabezales o placas de soporte, siendo expandidos, rolados o soldados, para obtener una junta impermeable.

2.2.4 Tamaño

Calderas de acero: El Instituto de Calderas de Acero (Steel Boiler Institute), en sus "Normas para Calderas de Acero" estandariza el tamaño y clasificación de las calderas de fogón de acero, calderas escocesas, quemadores para calderas y calderas de acero para calefacción (con excepción de las calderas verticales que operan a más de 1 kg/cm^2), de la manera siguiente.

La determinación de la capacidad de las calderas comerciales se basa únicamente en la superficie de calefacción. Las llamadas tamaño veintidós alcanzan superficies desde 12 hasta 332 m^2 (129 a 3571 pies^2) de superficie de calefacción (con rendimientos máximos de $163\,296$ a $4\,536\,000 \text{ kcal/h}$ (648 a $18\,000 \text{ MB/h}$)).

Las capacidades de las calderas consideradas como residenciales, se basan en la superficie de calefacción, verificación mediante pruebas de rendimiento. Quedando comprendidas en la categoría diecisiete, de 1.49 a 27.3 m^2 de superficie de calefacción (con rendimiento nominal hasta de $453\,600 \text{ kcal/h}$).

Se trata de calderas para petróleo combustible y unidades formadas para caldera y quemador, cuya capacidad se basa únicamente en las pruebas de rendimiento. Están catalogadas las de la categoría catorce, con rendimiento nominal hasta de $453\,600 \text{ kcal/h}$.

Calderas de hierro colado. El "Código de Pruebas y Estimaciones para Calderas de Calefacción de baja Presión" del IBR establece las normas de las calderas de hierro colado para calefacción (hasta una presión de 1.05 kg/cm^2



(15lb/plg²), catalogadas en la categoría treinta y tres (para un rendimiento hasta de 3 143 kg de vapor por hora).

2.2.5 Contenido de los tubos

Hay dos tipos de clases generalizadas de calderas de acero; la caldera de tubo de humo y la caldera de tubos de agua o acuotubular.

Calderas de tubos de humo. Son dotadas de tubos rectos, rodeados de agua y a través de cuyo interior pasan los gases de la combustión. Estos tubos se instalan normalmente en la parte inferior de un tambor sencillo o de un casco, abajo del nivel del agua.

Calderas acuotubulares. Contienen en su interior el vapor o el agua, mientras que el fuego es aplicado en la superficie exterior de los mismos. Los tubos unidos a unos o más domos, se disponen ya sea paralelos al eje de la caldera o en ángulo recto con respecto al mismo. Los domos van colocados horizontalmente por lo regular.

2.2.6 Forma y posición de los tubos

La superficie de calefacción de los tubos se puede clasificar (1) por la forma de los mismos rectos, curvos, o sinuosos; o (2) por su disposición horizontal, inclinada o vertical.

2.2.7 Combustión

La caldera puede ser un recipiente de presión operado por otro sistema de suministro de calor. Las calderas operadas por fuego, reciben el calor aplicado de la combustión de algún producto combustible. Una caldera no operada mediante fuego, recibe el calor necesario de cualquier otra fuente que no sea la combustión.

2.2.8 Fuentes de calor

El calor puede ser un derivado de (1) la combustión de combustibles (sólidos, líquidos o gaseosos); (2) los gases calientes de desperdicio de otras reacciones químicas; (3) la aplicación de energía eléctrica o (4) el empleo de energía nuclear.



2.2.9 Clase de combustibles

Se diseñan las calderas de acuerdo con el combustible a emplear, por ejemplo, carbón bituminoso, antracita, carbón pulverizado, gas, petróleo, leña y bagazos u otros productos de desperdicio.

2.2.10 Combustibles para calderas

Los combustibles se clasifican en: sólidos, líquidos y gases.

Combustibles sólidos, importan el carbono fijo, la humedad, las cenizas y las materias volátiles.

Combustibles líquidos, fuel óleo ($\uparrow S_2$), y gasóleo C.

Distribución en camiones cisterna y almacenamiento en un depósito central, alcanzando la caldera por una red de tuberías.

Combustibles gaseosos, butano, propano, gas natural.

Composición variable, y el suministro puede ser por medio de canalizaciones a alta baja o media presión, con depósitos fijos o con depósitos móviles (bombonas); necesitan vaporización

Los combustibles líquidos y gaseosos logran mejor mezcla con el aire, y ensucian menos que los sólidos.

2.2.11 Fluido utilizado

Una caldera se concibe como un recipiente a presión dedicado a producir vapor de agua. Sin embargo muchas de ellas tienen como finalidad el calentamiento de agua. Algunas para procesos industriales se destinan al calentamiento de productos químicos especiales. En unas cuantas plantas de centrales termoeléctricas, se han instalado calderas a base de mercurio.

2.2.12 Sistema de circulación

La mayoría de las calderas trabaja con circulación natural. En algunas se utiliza la circulación forzada (o circulación positiva), en cuyo sistema el fluido de operación es forzado totalmente a través de la caldera, o se aplica una recirculación parcial controlada.

2.2.13 Posición del hogar

La localización del fogón con relación a la caldera, puede ser interno o externo según las consideraciones siguientes:



El hogar es interno si la cámara en la que se desarrolla la combustión está totalmente rodeada por superficies enfriadas por agua.

El fogón es de combustión externa, si éste es auxiliar a la caldera o si está debajo de la misma.

La mayoría de las calderas que se manufacturan en la actualidad son de hogar interno.

2.2.14 Tipo del fogón

La caldera puede ser descrita según el tipo de fogón, por ejemplo, escocesa, de horno holandés, abierta, gemela, etc.

2.2.15 Forma general

Calderas de tubos de humo, tubulares, horizontales de retorno de fogón de caja corta, compactas, de locomotora, de tubos verticales del tipo portátil, del tipo escocés, así como unidades residenciales.

Calderas de tubo de agua (acuotubulares), en sus dos formas, es decir, de tubos rectos y de tubos curvados. La caldera horizontal de tubos rectos suele tener un cabezal del tipo de caja, hecho de placas de acero, o un cabezal en secciones, en el cual cada sección conecta los tubos de una hilera vertical sencilla. La caldera de tubos curvados va dotada de uno a cuatro domos. Si el domo se dispone paralelo a los tubos, la caldera es de domo longitudinal; si está dispuesto en forma transversal, la caldera es de domo transversal o cruzado. Si el fogón está encerrado entre superficies enfriadas por agua, se le llama fogón de paredes de agua.

2.2.16 Nombre registrado del fabricante

Muchos fabricantes imprimen a cada tipo de caldera su propio nombre. En algunos casos estos nombres, aunque son de propiedad registrada, pasan al dominio general para indicar el tipo de alguna caldera.

Con frecuencia el nombre del inventor o fabricante se convierte en el indicativo de cierto tipo de diseño de calderas, por ejemplo, Benson, Loeffler, LaMont, Sulzer, Velox (calderas de circulación forzada); Babcock, Gallo way, Manning, Thornycraft, Wilcox y Yarrow (nombres históricos).



2.2.17 Propiedades especiales

La caldera de magazín tiene un depósito de almacenamiento, que alimenta el carbón a las parrillas del fogón por gravedad. La caldera de tubo antracítico, es una unidad adaptada especialmente para quemar antracita. Calderas tubulares de cobre, con serpentines de tubos de cobre de forma sinuosa o a manera de horquillas, se fabrican para quemar aceites combustibles o gas. Existen otras muchas variedades, tales como las calderas de tubos concéntricos, calderas con quemadores en la tapa superior y otras similares. Una caldera instantánea tiene una capacidad de agua relativamente reducida y una dosificación de fuego alta.

Fuego diferencial y fuego tangencial, son términos descriptivos relacionados con la posición y operación de los quemadores. Fogones gemelos, derivación del gas, atemperación y recirculación de gas son términos relacionados con los métodos de construcción que permiten controlar la temperatura y la presión de la caldera, bajo diferentes condiciones de carga. La doble circulación se utiliza para evitar que el vapor de agua arrastre vapores silicosos. Las unidades a sobrepresión y supercargadas tienen una cámara de combustión que opera bajo una presión positiva.

2.3. Problemática en los equipos generadores de vapor.⁴

Los problemas más comunes en los equipos generadores de vapor que producen los parámetros que se trataron en el capítulo anterior se describen a continuación:

2.3.1 Incrustación

Una caldera libre de incrustación proporciona un rendimiento eficiente, lo cual redundará en ahorros en tiempo y dinero en la operación y el mantenimiento de la misma, y por si fuera poco brinda seguridad. Los responsables de la incrustación son las sales de calcio y magnesio presente en mayor o menor grado en todas las fuentes del agua. Las incrustaciones traen consigo diversos problemas entre los que se encuentran:

⁴ GERMAIN L, COLAS L, ROUQUET J, *Tratamiento de las aguas, redes de distribución de aguas potables e industriales, alimentación de calderas de vapor y circuitos de refrigeración*, México: Ediciones Omega, S.A., p. 14-30.



Reduce la eficiencia en la transferencia de calor, aumenta dramáticamente la presión del cabezal, aumenta el consumo del combustible, debido al sobrecalentamiento de las piezas metálicas los tubos pantalla sufren deformaciones y provoca fallas, pudiendo llegar al caso extremo de provocar una explosión, paros in-necesarios por mantenimiento correctivo, lo que con lleva: gastos en mano de obra y en desincrustaciones químicas o mecánicas.

2.3.2 Corrosión

La corrosión es debida a bajos valores de PH, y a la presencia de acidez mineral libre (H_2SO_4 y HCl), bióxido de carbono, etc. Los principales problemas que presenta la corrosión se describen a continuación:

Provoca adelgazamiento de las partes metálicas, paros innecesarios por mantenimiento correctivo, cambio de fluxes completos, forma depósitos aislantes en tuberías, da mal aspecto al agua del sistema

2.3.3 Fragilización cáustica

La fragilización cáustica es provocada por valores de pH superiores a 12.5 como resultado del alto contenido de sólidos totales disueltos (STD) y/o contaminantes con álcalis. La única forma de controlar el contenido de STD es mediante purgas intermitentes o continuas, ya sea de nivel o de fondo.

2.3.4 Oxidación

El fenómeno de oxidación es debido al oxígeno presente en el agua.

2.3.5 Formación de lodos

Si se rompe el equilibrio entre residual de tratamiento y los STD, y el contenido de estos últimos es muy elevado los sólidos comienzan a precipitarse formando lo que se conoce como lodos. Los lodos pueden formar taponamientos en las tuberías y obstruirlas

2.3.6 Arrastre o vómito

Se dice que en la caldera existe arrastre cuando en el condensado existe STD (dureza, cloruros, sulfatos). El arrastre suele ocurrir cuando el contenido de STD es muy elevado, o cuando el diseño de la salida de vapor de la caldera es incorrecto.



2.3.7 Contaminación del vapor/contaminación del condensado

Debido al arrastre o vómito de la caldera.

2.3.8 Formación de espuma

Es causada por alto contenido de bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos

2.3.9 Alta presión en el cabezal/mala transferencia de calor

Ocasionadas por incrustación de sales de calcio y magnesio.

2.4. Calidad de agua recomendada para calderas

En las tabla 7 y 8 se presenta la calidad de agua de suministro a calderas extraídas de diferentes referencias.

Tabla 7. Límites recomendados para los constituyentes del agua que se usa en calderas⁵

Presión Lb/in ²	Total de sólidos disueltos (mg/L)	Alcalinidad (mg de CaCO ₃ /L)	Dureza (mg de CaCO ₃ /L)	Sílice (mg/L)	Turbidez (NTU)	Aceite (mg/L)	Fosfato Residual (mg/L)
0-300	3500	700	0	100-60	175	7	140
301-450	3000	600	0	60-45	150	7	120
451-600	2500	500	0	45-35	125	7	100
601-750	2000	400	0	35-25	100	7	80
751-900	1500	300	0	25-15	75	7	60
901-1000	1250	250	0	15-12	63	7	50
1001-1500	1000	200	0	12-2	50	7	40

⁵ PERRY, ROBERT H., *Manual del Ingeniero Químico*, 3^a ed, México: Mc Graw Hill, 1992.



Tabla 8. Límites máximos permisibles en agua de suministro a calderas⁶

PARAMETRO	BAJA PRESIÓN (< 11.6 kg/cm ²)	PRESIÓN INTERMEDIA (11.6-50.2 kg/cm ²)	ALTA PRESIÓN (>50.2 kg/cm ²)
Alcalinidad (mg de CaCO ₃ /L)	350	100	40
Aluminio (mg/L)	5	0.1	0.01
Bicarbonato (mg/L)	170	120	48
Calcio (mg/L)	A	0.4	0.01
Cobre (mg/L)	0.5	0.05	0.05
DQO (mg/L)	--	5	1.0
Dureza (mg de CaCO ₃ /L)	350	1.0	0.07
Hierro (mg/L)	1	0.3	0.05
Magnesio (mg/L)	A	0.25	0.01
Manganeso (mg/L)	0.3	0.1	0.01
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	0.1	0.10	0.1
Oxígeno disuelto (mg/L)	2.5	0.007	0.0007
pH	7-10	8.2-10	8.2-9
SDT (mg/L)	700	500	200
Sílice (mg/L)	30	10	0.7
SST (mg/L)	10	5	0.5
Zinc (mg/L)	0.01	0.01	--

⁶ TCHOBANOGLOUS GEORGE, *Wastewater engineering: Treatment, disposal, and reuse/Metcalf & Eddy*, 3^a ed, New York: Mc Graw Hill, 1991, p. 1334.



CAPITULO III

TECNOLOGÍAS DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA

3. TECNOLOGIAS DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA

La finalidad del presente capítulo es dar a conocer los fundamentos teóricos de las tecnologías de desmineralización de agua como son ósmosis inversa, intercambio iónico, electrodiálisis y electrodesionización.

Las tecnologías que se encuentran actualmente en el mercado y son factibles de implementar a procesos industriales, cada una de ellas posee funcionamientos, características, y ventajas e inconvenientes diferentes que se abordarán en este capítulo.

3.1. MEMBRANAS

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado.

La rápida expansión, a partir de 1960, de la utilización de membranas en procesos de separación a escala industrial ha sido propiciada por dos hechos: la fabricación de membranas con capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado y la fabricación de dispositivos compactos, baratos y fácilmente intercambiables donde disponer grandes superficies de membrana¹.

3.1.1 Características de los procesos de separación con membranas

Permiten la separación de contaminantes que se encuentran disueltos o dispersos en forma coloidal, eliminan contaminantes que se encuentran a baja concentración, las operaciones se llevan a cabo a temperatura ambiente, procesos sencillos y diseños compactos que ocupan poco espacio, pueden combinarse con otros tratamientos, no eliminan realmente el contaminante, únicamente lo concentran en otra fase, pueden darse el caso de incompatibilidades entre el contaminante y la membrana, problemas de ensuciamiento de la membrana: necesidad de otras sustancias para llevar a cabo la limpieza, ajustes de pH, ciclos de parada para limpieza del equipo,

¹ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.63. M-30985-2006



deficiente escalado: doble flujo-doble de equipos (equipos modulares), ruido generado por los equipos necesarios para conseguir altas presiones

3.1.2 Tipos de membranas²

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

3.1.2.1 Membranas microporosas

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

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

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

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

3.1.2.2 Membranas densas

Estructuras sin poros donde el paso de las sustancias a través de la membrana sigue un modelo de solución-difusión, en el que los componentes de la solución se disuelven en la membrana y posteriormente se difunden a través de ella. La diferente solubilidad y difusividad de los componentes de la solución en la

² CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.64. M-30985-2006

membrana permiten la separación de sustancia del tamaño de moléculas e iones. Debido a las fuertes presiones a las que tienen lugar estos procesos las membranas son de tipo anisótropo. La ósmosis inversa es uno de los procesos que utilizan este tipo de membranas.

3.1.2.3 Membranas cargadas eléctricamente

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

3.1.2.4 Membranas anisótropas

Las membranas anisótropas son estructuras laminares o tubulares donde el tamaño de poro, la porosidad o la composición de la membrana cambia a lo largo de su espesor.

Están constituidas por una delgada película (densa o con poros muy finos) soportada en otra más gruesa y porosa, de tal forma que la primera es la responsable del proceso de separación y la segunda aporta al sistema la suficiente resistencia mecánica para soportar las condiciones de trabajo. La película responsable del proceso de separación y la que aporta la resistencia mecánica pueden estar fabricadas con el mismo material (membranas de Loeb-Sourirajan) o con materiales diferentes (membranas de tipo composite).

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



3.1.3 Configuraciones³

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

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

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

El desarrollo de materiales para la fabricación de membranas que permitan separaciones eficientes y su disposición en configuraciones o módulos de fácil instalación y sustitución que puedan agruparse para conseguir superficies filtrantes de centenas o millares de m², ocupando volúmenes aceptables, han sido los hechos que han condicionado la utilización de membranas a escala industrial.

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

Cartuchos de membranas, donde las membranas, convenientemente plegadas, se enrollan alrededor del colector de permeado, empaquetándose en una carcasa de 25 cm de longitud y 6 cm de diámetro que se disponen en línea con el flujo que se desea tratar, quedando los contaminantes retenidos en la membrana y generándose un efluente depurado (permeado). En estas disposiciones se consiguen desarrollos superficiales del orden de 0.3 m². Los cartuchos de membranas son desechables (figura 4).

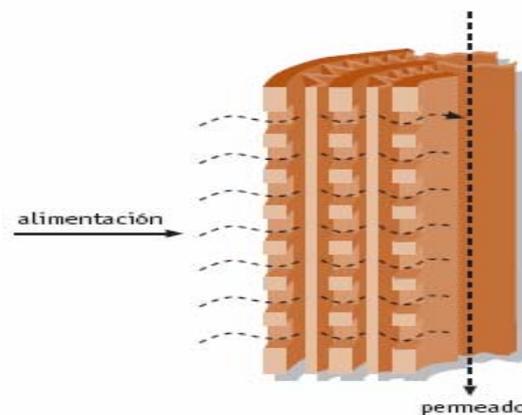


Figura 4. Representación de un cartucho de membrana⁴

³ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.65. M-30985-2006

⁴ Idem. p.66

Módulos tipo placa-bastidor, tiene una disposición semejante a los filtros-prensa. Las membranas se disponen en bastidores separados por placas. La alimentación, impulsada por una bomba, circula por los espacios placa-membrana, concentrándose en contaminantes conforme tiene lugar el flujo de permeado a través de las paredes de las membranas. La figura 5 presenta dicho tipo de modulo.

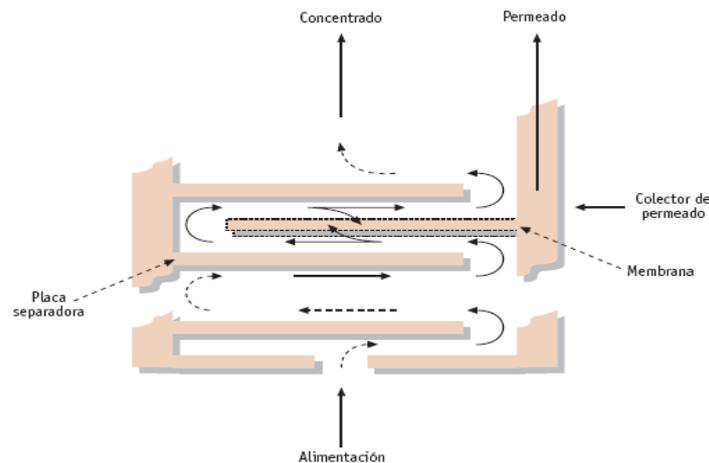


Figura 5. Representación de módulos tipo placa-bastidor⁵

Módulos de membranas tubulares, constituidos por carcassas cilíndricas que contienen un número variable de membranas tubulares. La alimentación se bombea por el interior de las membranas, produciéndose un flujo lateral de permeado a través de las paredes. La carcasa tiene los dispositivos adecuados para recoger los flujos de permeado y concentrado. Las membranas tubulares están constituidas por un soporte poroso de papel o fibra de vidrio sobre el que se deposita la superficie filtrante. También se construyen en materiales cerámicos.

Los módulos tubulares suelen tener longitudes de 13 cm – 20 cm, con 4 – 6 membranas de 0.5 cm – 1 cm de diámetro, dispuestas en su interior. La velocidad de circulación de la alimentación por el interior de las membranas es de 2 m/s – 6 m/s, lo que se traduce en pérdidas de carga de 14 – 21 kPa por módulo. El consumo de energía de las plantas que utilizan este tipo de módulos es del orden de 0.8 – 2.5 kWh/100 L permeado.

⁵ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.67. M-30985-2006

Módulos de membranas enrolladas en espiral, estructura compleja donde una membrana en forma de “bolsa plana”, con un separador interno de las paredes de la membrana, se enrolla en espiral alrededor del tubo colector de permeado, con el que se une por la parte abierta de la “bolsa”. Las paredes exteriores de la membrana, que forman las espirales, se encuentran separadas por estructuras huecas que permiten que la alimentación discurra a través de ellas y que el permeado fluya, lateralmente, a través de las paredes de las membranas. Estos módulos suelen tener 20 cm de diámetro y 100 cm de largo con varias membranas enrolladas que proporcionan una superficie de membrana de 1 – 2 m². Este tipo de membrana se presenta en la figura 6.

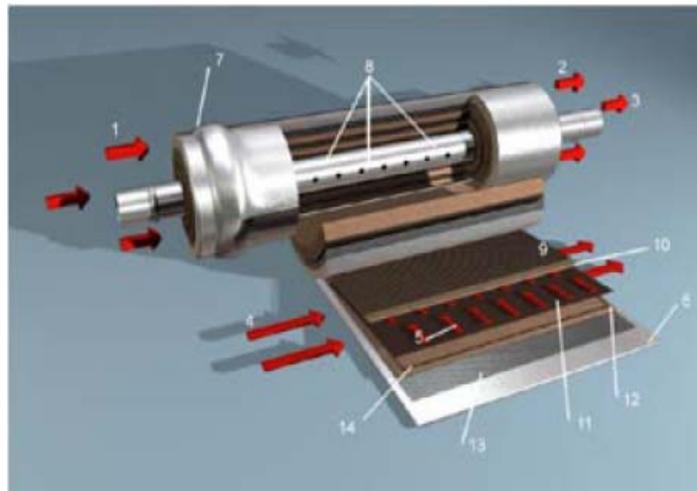


Figura 6. Membrana enrollada en espiral⁶

(1) Agua de alimentación (2) Rechazo (3) Salida de agua permeada (4) Flujo de agua (5) Flujo de agua permeada (6) Material de protección (7) Junta de estanqueidad entre módulo y envoltorio (8) Perforaciones de recogida de agua permeada (9) Espaciador (10) Membrana (11) Colector de agua permeada (12) Membrana (13) Espaciador (14) Línea de soldadura de las dos membranas

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

En la Tabla 9 se presentan las características más significativas de este tipo de disposiciones.

⁶ DEPARTAMENTO TECNICO DE RG SYSTEMS, *Fundamentos de la ósmosis inversa*, Zaragoza (España), 2002, p.14

Tabla 9. Características de las membranas descritas anteriormente

Parámetros	Fibra hueca	Fibras capilares	Enrollado espiral	Placa-marco	Tubular
Costes producción	5-20	10-50	5-100	50-200	50-200
Control conc. Polarización-ensuciamiento	Pobre	Bueno	Moderado	Bueno	Muy bueno
Caída presión en zona de permeado	Alta	Moderada	Moderada	Baja	Baja
Presiones de trabajo	Si	no	si	si	Marginal
Materiales específicos de membrana	Si	si	no	no	no

3.1.4 Forma de operar de las membranas⁷

3.1.4.1 Filtración en línea

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

3.1.4.2 Filtración tangencial

El efluente que se desea tratar se hace circular tangencialmente a la membrana. Los contaminantes quedarán en la superficie de la membrana, siendo arrastrados por el flujo tangencial, evitándose el ensuciamiento de la membrana. Esta forma de operar genera a partir de la alimentación dos corrientes o flujos: *concentrado*, con una concentración de contaminantes mayor que en la alimentación, y *permeado*, con una concentración de contaminantes que hacen posible su vertido o reutilización. Las membranas utilizadas son de tipo *tamiz* o *densas*.

3.1.5 Factores que reducen las características de las membranas

El buen funcionamiento de una membrana se consigue cuando se mantiene el flujo de permeado (J_w) y el coeficiente de rechazo (R) dentro de las condiciones de diseño de la operación, o sea, sin grandes modificaciones en la

⁷ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.69. M-30985-2006



diferencia de propiedad (presión, potencial eléctrico) que genera el flujo de permeado.

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

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

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

$$\frac{\text{volumen_permeado}}{\text{unidad_superficie_membrana} * \text{unidad_tiempo}}$$

3.1.5.1 Polarización de la concentración

Tiene lugar en aquellos procesos que operan en la forma *filtración tangencial*, como es el caso de la *ósmosis inversa*. En las condiciones de trabajo de este proceso es difícil evitar que los componentes de la alimentación rechazados por la membrana no se acumulen en su superficie. El resultado es la creación de gradientes de concentración (*polarización de la concentración*) en el lado de la alimentación, que pueden disminuir la eficiencia de separación de la membrana y el flujo de permeado. La figura 7 representa la situación en la que un componente i de la alimentación, que es rechazado por la membrana, se acumula en su superficie, creándose un gradiente de concentración localizado en una película de espesor, próximo a la membrana.

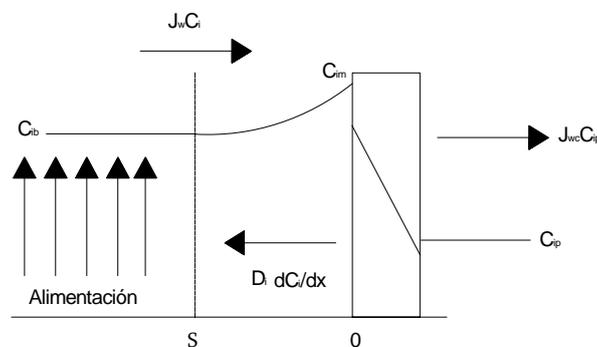


Figura 7. Representación de rechazo de membrana

El flujo difusivo de componente i ($D_i * \frac{dC_i}{dx}$), generado por el gradiente de concentración, se opone al flujo convectivo creado por la diferencia de presión transmembrana, comportándose como una resistencia adicional que contribuye a disminuir el flujo de permeado.

El balance de componente i en el volumen de espesor, cuando se llega a un estado estacionario, donde cesa la acumulación de componente i en la superficie de la membrana, daría el siguiente resultado

$$J_w C_i - J_w C_p + D_i = \frac{dC_i}{dx} = 0$$

Resolviendo para

$$C_i = C_{ib} \rightarrow x = \delta$$

$$C_i = C_{im} \rightarrow x = 0$$

$$J_w = \frac{D_i}{\delta} \ln \frac{C_{im} - C_{ip}}{C_{im} - C_{ib}} \rightarrow J_w = \frac{D_i}{\delta} \ln \frac{\frac{C_{im}}{C_{ib}} - \frac{C_{ip}}{C_{ib}}}{1 - \frac{C_{ip}}{C_{ib}}}$$

Como se desprende de la expresión final de J_w , para unas condiciones de operación dadas: coeficiente de rechazo (R), condiciones fluidodinámicas (δ) y viscosidad, temperatura y naturaleza de la sustancias (factores estos últimos que condicionan D_i); el máximo flujo de permeado (J_w) se conseguirá cuando c_{im} alcance un valor máximo, que será el de la solubilidad de i en el gel de la película adyacente a la superficie de la membrana. En estas condiciones, un aumento de la diferencia de presión transmembrana no aumentaría el flujo de permeado (J_w), únicamente aumentaría el espesor de la película, pudiendo llegar a compactarla, lo que disminuiría aún más el flujo de permeado e incluso producir un deterioro irreversible en la membrana.

Una polarización de la concentración elevada aumentará la presión osmótica en el lado de la alimentación, lo que también contribuiría la disminución del flujo de permeado. Además, si la concentración c_{im} es elevada se favorecerá la difusión del componente i a través de la membrana, lo que significaría una disminución del coeficiente de rechazo.

Esta forma de mal funcionamiento de la membrana depende de las condiciones de operación y no del tiempo de utilización de la membrana. La manera más



sencilla de evitar la polarización es aumentando la velocidad de paso de la alimentación, de tal forma que las turbulencias generadas arrastren a las sustancias depositadas en la superficie de la membrana.

3.1.5.2 Ensuciamiento⁸

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

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

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

⁸ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.72. M-30985-2006



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

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

3.2. Ósmosis inversa⁹

La ósmosis inversa (RO) es un proceso de alta presión que retiene virtualmente todos los iones y deja pasar el agua. La presión aplicada excede la presión osmótica de las sales contra una membrana semipermeable.

Igual que en otros procesos, la causa que genera la fuerza impulsora para lograr la separación de los iones es una diferencia de presión transmembrana. Sin embargo, en la RO el proceso de separación se debe a la diferente solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes de la solución acuosa. Los valores de operación de la diferencia de presión transmembrana y concentración de la solución son 7 – 70 bar y 200 – 30000 ppm, respectivamente.

3.2.1 Características del proceso¹⁰

La ósmosis es el proceso que tiene lugar cuando una membrana, con permeabilidad selectiva al agua, separa dos soluciones acuosas de distinta concentración, que se encuentran a la misma presión y temperatura. De forma natural el agua pasa (Figura 8) de la solución más diluida a la más concentrada a través de la membrana. El fenómeno cesa (Figura 8) cuando el aumento de

⁹ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.79. M-30985-2006

¹⁰ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.79. M-30985-2006



presión hidrostática, en el lado de la membrana de la solución más concentrada, supone una resistencia suficiente para impedir el paso del agua proveniente de la solución diluida. La diferencia de presión entre las dos soluciones, cuando se alcanza este estado de equilibrio, se denomina diferencia de presión osmótica transmembrana (Dp). Si lo que se pretende es invertir el flujo de agua generado por la ósmosis (Figura 8), es necesario aplicar, en el lado de la solución concentrada, una presión que origine una diferencia de presión transmembrana (Dp) superior a la presión osmótica. De esta forma se logra que el flujo de agua sea en el sentido de la solución concentrada a la solución diluida (RO), obteniéndose agua desionizada, a partir de soluciones acuosas, de calidad suficiente para ser utilizada en el consumo humano o en otras aplicaciones.

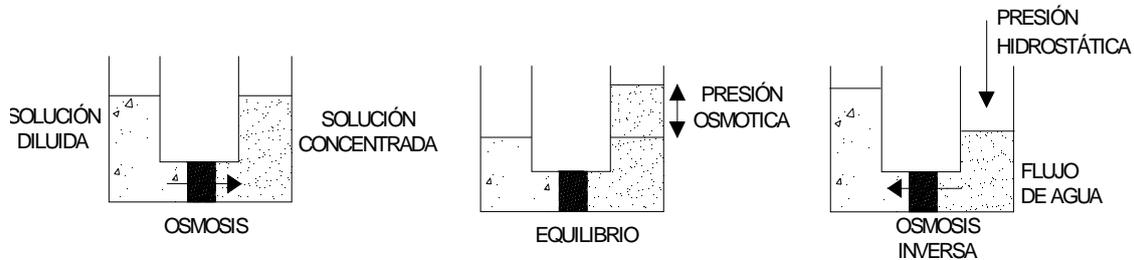


Figura 8. Proceso de ósmosis inversa

El flujo de agua (J_w) es función de las propiedades selectivas de la membrana y de las causas que lo producen: diferencia de presión transmembrana (Dp) y diferencia de presión osmótica ($D\pi$) transmembrana, según una expresión de la forma

$$J_w = A(\Delta p - \Delta \pi)$$

El coeficiente de proporcionalidad A (constante de permeabilidad del agua) depende de: permeabilidad de la membrana $D_w K_w / \Delta l$ difusividad y coeficiente de reparto del agua en la membrana/anchura de la membrana, respectivamente), volumen molar del agua (v_w), concentración del agua en la solución concentrada (c_{ow}) y temperatura (T), según la expresión

$$A = \frac{D_w K_w C_{ow} V_w}{\Delta l R T}$$

Donde R es la constante de los gases perfectos.

Aunque menor que J_w , también tendrá lugar un flujo de la solución concentrada a la diluida, que se estimará según ecuaciones del tipo.

$$J_i = B(C_{if} - C_{iw})$$

Siendo $(C_{if}-C_{iw})$: diferencia de concentraciones de la sal en la solución concentrada (alimentación) y el permeado, la fuerza impulsora del flujo, y B el coeficiente de permeabilidad de la sal.

La diferencia de presión transmembrana (Dp), temperatura (T) y concentración salina de la alimentación (C_{if}) condicionan los parámetros más importantes del proceso: flujo de agua (J_w) y coeficiente de rechazo (R).

En términos generales y para una alimentación con una concentración de sal determinada, el incremento de la diferencia de presión transmembrana mantiene una relación lineal con el aumento de flujo de agua. El aumento de presión transmembrana también provoca un aumento del coeficiente de rechazo, aunque en este caso el incremento de R tiende a un valor asintótico, generalmente superior al 99 %.

El aumento de la concentración de la sal en la alimentación, a una T y Dp determinadas, provoca una disminución del flujo de agua, ya que aumenta la diferencia de presión osmótica transmembrana, disminuyendo la fuerza impulsora ($\Delta p - \Delta \Pi$) que lo genera. En cuanto al coeficiente de rechazo, éste también disminuye debido al aumento de la fuerza impulsora ($C_{if}-C_{iw}$) que favorece el flujo transmembrana de la sal.

La temperatura guarda una relación más compleja con R y J_w . Su incremento provoca una disminución del coeficiente de rechazo y un aumento del flujo de agua, ya que tanto el coeficiente A como el B aumentan con ella.

3.2.2 Tipo de Membranas usadas en la Ósmosis Inversa

En ósmosis inversa se utilizan membranas densas, anisótropas, en configuraciones del tipo módulos enrollados en espiral, de 20 cm – 30 cm de diámetro y 100 - 150 cm de largo; que se disponen en número de 5 – 7 en el interior de carcasas de plástico reforzadas con fibra de vidrio. También se utilizan membranas del tipo fibra hueca, de 100 mm de diámetro, dispuestas en módulos que contienen 1000 unidades. La elección del tipo de membranas dependerá de las características del agua a tratar, ya que las configuraciones con membranas tipo fibra hueca presentan mayores problemas de ensuciamiento que las configuraciones tipo enrollamiento en espiral.



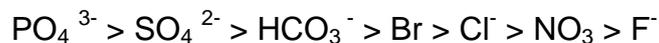
En la Tabla 10 se muestran los materiales y el tipo de membranas utilizadas en los procesos de ósmosis inversa.

Tabla 10. Materiales y tipo de membranas

Material	Tipo de membrana	Coefficiente de rechazo (%)	Presiones de trabajo (bar)	Flujo de agua tratada (L/m ² h)
Acetato de celulosa (40% de acetato)	Loeb - Sourirajan	95-98	50-90	15-30
Poliamidas aromáticas	Loeb - Sourirajan	>99.5		0.5 - 1.34
Nanofiltración Polisulfonas/alcohol polivinílico	Loeb - Sourirajan	20-80	3.5-14	Aceptables
Polietilenamina/tolueno	composite	> 99	100	8
FT-30/SW-30	Composite	99.3 - 99.5	55	
Fenilendiamina/cloruro de trimesolil		> 99	15	11

Las prestaciones de las membranas utilizadas en RO, según Rautenbach y Albretch, se pueden resumir en los siguientes puntos:

Los iones multivalentes se retienen mejor que los monovalentes, siendo su clasificación de mayor a menor coeficiente de rechazo la que se muestra



Los gases disueltos como amoníaco, dióxido de carbono, dióxido de azufre, oxígeno, cloro y sulfuro de hidrógeno tienen una buena permeabilidad.

El rechazo de los ácidos y las bases débiles es mayor a valores de pH donde están en su forma ionizada.

El rechazo de las moléculas orgánicas neutras aumenta con el peso molecular, compuestos con pesos moleculares por encima de 100 D presentan valores altos del coeficiente de rechazo. La naturaleza del material de la membrana tiene una influencia importante en el valor de este parámetro.

Se han observado valores negativos del coeficiente de rechazo en solutos como el fenol y benceno en membranas de celulosa acetato.

3.2.3 Problemas específicos de ensuciamiento¹¹

Debido a los altos valores de rechazo de los procesos de RO, el ensuciamiento es la causa más importante del mal funcionamiento de las membranas. Las

¹¹ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.83. M-30985-2006



causas más frecuentes del ensuciamiento son debidas a *i)* depósitos en la superficie de la membrana de costras o escamas de carbonato cálcico, sulfato cálcico, silicatos complejos, sulfato de bario, sulfato de estroncio, fluoruro cálcico, etc., dependiendo de la composición de la alimentación y como consecuencia de que las concentraciones de iones en el concentrado puedan sobrepasar el producto de solubilidad; *ii)* sedimentos de partículas como coloides, productos de la corrosión del hierro de las conducciones, precipitados de hidróxido de hierro, algas, etc.; *iii)* bioensuciamiento debido al crecimiento de microorganismos en la superficie de la membrana, ya que algunos materiales de las membranas, como acetato de celulosa o poliamidas, pueden ser un sustrato utilizable por los microorganismos y *iv)* ensuciamiento debido a compuestos orgánicos como aceites o grasas presentes en las aguas residuales industriales.

La forma de limpieza de las membranas estará en función de las características del agua de alimentación, del tipo de membrana y de la naturaleza del ensuciamiento, como pauta general se puede proceder a alternar periodos de enjuagado de las membranas, haciendo circular las soluciones limpiadoras a alta velocidad por la superficie de las membranas, con periodos donde las membranas queden sumergidas en las soluciones limpiadoras.

Los agentes de limpieza habitualmente utilizados son *i)* ácidos clorhídrico, fosfórico o cítrico y agentes quelantes como EDTA, para eliminar las costras de precipitados salinos, y ácido oxálico para eliminar los sedimentos de hierro *ii)* álcalis combinados con surfactantes para eliminar microorganismos, sedimentos y compuestos orgánicos y *iii)* esterilización de las membranas con soluciones de cloro para eliminar microorganismos.

Las sucesivas limpiezas terminan por degradar las membranas. Dependiendo de la aplicación, el periodo de vida garantizado por el fabricante suele ser de 1 – 2 años. Con un buen programa de limpieza la vida de las membranas se puede prolongar hasta 3 años, siendo improbables periodos de vida de 5 años.

Aplicaciones

Los objetivos de las plantas de RO instaladas se distribuye de la siguiente forma: 50 % en desalinización de agua de mar y agua salobre; 40 % en la producción de agua ultrapura para las industrias electrónica, farmacéutica y de

producción de energía; 10 % como sistemas de descontaminación de aguas urbanas e industriales.

3.2.4 Producción de agua ultrapura

La RO permite obtener a partir del agua de consumo (concentración de sólidos disueltos < 200 mg/L) agua de la calidad exigida en la industria. El principal problema en este tipo de instalaciones es el bioensuciamiento de las membranas, por lo que es necesario la instalación de sistemas de esterilización mediante radiación UV. En la Tabla 11 se comparan las características exigidas al agua de consumo y al agua ultrapura.

Tabla 11. Comparación de agua ultrapura y de consumo

	Agua ultrapura	Agua de consumo
Resistividad (25°C $\mu\text{S}/\text{cm}$)	18.2	-
TOC (ppb)	< 5	5000
Partículas/L (láser<0.1 mm)	<100	-
Bacterias/100 mL	<0.1	30
Especies disueltas en ppb		
Sílice (ppb)	<3	3000
Boro (ppb)	<1	40
Na ⁺ (ppb)	<0.01	3000
K ⁺ (ppb)	<0.02	2000
Cl ⁻ (ppb)	<0.02	10000
Br ⁻ (ppb)	<0.02	-
NO ₃ ⁻ (ppb)	<0.02	-
SO ₄ ²⁻ (ppb)	<0.02	15000
Iones totales	<0.1	<10000

3.3. Intercambio iónico

3.3.1 Resinas de intercambio iónico

Los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga, conocidas como iones. Estos iones están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas, y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento, calefacción, generación de vapor, y manufactura. Los iones comunes que se encuentran en la mayoría de las aguas incluyen los cationes de carga positiva; calcio y magnesio (cationes que generan dureza, los cuales hacen que el agua sea “dura”) y sodio. Los aniones



de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfato, cloruro, y silicio. Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de estas impurezas por varias razones: las resinas poseen una alta capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y se regeneran fácilmente, los efectos de la temperatura son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto para grandes como pequeñas instalaciones.¹²

3.3.2 Síntesis

La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo está presente un agente flotador para mantener todo disperso. El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución de agua/sustancia química orgánica. El estireno/ DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotitas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño de más o menos un milímetro. En ese momento inicia la reacción de polimerización a través de la adición de peróxido de benzoilo, el cual hace que las moléculas de estireno/DVB formen las esferas pequeñas de plástico que resultan. El divinilbenzeno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fortaleza física, y sin el cual el estireno sería soluble en el agua. La esfera de poliestireno-DVB necesita ser químicamente activada para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera. Cada grupo activo posee una carga eléctrica fija, la cual es balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta, los cuales tienen la libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga. Las resinas catiónicas fuertes se forman tratando a las esferas con ácido sulfúrico concentrado (un proceso conocido como sulfonación) para formar grupos sulfónicoácidos permanentes, de carga negativa, a través de las esferas. Aquí es importante el hecho de que los sitios

¹² AVILLA A. JOSEPH, *Lo esencial acerca del intercambio iónico*, XXV Conferencia anual de la Water Quality Association (WQA), 1999.



de intercambio formados de tal manera se encuentran ubicados a través de la esfera. El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99% de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de la esfera.

Las resinas aniónicas fuertes se activan en un proceso de dos pasos que consiste en la clorometilación seguida de la aminación. Este proceso de dos pasos comienza con el mismo material de estireno/DVB que se usa para las resinas catiónicas. La única diferencia es que la cantidad de DVB que se utiliza es menor para permitir una esfera más porosa. El primer paso de la reacción es la ligación de un grupo de clorometilo a cada uno de los anillos de benceno en la estructura de la esfera. Este material plástico intermedio clorometilado debe reaccionar con una amina en un proceso conocido como aminación. El tipo de amina utilizada determina la funcionalidad de la resina. Una amina comúnmente utilizada es la trimetilamina (TMA), que crea un intercambiador aniónico fuertemente básico de Tipo 1. El uso de dimetiletanolamina (DMEA) producirá una resina aniónica de Tipo 2.¹³

3.3.3 Estructura física y química de las resinas

Los requisitos básicos de los materiales de las esferas de intercambio iónico son la insolubilidad, el tamaño de la esfera, y su resistencia a las fracturas. La resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de funcionamiento. Las esferas deberán tener dimensiones uniformes con un tamaño normal que varía entre 16 y 50 "US Mesh" (tamaño estadounidense de malla). El hinchamiento y contracción de la esfera de resina durante el agotamiento y la regeneración no deberán causar que revienten las esferas. Asimismo, una propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera. Las resinas de intercambio iónico pueden ser fabricadas en una de dos estructuras físicas, gelatinosa o macroporosa. Las resinas gelatinosas son polímeros homogéneos entrecruzados y son las resinas más comúnmente disponibles. Éstas tienen sitios de intercambio distribuidos de manera pareja a través de la esfera. La cantidad de entrecruzamiento de DVB que se utiliza en la síntesis de una esfera determina

¹³ AVILLA A. JOSEPH, *Lo esencial acerca del intercambio iónico, XXV Conferencia anual de la Water Quality Association (WQA)*, 1999.



su fortaleza relativa. La resina catiónica de ácido fuerte que se usa para la suavización, la cual es el medio más común de intercambio iónico, consiste casi siempre de un material gelatinoso de 8% DVB. Se ha comprobado que la cantidad de DVB que contiene esta resina es la más económica en términos de precio de la resina y duración esperada de funcionamiento. Actualmente se encuentran disponibles resinas con un contenido de DVB entre 2% y 20% y aún más. Un mayor contenido de DVB le da aun más fortaleza a la resina, pero el entrecruzamiento adicional puede obstruir la cinética, haciendo que la esfera sea demasiado resistente a la contracción e hinchamiento que son necesarios durante el funcionamiento normal. Las resinas macroporosas fueron introducidas comercialmente en 1959 y están hechas con grandes poros que permiten el acceso a sitios interiores de intercambio. También se conocen como resinas macroreticulares o de poros fijos. Las resinas macroporosas son fabricadas a través de un proceso que deja una red de vías a través de la esfera. Esta estructura con apariencia esponjosa permite que la porción activa de la esfera contenga un nivel elevado de entrecruzamiento de DVB sin afectar la cinética del intercambio. Desafortunadamente, también significa que la resina tiene una menor capacidad porque las esferas contienen menos sitios de intercambio. Los "poros" pueden ocupar entre 10% y 30% del polímero. Esto reduce proporcionalmente la capacidad de intercambio iónico. Las resinas gelatinosas por lo general tienen mayores eficiencias de funcionamiento y son de menor costo. Un macroporo proporciona mejor estabilidad física, principalmente debido a su estructura con apariencia esponjosa, que libera la presión de mejor manera. Asimismo elimina parte del rompimiento que puede ocurrir debido a la presión osmótica. Mientras mayor sea el área en una resina aniónica macroporosa, mejor será su resistencia a la incrustación. En una resina catiónica, un mayor nivel de entrecruzamiento proporciona mejor resistencia a la oxidación. Existen dos tipos principales de estructuras químicas, estirénicas y acrílicas. Los materiales a base de estireno descritos anteriormente son hidrocarburos aromáticos.

Las resinas acrílicas son hidrocarburos de cadena recta basadas en poliácido acrílico y polimetacrilato. El DVB aún se utiliza como entrecruce en estas resinas, pero los acrílicos difieren de los estirénicos en que el sitio de intercambio activo es parte de la estructura física. Esto significa que sus estabilidades físicas y



químicas están entrecruzadas. Cuando una resina acrílica se degrada químicamente, ocurre por lo general en el sitio de intercambio, que es el eslabón más débil. Esto destruye la estructura física. Cuando se oxida una resina acrílica, ésta se hinchará y ablandará.

3.3.4 Selectividad de resinas

La selectividad o afinidad de resinas de intercambio iónico es influida por las propiedades de la esfera, los iones intercambiados, y la solución en la cual están presentes los iones.

El agua es un componente esencial en las resinas de intercambio iónico. Por ejemplo, las resinas catiónicas de ácido fuerte contienen más o menos 50% de humedad. La cantidad de entrecruzamiento de la esfera tiene un impacto sobre el contenido de humedad de la esfera, y por su parte, el contenido de humedad tiene un impacto sobre la selectividad. Una esfera con un alto contenido de humedad tiene alta porosidad y los grupos activos se encuentran más separados uno del otro. Las resinas de intercambio iónico por lo general tienen una mayor selectividad hacia los iones de mayor valencia o carga. Entre los iones con una misma carga se encuentran mayores afinidades hacia los iones con un número atómico más alto. Estas relaciones de afinidad son revertidas en soluciones concentradas. Esto es lo que hace posible la regeneración de las resinas agotadas. Una resina catiónica agotada que se utiliza para suavizar por lo general se encuentra en forma de calcio o magnesio, de los cuales ambos son iones bivalentes. La resina es restaurada a su condición regenerada, la forma del sodio, introduciendo una solución de 10% de cloruro de sodio. Esta solución de cloruro de sodio se encuentra lo suficientemente concentrada—100,000 partes por millón (ppm) como para revertir la selectividad. La fuerza impulsadora del ion monovalente de sodio luego convierte la resina a la forma de sodio.¹⁴

3.3.5 Cinética

La tasa de intercambio, o cinética, de las reacciones de intercambio iónico es gobernada por varios factores. La solución que está siendo tratada tiene un

¹⁴ AVILLA A. JOSEPH, *Lo esencial acerca del intercambio iónico*, XXV Conferencia anual de la Water Quality Association (WQA), 1999.



efecto; las concentraciones más altas de solución pueden acelerar la velocidad de la reacción. La cantidad de entrecruzamiento de DVB en la esfera determina la porosidad de la esfera y, además, la movilidad iónica dentro de la esfera. El tamaño de los iones que están siendo intercambiados también influye en la velocidad cinética y depende un tanto del tamaño de los poros en la estructura de la resina. El tamaño de la esfera también tiene un efecto; las esferas más pequeñas presentan una vía de difusión más corta hacia los sitios activos en la parte interior de las esferas. La resina tiene una mayor afinidad hacia los iones de mayor valencia, por lo que la predominancia de iones de alta valencia puede causar una mayor tasa de reacción. Otros elementos que influyen, incluyen la temperatura, la forma iónica de los sitios de intercambio, y la fortaleza de los sitios de intercambio. Una mayor temperatura puede acelerar las reacciones químicas. La reacción de intercambio es un proceso de difusión, por lo que la tasa de difusión en el sitio de intercambio iónico tiene algún efecto. Además, la fortaleza del sitio de intercambio, ya sea fuerte o débilmente ácido o básico, afecta la tasa de reacción.

3.3.6 Tipos de resinas de intercambio iónico

Resinas catiónicas de ácido fuerte: Las resinas catiónicas fuertemente acídicas derivan su funcionalidad de los grupos ácidos sulfónicos. Estos intercambiadores catiónicos de ácido fuerte funcionan a cualquier nivel de pH, dividen todas las sales, y requieren una cantidad sustancial de regenerante. Esta es la resina que se escoge para casi todas las aplicaciones de suavizado y como primera unidad en un desmineralizador de dos lechos, o como componente catiónico de un lecho mixto.

Resinas catiónicas de ácido débil: Las resinas catiónicas débilmente acídicas contienen grupos carboxílicos como sitios de intercambio. La resina es altamente eficiente, ya que es regenerada con casi 100% de la cantidad estequiométrica de ácido, comparado con el 200% a 300% requerido para los cationes de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una menor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo, temperaturas bajas, y una proporción entre la dureza y la alcalinidad menor de 1.0. Se utilizan muy efectivamente en combinación con una resina catiónica de ácido fuerte que funciona en forma de hidrógeno, ya sea en configuración de lecho separado o



lecho estratificado. En ambos casos, el agua influente se pone en contacto con la resina catiónica de ácido débil donde se eliminan los cationes que están asociados con la alcalinidad. Los cationes restantes son eliminados por la resina catiónica de ácido fuerte. La resina catiónica de ácido débil es regenerada con el ácido de desecho de la unidad de ácido fuerte, proporcionando un arreglo muy económico.

Resinas aniónicas de base fuerte: Las resinas aniónicas de basicidad fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario. Los dos grupos principales de resinas aniónicas de base fuerte son las de Tipo 1 y Tipo 2, dependiendo del tipo de amina que se utiliza durante el proceso de activación química. Químicamente, los dos tipos difieren en el tipo de especie de sitios de intercambio de amonio cuaternario que exhiben: los sitios de Tipo 1 tienen tres grupos de metilo; en los de Tipo 2, un grupo de etanol reemplaza a uno de los grupos de metilo. Las resinas de Tipo 1 son adecuadas para la eliminación total de aniones en todas las aguas. Son más difíciles de regenerar y se hinchan más al pasar de la forma de cloruro a la de hidróxido que las de Tipo 2. Son más resistentes a altas temperaturas y deben ser usadas en aguas de alta alcalinidad y alto contenido de silicio. Las resinas de tipo 2 también presentan la eliminación de todos los aniones, pero pueden ser menos efectivas en eliminar el silicio y dióxido de carbono de las aguas donde estos ácidos débiles constituyen más del 30% del total de aniones. Los aniones de Tipo 2 brindan mejores resultados en aguas que contienen predominantemente ácidos de minerales libres—cloruros y sulfatos—como en el efluente una unidad de catión seguida por un descarbonador. Las resinas de Tipo 2 que funcionan en forma de cloruro son típicamente usadas en desalcalinizadores.

Resinas aniónicas de base débil: Las resinas aniónicas de basicidad débil contienen el grupo funcional de poliamina, que actúa como adsorbedor de ácido, eliminando los ácidos fuertes—acidez de mineral libre—de la corriente del efluente de cationes. Esta resina débilmente ionizada es regenerada de manera eficiente por cantidades de base casi estequiométricas—tales como el hidróxido de sodio—que restauran los sitios de intercambio a la forma de base libre. El paso de regeneración es esencialmente una neutralización de los ácidos fuertes que son recolectados en la resina y puede usar desechos cáusticos de una unidad aniónica de base sólida. Las resinas aniónicas débiles



deben ser usadas en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio.

3.3.7 Configuraciones para tratamiento de intercambio iónico

El tratamiento de una disolución por medio de intercambio iónico se puede llevar a cabo mediante dos configuraciones distintas, en discontinuo o en columna.

Intercambio iónico en discontinuo. En las operaciones en discontinuo, se mezcla la resina de intercambio y la disolución en un recipiente hasta que el intercambio de iones alcanza el equilibrio. Esta configuración no puede aplicarse para devolver la resina a su forma iónica original, ya que el proceso de regeneración en discontinuo no es eficiente químicamente y requiere que la resina se recupere por decantación y transferirla a una columna para proceder a su regeneración; cabe destacar que este método, a pesar de ser muy eficiente, tiene pocas aplicaciones industriales.

Intercambio iónico en columna. Esta configuración es la que se emplea en los procesos de intercambio iónico. La resina de intercambio iónico se coloca en el interior de una columna vertical, a través de la cual fluye la disolución a tratar. El proceso global consta de varias etapas que a continuación se describirán.

Empaquetamiento de la columna: Consiste en introducir la resina en el interior de la columna evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para así obtener un lecho uniforme; esta operación se realiza habitualmente lavando el intercambiador con agua destilada, que además resulta útil para eliminar posibles impurezas y para provocar el fenómeno de swelling.

Acondicionamiento de la resina: En la etapa de acondicionamiento se procede a cambiar el contraión de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada del ión que se desea tener. Una vez que se ha conseguido este objetivo y la resina está en la forma iónica deseada, debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina con agua destilada.

Etapas de carga: En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar y la resina. La disolución a tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través de la resina. Las condiciones de operación como la velocidad de flujo, pH de la disolución entre otros dependerán del tipo de resina utilizada, y es importante optimizarlas para obtener un buen rendimiento



en cuanto a capacidad y selectividad. Cuando la resina comienza a estar saturada con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la disolución que sale de la columna, esta descarga de iones se conoce como "que fugan", e indica que el tratamiento de la disolución por el intercambiador ya no está siendo efectivo. Una vez la concentración de estos iones en la disolución de salida iguala a la de la concentración de entrada, el intercambiador ha agotado toda su capacidad de intercambio en las condiciones de operación.

Etapas de regeneración: La etapa de regeneración consiste en devolver la resina saturada a su forma iónica inicial, empleando una disolución concentrada en el ión originariamente asociado al intercambiador (por ejemplo, un ácido mineral para una resina ácida fuerte). Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento de las resinas en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente. Para obtener el máximo rendimiento de esta etapa es importante optimizar parámetros como son la concentración y volumen de disolución regenerante así como la velocidad de flujo. La regeneración tiene dos inconvenientes importantes. El gasto económico en regenerante. Puede reducirse reutilizándolo hasta que pierda su eficiencia aunque esta opción tampoco es del todo económica ya que implica establecer unas condiciones para su almacenaje. La generación de residuos, ya que después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas.

3.3.8 Modos de operación en el intercambio iónico en columna

En los procesos de intercambio iónico en columna se puede trabajar de dos modos distintos:

Las disoluciones de carga y de regeneración se introducen siempre por la parte superior de la columna.

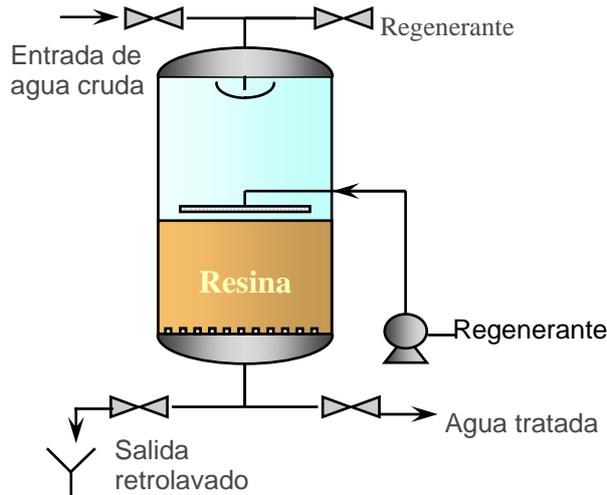


Figura 9. Esquematización de columna durante la carga

El regenerante se introduce en dirección opuesta a la disolución de carga, es decir, por la parte inferior de la columna. Este proceso se denomina, proceso en contracorriente

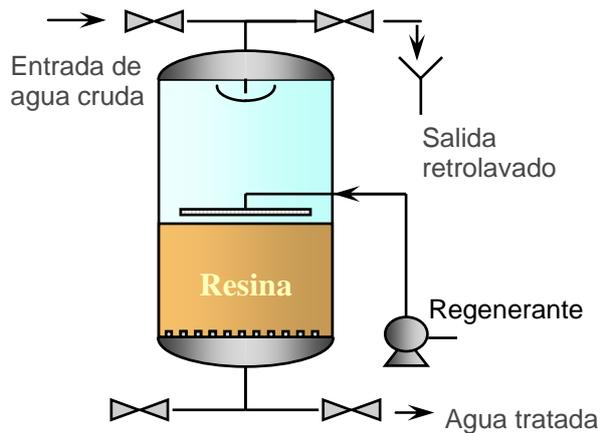


Figura 10. Esquematización de la regeneración de la columna

El procedimiento habitual es el primero, ya que supone un equipamiento económico con respecto al segundo; no obstante el primer procedimiento utiliza el regenerante menos eficientemente que el proceso en contracorriente, este último hace pasar el regenerante por la parte inferior y se fluidiza el lecho del intercambiador, de manera que se aumenta la superficie de contacto, la regeneración es más rápida y se requiere menos volumen de regenerante.

3.4. Electrodialisis¹⁵

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

Un equipo de electrodialisis está formado por un conjunto de membranas aniónicas y cationes, dispuestas en forma alterna, y separadas por espaciadores o placas. Los espaciadores provocan turbulencias que evitan las deposiciones de materiales en la superficie de las membranas y homogeneizan la concentración.

En la figura 11 se muestra un esquema de esta disposición.

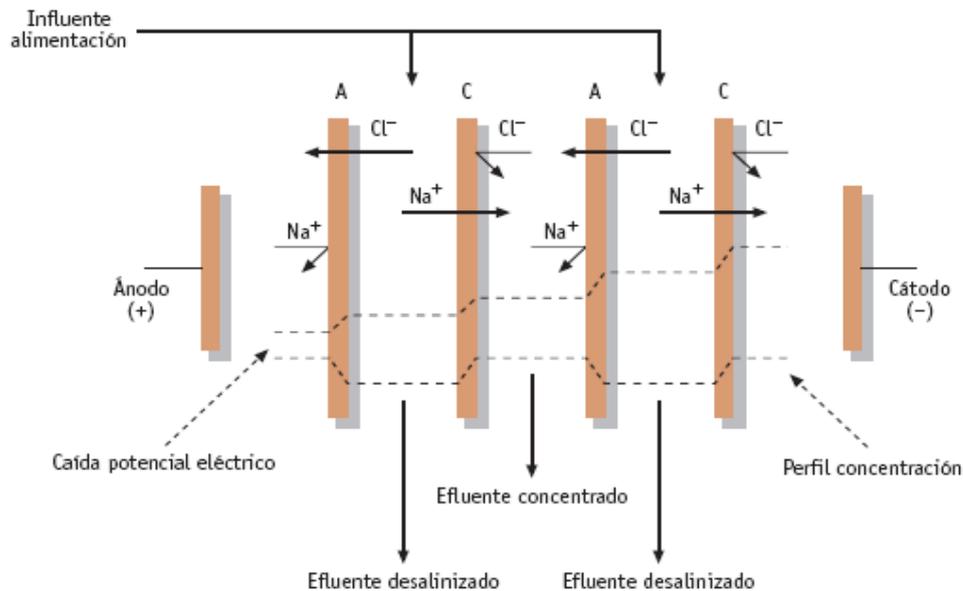


Figura 11. Equipo de Electrodialisis¹⁶

El agua que se desea tratar (alimentación) se hace fluir en dirección longitudinal a las membranas, y el campo eléctrico creado por la diferencia de potencial provoca un flujo transversal de los iones positivos hacia el cátodo y de los iones negativos hacia el ánodo. Las membranas aniónicas (A), que se encuentran cargadas positivamente, permiten el paso de los iones negativos e impiden el de los positivos, de forma semejante las membranas catiónicas (C),

¹⁵ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.86. M-30985-2006

¹⁶ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.87. M-30985-2006

que se encuentran cargadas negativamente, permiten únicamente el paso de los iones positivos. El número de celdas (parejas de membranas aniónicas y catiónicas) que se disponen en los equipos de electrodiálisis es variable y generalmente superior a 100.

De esta forma, y debido a la alternancia de membranas catiónicas y aniónicas, el influente acuoso que se desea tratar (alimentación) se separa en dos efluentes, uno de ellos con una alta concentración de sal (concentrado) y el otro desalinizado.

La caída de potencial en cada celda es de 1 – 2 V y los valores de la densidad de corriente del orden de 40 mA/cm². Para un equipo estándar de 200 celdas, con 1 m² de superficie de membrana, la diferencia de potencial es de 200 – 400 V y la intensidad de corriente de 400 A.

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

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

$$I = z * \Delta c * F * Q \quad \text{Ecu.1}$$

Siendo I la intensidad de la corriente eléctrica, z la valencia de la sal, F la carga eléctrica de un mol de electrones (faraday » 96500 culombios) y Q el caudal de alimentación.

El consumo de energía eléctrica (E) se relaciona con I según la ecuación:

$$E = I^2 * R = I * R * z * \Delta c * Q * F = V * Z * \Delta c * Q * F \quad \text{Ecu.2}$$

Siendo R la resistencia del sistema al paso de la corriente eléctrica y V la diferencia de potencial de trabajo.

Se estima que los consumos teóricos de energía, en el caso de electrodiálisis de aguas de 200 – 4000 mg/L y coeficientes de rechazo de 80% - 95 %, son del orden de 1 – 13 kWh/1m³ de agua desalinizada.

3.4.1 Membranas utilizadas en Electrodiálisis

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



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

3.4.2 Causas de mal funcionamiento: polarización de la concentración.

En las condiciones de trabajo, la concentración de los iones en los espacios entre membranas no es homogénea, produciéndose una disminución de la concentración de iones en las proximidades de la membrana, lo que da lugar a una polarización de la concentración, tal como se indica en la figura 12, para el caso de una membrana catiónica.

Como consecuencia de la polarización de la concentración, en las proximidades de la membrana la diferencia de concentración, $(c_l^+ - c_m^+)$ (Ecu.2), es mayor que la diferencia de concentración de operación $\Delta c = (c_c^+ - c^+)$, lo que significa una mayor caída de potencial en la membrana y por tanto un mayor consumo de energía (E), que puede llegar a ser de 5 a 10 veces mayor que el estimado por la Ecuación 2.

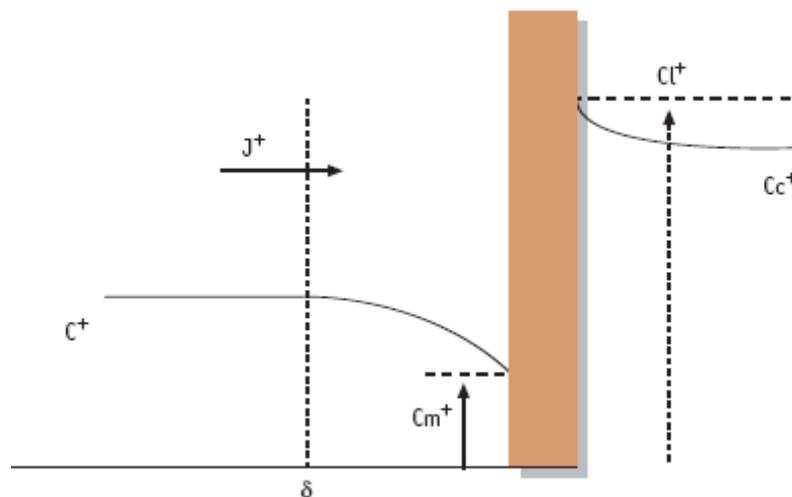


Figura 12. Polarización de la concentración en una membrana¹⁷

¹⁷ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.89. M-30985-2006

Además, debido al perfil de concentración, el flujo de iones positivos (J^+) tendrá dos sumandos: el difusivo y el debido al transporte electrolítico, Ecuación 3.

$$J^+ = D^+ \frac{(C^+ - C_m^+)}{\delta} + \frac{I}{F} t^+ \quad \text{Ec.3}$$

Donde D^+ es la difusividad de los cationes, $(c^+ - c_m^+)$ la diferencia de concentración de los cationes en la alimentación y en las proximidades de la membrana, δ , la anchura de la película próxima a la membrana donde tiene lugar la variación de la concentración de cationes y t^+ , el número de transporte de los cationes o proporción de cationes en el flujo total de cargas.

Así mismo el flujo de cationes en la membrana se puede aproximar a I/F , ya que al ser una membrana catiónica, la totalidad de la corriente electrolítica se deberá a los iones positivos.

En estado estacionario y combinando las dos ecuaciones

$$I = \frac{F * D^+}{(1 - t^+) * \delta} (c^+ - c_m^-) \rightarrow I_{\text{lim}} = \frac{D^+ F c^+}{\delta (1 - t^+)}$$

La corriente límite I_{lim} será la que se alcanza cuando la concentración en las proximidades de la membrana se hace cero. Su valor deberá ser determinado experimentalmente.

El exceso de corriente sobre el valor límite no se empleará en la operación de separación, sino en otros procesos como el transporte de aniones a través de la membrana catiónica o la disociación de moléculas de agua.

La forma de evitar la polarización de la concentración y por tanto minimizar tanto el problema de la intensidad límite de corriente como el de un mayor consumo de energía, es mediante separadores con diseños específicos para provocar turbulencias que homogenicen las concentraciones de los flujos que discurren a lo largo de las membranas.

Otras causas de mal funcionamiento pueden ser *i)* cierta permeabilidad de la membrana a los iones que tienen su misma carga *ii)* transporte de agua a través de la membrana debido a la solvatación de los iones o a procesos osmóticos *iii)* problemas de ensuciamiento.

3.4.3 Aplicaciones

Las aplicaciones más importantes de la electrodiálisis son la desalinización de las aguas salobres y la producción de salmueras, con una incipiente presencia en la industria de la alimentación y en el tratamiento de agua industriales.

3.5. Electrodesionización (EDI)¹⁸

Es un desarrollo de última generación que deviene del proceso convencional de la tecnología de Intercambio Iónico. La electrodesionización (EDI) permite lograr la desmineralización continua de agua con recuperaciones del 90 % o superiores.

Como en los procesos convencionales de Intercambio Iónico, los cationes y aniones en el agua de alimentación son intercambiados por iones hidrógenos y oxhidrilos en la resina de Intercambio Iónico, produciendo agua desmineralizada. La diferencia de la operación es que el EDI se regenera en forma continua, mientras que el método convencional de Intercambio Iónico lo realiza intermitentemente.

La regeneración continua en el EDI se logra electroquímicamente, por medio de membranas conductoras de iones y por la aplicación de una corriente eléctrica. Los iones hidrógenos y oxhidrilos necesarios para la regeneración son formados in-situ, sin adición de reactivos químicos, por medio de la reacción de disociación del agua.

Una celda de EDI está formada de múltiples lechos de resina mixta de intercambio, cada uno de éstos lechos está confinado por membranas conductoras y canales abiertos entre dos electrodos.

Los dos electrodos se encuentran en los extremos opuestos de la celda. Estos electrodos proveen la corriente eléctrica al agua que fluye dentro de las celdas. Un electrodo es el cátodo, cargado negativamente y constituye una fuente de electrones. El cátodo por lo tanto atraerá cationes (iones cargados positivamente).

El otro electrodo es el ánodo cuya carga positiva atraerá aniones (iones cargados negativamente). Tanto la atracción como repulsión de las cargas es debido a las cargas opuestas.

¹⁸ DEY. AVIJIT, PH. D., *Water conditioning & purification, A more forgiving electrodeionization technology with higher feed water hardness tolerance*, June, 2005.



Los otros elementos que deben considerarse son las membranas que separan las cámaras. Hay dos tipos de membranas: membrana aniónica que permite que solo iones negativos pasen (permeado) y membrana catiónica que permite que solo los iones positivos pasen (permeado). El agua no pasará a través de éstas membranas.

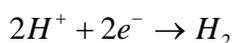
Las membranas se encuentran ubicadas de modo que se convierten en las paredes que separan las cámaras. Hay tres tipos de cámaras: la cámara del diluido, la cámara del concentrado y la del electrólito.

El agua a ser tratada es alimentada en la cámara del diluido. Esta contiene las resinas catiónica y aniónicas confinadas entre las membranas aniónica y catiónica. Las resinas permiten que los iones se adsorban en los respectivos lechos y viajen a través de cada partícula de resina hasta llegar a las membranas.

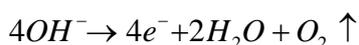
Una vez que los iones contaminantes pasan a través de las membranas, ellos se encontrarán con la cámara del concentrado. Los iones son barridos por un flujo de recirculación, del cual una parte es drenado, y compensado por la reposición de agua fresca.

La combinación de una cámara del diluido, una membrana catiónica, una cámara del diluido y una membrana aniónica se denomina celda. Una celda EDI está formada de múltiples celdas operando en paralelo.

Las cámaras terminales son las del Electrolito. Ambas contienen los electrodos y son alimentadas con agua desde el lazo de concentrado. Al igual que las cámaras de concentrado, las cámaras de electrolito reciben iones contaminantes de la membrana más cercana. Asimismo, al cátodo de la cámara del electrolito pasan pequeñas cantidades de gas hidrógeno generado por reducción del ion hidrógeno.



El ánodo de la cámara de electrolito, igualmente recibe pequeñas cantidades de oxígeno y gas cloro, generado por la oxidación de los iones oxhidrilos y cloruros.



El flujo de la cámara de electrolito es generalmente enviado a descarga para evitar daños a las membranas debido al cloro.

El proceso de EDI Consiste en tres etapas encadenadas:



Intercambio Iónico. El agua a ser tratada entra a la celda de EDI a través de la cámara del diluido. Al encontrarse con las esferas de resina se produce el intercambio iónico. Los iones son absorbidos en la resina, liberándose los iones hidrógeno y oxhidrilos.

Remoción de Iones. Los iones en el lecho de resina se mueven por influencia de la corriente eléctrica aplicada en los electrodos respectivos. Tal es el ejemplo del ion sodio cargado positivamente viaja a través de la resina catiónica hasta alcanzar la membrana catiónica. Siendo ésta permeable a los cationes, permitirá el paso del ion sodio, y entrará en la cámara del concentrado. El ion sodio quedará atrapado en la cámara de concentrado moviéndose hacia el cátodo a través del agua, pero no podrá pasar la membrana aniónica. En este punto el flujo de recirculado arrastrará el ión sodio. Al mismo tiempo, una carga negativa de ión cloruro (por ejemplo) migrará en la dirección opuesta. El ión negativo migrará hacia el ánodo, viajando a través de la resina aniónica, pasando la membrana aniónica hacia la cámara de concentrado, al otro lado de la cámara del diluido. Luego es arrastrado por el flujo recirculante.

Regeneración. El campo eléctrico aplicado a través de la celda EDI es suficiente para producir la disolución de una cantidad significativa de moléculas de agua en iones hidrógenos y oxhidrilos. Los iones hidrógenos son adsorbidos en la resina iónica, desplazando otros iones. Los iones desplazados quedan libres para emigrar al próximo sitio de intercambio iónico. Este proceso de desplazamiento por medio de los iones hidrógenos y oxhidrilos constituye la regeneración.

3.5.1 Funcionamiento de EDI¹⁹

La resina de intercambio iónico cercana a la zona de alimentación se encuentra en estado no regenerado. Los iones son capturados por la resina y removidos para ser transferidos hacia la membrana. Hacia el final del lecho de resina no hay suficientes iones en el agua para sostener la corriente aplicada. Aquí, la corriente eléctrica continua permite la división de la molécula de agua, manteniendo la resina en estado regenerado. Para remoción de iones

¹⁹ SANZ JEAN, GUERRERO LEOPOLDO, BOCA MANUEL, *Producción de agua de alta pureza: Electrodesionización en continuo (CEDI)*, Tecnología del Agua, noviembre/diciembre 06, p. 28-31



débilmente cargados como la sílice, es fundamental usar una diferencia de potencial suficiente para mantener la resina en un alto estado de regeneración.

En la tabla 12 se presenta un resumen de las ventajas e inconvenientes de los diferentes procesos de desmineralización de agua hasta aquí presentados.

Tabla 12. Ventajas e inconvenientes de los procesos de desmineralización de agua.

	Ósmosis Inversa	Intercambio Iónico	Electrodesionización	Electrodiálisis
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Remueve sólidos disueltos. ✓ Desinfecta agua tratada. ✓ Remueve compuestos nitrogenados ✓ Puede remover materia orgánica e inorgánica. ✓ No requiere adición de químicos ✓ Rango de flujo tratado de 1,500 – 110, 000 GPD ✓ Operación y mantenimientos sencillos ✓ Separa sustancias de bajo peso molecular 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tecnología altamente probada y con avances tecnológicos en su operación. ✓ Obtención de un agua de buena calidad para alimentación a calderas. ✓ Aplicación a varios usos, como: descalcificación, desionización, desnitratación. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En combinación con la ósmosis inversa como pre-tratamiento, puede eliminar más del 99,9% de los sólidos disueltos ✓ Evita constante regeneración de resinas ✓ Operación y mantenimiento sencillos ✓ Ocupa poco espacio ✓ Produce calidad constante de agua sin fluctuaciones de flujo ✓ No contamina ✓ Elimina las partículas inorgánicas disueltas (sales) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El uso de químicos de regeneración es eliminado ✓ Operación simple y continua, ✓ Operación y mantenimiento económicos ✓ Poco espacio requerido ✓ Produce calidad constante de agua sin fluctuaciones de flujo ✓ No contamina, seguro y fiable ✓ Elimina las partículas inorgánicas disueltas
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tecnología costosa en comparación con tratamientos convencionales. ✓ Requiere generalmente de un pre-tratamiento o de un agua con bajo contenido de sólidos. ✓ Falta de métodos fiables de bajo costo para monitoreo. ✓ Puede requerir de un manejo de residuos y disposición de concentrados. ✓ Perdida del 25 % del agua de alimentación en forma de salmuera ✓ Requiere de una calidad de agua aceptable, (baja dureza) ✓ Recuperación < 80 % Costo de mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Se requiere una resina específica ✓ Se requieren químicos para regeneración de resinas. ✓ Capacidad de intercambio variable ✓ Costo de mantenimiento alto ✓ Aplicable como pulimento final 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tecnología no ampliamente probada a nivel industrial ✓ Costosa en comparación con tecnologías más convencionales ✓ Requiere de un pre-tratamiento previo y de un agua de muy buena calidad como influente (Dureza<2ppm) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ El voltaje requerido puede ser muy alto a mayor calidad requerida. ✓ No usar agua de dureza superior a 1 ppm, el carbonato de calcio crearía una costra en la cámara del concentrado ✓ Necesita Purificación previa

CAPITULO IV

EVALUACIÓN DE OPCIONES DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE POZO

4. EVALUACIÓN DE OPCIONES DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE POZO

Tal como se planteó en la introducción, el caso de estudio planteado en este trabajo consiste en desmineralizar agua de pozo con calidad típica del estado de Tula Hidalgo, agua que tiene altos contenidos en iones como calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, cloruros, etc., los cuales ocasionan problemas en los equipos generadores de vapor (descritos en el capítulo II).

Las opciones de desmineralización que se plantearon en el capítulo III son: Ósmosis Inversa, Intercambio Iónico, Electrodesionización (pulimento final) y Electrodiálisis.

El factor principal a considerar en esta evaluación será la calidad de suministro a dichas tecnologías. Los parámetros fueron proporcionados por tecnólogos y manuales de proveedores. La tabla 13 presenta la calidad de agua de suministro a las diferentes tecnologías propuestas para la desmineralización así como la calidad de agua de pozo que se desea desmineralizar.

Tabla 13. Calidades de agua de suministro a tecnologías de desmineralización

	TECNOLOGIA				
	AGUA DE POZO	ÓSMOSIS INVERSA	INTERCAMBIO IONICO	ELECTRO-DESIONIZACIÓN	ELECTRO-DIALISIS
EFICIENCIA DE REMOCIÓN		90% ¹	98% ²	85% ³	80% ⁴
PARAMETRO					
CALCIO (ppm de CaCO₃)	234	234	234	0.3	816
MAGNESIO (ppm de CaCO₃)	182	182	182		248
SODIO (ppm de CaCO₃)	500	500	500	55	635
POTASIO (ppm de CaCO₃)	35	35	35	1.3	101
TOTAL DE CATIONES	951	951	951	56.6	1800
HIDROXIDO (ppm de CaCO₃)	-	-	-	-	-

¹ CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.84. M-30985-2006

² AVILLA A. JOSEPH, *Lo esencial acerca del intercambio iónico*, XXV Conferencia anual de la Water Quality Association (WQA), 1999.

³ SANZ JEAN, GUERRERO LEOPOLDO, BOCA MANUEL, *Producción de agua de alta pureza: Electrodesionización en continuo (CEDI)*, Tecnología del Agua, noviembre/diciembre 06, p. 28-31

⁴ Idem⁴³. p.88.



	TECNOLOGIA				
	AGUA DE POZO	ÓSMOSIS INVERSA	INTERCAMBIO IONICO	ELECTRO-DESIONIZACIÓN	ELECTRO-DIALISIS
BICARBONATOS (ppm de CaCO₃)	460	460	460	-	304
CLORUROS (ppm de CaCO₃)	305	305	305	37.5	1485
SULFATOS (ppm de CaCO₃)	186	186	186	10.5	1814
NITRATOS (ppm de CaCO₃)	-	-	-	2.9	39
TOTAL DE ANIONES	951	951	951	50.9	3732
DUREZA TOTAL (ppm de CaCO₃)	416	416	416	0.3	1064
PH	7.4	7.4	7.4	4 a 11	-
CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	1715	1715	1715	40	11430
ALCALINIDAD (ppm de CaCO₃)	460	460	460		304
BIOXIDO DE CARBONO (ppm de CaCO₃)	40	40	40	-	-
SILICE (ppm de CaCO₃)	66	66	66	0.605	66

Haciendo un comparativo de las calidades de agua que se deben suministrar a las cuatro tecnologías propuestas, es notable que la ósmosis inversa, el intercambio iónico y la Electrodiálisis cumplen con los parámetros de suministro para desmineralizar agua de pozo. En cambio la electrodesionización como es un proceso que se utiliza para pulimento final, necesita agua de suministro con mejor calidad por lo cual a ésta tecnología se le tendría que implementar un pretratamiento como lo es la ósmosis inversa y así obtener la calidad de agua de suministro a dicho proceso, trayendo consigo un aumento en los costos de inversión, lo cual no es factible para los fines de este trabajo, por tal motivo el proceso de Electrodesionización se descarta.

En la tabla 14 se presenta la calidad de agua a la salida de cada uno de los procesos de desmineralización propuestos así como la calidad de agua requerida para suministro a equipos generadores de vapor.

Tabla 14. Calidades de agua de salida de las tecnologías de desmineralización

PARAMETRO	TECNOLOGIA				
	CALIDAD REQUERIDA	ÓSMOSIS INVERSA	INTERCAMBIO IONICO	ELECTRO-DESIONIZACIÓN	ELECTRO-DIALISIS
CALCIO (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	0.001	133
MAGNESIO (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	-	18
SODIO (ppm de CaCO ₃)	1	1	1	0.012	149
POTASIO (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	0.001	41
TOTAL DE CATIONES	1	1	1	0.014	341
HIDROXIDO (ppm de CaCO ₃)	1	1	1	-	-
BICARBONATOS (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	-	189
CLORUROS (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	0.001	288
SULFATOS (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	0.0025	168
NITRATOS (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	0.001	11
TOTAL DE ANIONES	1	1	1	0.0045	656
DUREZA TOTAL (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	0.001	-
PH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	-	-
CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	1	1	1	0.1	2030
ALCALINIDAD (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	-	189
BIOXIDO DE CARBONO (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	-	-
SILICE (ppm de CaCO ₃)	0.3	0.3	0.3	0.025	66

El análisis de la calidad de agua indica a la salida de los procesos de desmineralización, que los procesos que cumplen con la calidad requerida para suministro a equipos generadores de vapor son el intercambio iónico y la ósmosis inversa, en cuanto a la Electrodialisis, si se puede alimentar la calidad de agua de pozo pero no cumple con la calidad de suministro a calderas además de que no elimina sílice, por lo cual se le tendría que implementar un postratamiento como pulidores de lechos mixtos o una electrodesionización lo cual traería consigo un costo de inversión muy alto, por lo antes mencionado el

proceso de Electrodialisis se descarta de las opciones de desmineralización para los fines del presente trabajo.

Por lo descrito anteriormente las dos opciones de desmineralización que cumplen con los requerimientos para generar agua para calderas son la ósmosis inversa y el intercambio iónico, por lo cual se realizará un desglose de costos de inversión, costos de operación y costos de mantenimiento para recomendar la opción de desmineralización más factible de implementar a proceso industrial.

4.1. Propuesta técnica del proceso de desmineralización mediante intercambio iónico.

La tabla 15 contiene los parámetros con los que cuenta la calidad de agua de pozo tomada de la Ciudad de Tula Hidalgo, que será suministrada a los equipos de desmineralización de agua.

Tabla 15. Calidad de agua de suministro a equipos desmineralizadores

Parámetro	Agua de suministro a unidades desmineralizadoras	Agua esperada a la salida de unidades desmineralizadoras
Calcio (ppm de CaCO ₃)	234	-
Magnesio (ppm de CaCO ₃)	182	-
Sodio (ppm de CaCO ₃)	500	1
Potasio (ppm de CaCO ₃)	35	-
<i>Total de cationes</i>	951	1
Hidróxido (ppm de CaCO ₃)	-	1
Bicarbonato (ppm de CaCO ₃)	460	-
Cloruros (ppm de CaCO ₃)	305	-
Sulfatos (ppm de CaCO ₃)	186	-
Nitratos (ppm de CaCO ₃)	-	-
<i>Total de aniones</i>	951	1
Dureza Total (ppm de CaCO ₃)	416	-
pH	7.35	6-9
Conductividad (µS/cm)	1715	1
Alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	460	-
Bióxido de carbono (ppm de CaCO ₃)	40	-
Sílice (SiO ₂) (ppm de CaCO ₃)	66	0.3

Dada la calidad de agua y tomando como referencia un flujo de 300 ton/h, se propone el proceso de desmineralización mediante intercambio iónico que consta de cuatro trenes de unidades de cationes empacados, los cuales constan de resinas de cationes fuertes y cationes débiles, los tres primeros trabajan en serie y el cuarto se deja en stand by o para regeneración. También



se incluye un torre desgasificadora en la cual se eliminará el CO₂ generado en las unidades catiónicas. Posteriormente el agua desgasificada pasará a una unidad de intercambio aniónico que consta de cuatro trenes con resinas de intercambio aniónico fuertes y débiles que operará al igual que el tren de resinas catiónicas para así obtener la calidad de agua esperada. El equipo principal que compone dicho proceso se presenta en la tabla 16, el cual contiene costos estimados de instalación proporcionados por proveedores, catálogos de equipos y artículos de estimaciones rápidas de costos de equipos.

Tabla 16. Equipo principal para intercambio iónico

Equipo	Cantidad	Costo base	Limite inferior	Limite superior	Factor empleado	Costo estimado
Unidad Catiónica						
Recipiente	4	\$40,000	1.3	1.6	1.6	\$256,000
Resina catiónica débil IRC-86RF	33.6 m ³	\$9,706			1.1	\$358,734
Resina catiónica fuerte 1200H	45.96 m ³	\$3,623			1.1	\$183,139
Torre desgasificadota						
Recipiente	1	\$25,000	1.43	1.76	1.76	\$44,000
Internos	1	\$20,000			1.1	\$22,000
Cisterna	1	\$31,850			1.2	\$38,220
Unidad Aniónica						
Recipiente	4	\$40,000	1.3	1.6	1.6	\$256,000
Resina aniónica débil IRA-96RF	36.8 m ³	\$10,040			1.1	\$406,419
Aniónica fuerte IRA4200CL	40 m ³	\$10,005			1.1	\$440,220
Tanque de lavado de resina	1	\$25,000	1.3	1.6	1.45	\$36,250
Tanques						
Tanque almacenamiento de NaOH	1	\$18,000	1.3	1.6	1.3	\$23,400
Tanque almacenamiento de H ₂ SO ₄	1	\$18,000	1.3	1.6	1.3	\$23,400
Bombas						
Bombas de alimentación a la unidad aniónica	3	\$25,000	1.25	1.6	1.425	\$106,875
Bombas dosificadoras de NaOH a desmineralización	2	\$12,000	1.25	1.6	1.425	\$34,200
Bombas de dosificación de H ₂ SO ₄ a desmineralización	2	\$12,000	1.25	1.6	1.425	\$34,200
Bombas de recirculación de	2	\$22,000	1.25	1.6	1.425	\$62,700

Tabla 17. Calidad de agua en las etapas del proceso de intercambio iónico

Parámetro	1	2	3	4
	Entrada unidad catiónica	Salida unidad catiónica	Salida Torre desgasificadora	Salida Unidad aniónica, agua desmineralizada
Flujo (ton/h)	300	300	300	300
Hidronio (ppm de CaCO ₃)	-	490	490	-
Calcio (ppm de CaCO ₃)	234	-	-	-
Magnesio (ppm de CaCO ₃)	182	-	-	-
Sodio (ppm de CaCO ₃)	500	1	1	1
Potasio (ppm de CaCO ₃)	35	-	-	-
Total de cationes	951	491	491	1
Hidróxido (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	1
Bicarbonatos (ppm de CaCO ₃)	460	-	-	-
Cloruros (ppm de CaCO ₃)	305	305	305	-
Sulfatos (ppm de CaCO ₃)	186	186	186	-
Nitratos (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	-
Total de aniones	951	491	491	1
Dureza Total (ppm de CaCO ₃)	416	-	-	-
pH	7.35	4.8	4.8	6-9
Conductividad (µS/cm)	1715	-	-	1
Alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	460	-	-	-
Bióxido de carbono (ppm de CaCO ₃)	40	455.51	10	-
Sílice (SiO ₂) (ppm de CaCO ₃)	66	66	66	0.3

4.2. Propuesta técnica del proceso de desmineralización mediante ósmosis inversa

Para la propuesta de desmineralización mediante ósmosis inversa se tomó como referencia la calidad de agua de suministro de pozo presentada en la tabla 15, así como un flujo de 545.5 ton/h de agua de suministro, la ósmosis inversa trabaja a un 55% de eficiencia por lo cual se tiene que suministrar un mayor flujo de agua. El proceso consta de tres unidades de ósmosis inversa compuestas de membranas para separar los iones presentes en el agua, debido a que el agua que se obtiene a la salida de la ósmosis inversa no cumple con la calidad requerida, se propone operar con una unidad pulidora



compuesta por cuatro trenes de lechos mixtos con resinas de intercambio iónico catiónicas fuertes y aniónicas fuertes para así obtener agua con la calidad propuesta.

En la tabla 18 se presenta el equipo que compone el proceso de ósmosis inversa propuesto con sus respectivos costos de instalación proporcionados por proveedores, catálogos de equipo y artículos de estimaciones rápidas de costos de equipos.

Tabla 18. Equipo para la desmineralización mediante ósmosis inversa

Equipo	Cantidad	Costo base	Limite inferior	Limite superior	Factor empleado	Costo estimado
Unidad Catiónica						
Recipiente	4	\$30,000.00	1.3	1.6	1.6	\$192,000
Resina catiónica débil IRC-86RF						
Resina catiónica fuerte 1200H	34.456m ³	\$3,622.50			1.1	\$137,299
Aniónica fuerte IRA4200CL	31.255m ³	\$10,005.00			1.1	\$343,977
Tanque de lavado de resina	1	\$15,000	1.3	1.6	1.6	\$24,000
Ósmosis inversa						
Unidades de ósmosis inversa	3					
Membranas	840	\$850.00			1.1	\$785,400
Tubos a presión	140	\$2,100.00			1.1	\$323,400
Tanques						
Tanque preparación anti-incrustante	1	\$10,000.00	1.3	1.6	1.3	\$13,000
Tanque almacenamiento de NaOH	1	\$18,000.00	1.3	1.6	1.3	\$23,400
Tanque almacenamiento de H ₂ SO ₄	1	\$18,000.00	1.3	1.6	1.3	\$23,400
Tanque de limpieza	1	\$17,500.00	1.3	1.6	1.3	\$22,750
Agitadores						
Agitadores de preparación de solución de antiincrustante	1	\$6,500.00	1.2	1.4	1.3	\$8,450
Bombas						
Bombas de alta presión de ósmosis inversa	3	\$30,000.00	1.25	1.6	1.425	\$128,250
Bombas de alimentación a la unidad aniónica	2	\$25,000.00	1.25	1.6	1.425	\$71,250

Equipo	Cantidad	Costo base	Limite inferior	Limite superior	Factor empleado	Costo estimado
Bombas de dosificación de NaOH a desmineralización	2	\$12,000.00	1.25	1.6	1.425	\$34,200
Bombas de H ₂ SO ₄ a desmineralización	2	\$12,000.00	1.25	1.6	1.425	\$34,200
Bombas de recirculación de enjuague	2	\$21,000.00	1.25	1.6	1.425	\$59,850
Bomba de solución de limpieza	2	\$21,000.00	1.25	1.6	1.425	\$59,850
Ventiladores del descarbonatador	2	\$30,000.00	1.2	1.4	1.3	\$78,000
Total US\$ de costo de equipo mayor						\$2,362,675

En la figura 14 se presenta el diagrama de flujo del proceso de desmineralización mediante ósmosis inversa con pulidores.

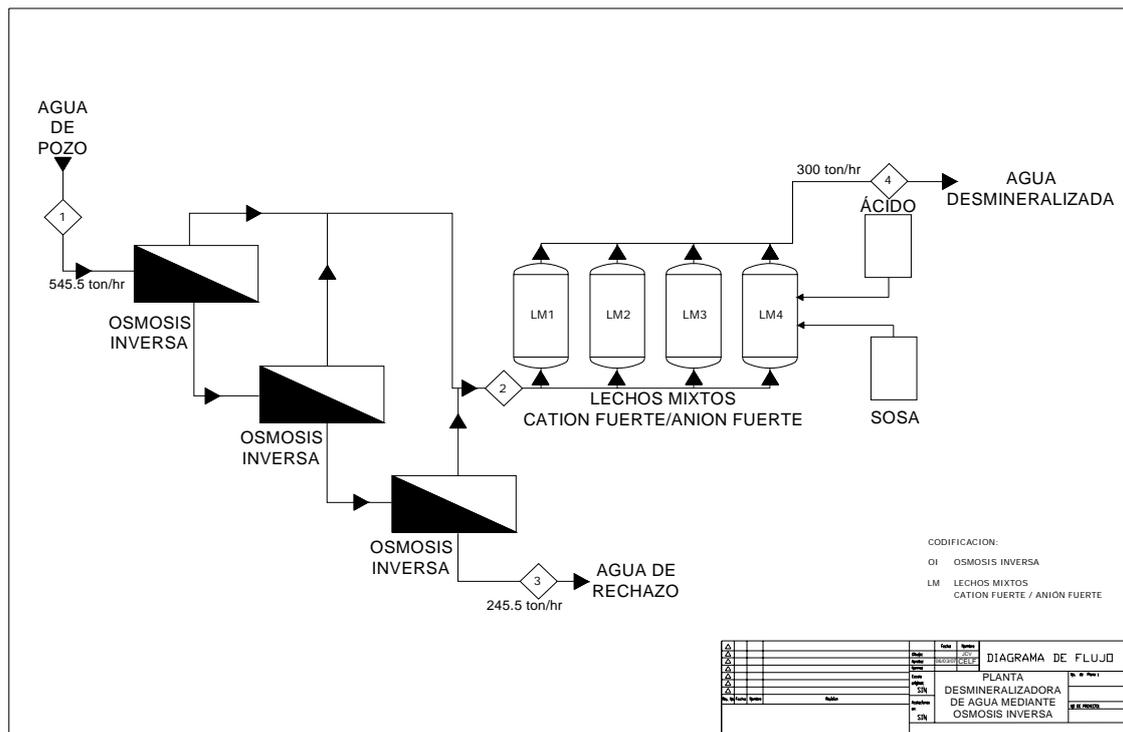


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso de ósmosis inversa

En la tabla 19 se presenta la calidad de agua que proporciona el proceso mediante ósmosis inversa con pulidores.

Tabla 19. Calidad de agua en las diferentes etapas del proceso de ósmosis inversa

Parámetro	1	2	3	4
	Entrada ósmosis inversa	Salida permeado	Salida rechazo	Salida Unidad pulidora, agua desmineralizada
Flujo (ton/h)	545.5	300	245.5	300
Calcio (ppm de CaCO ₃)	234	2.96	516.64	-
Magnesio (ppm de CaCO ₃)	182	2.3	401.88	-
Sodio (ppm de CaCO ₃)	500	35.58	1254.82	1
Potasio (ppm de CaCO ₃)	35	2.62	74.61	-
Total de cationes	951	40.84	2173.34	1
Hidróxido (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	1
Bicarbonatos (ppm de CaCO ₃)	460	29.41	1092.78	-
Cloruros (ppm de CaCO ₃)	305	9.91	669.09	-
Sulfatos (ppm de CaCO ₃)	186	1.52	411.47	-
Nitratos (ppm de CaCO ₃)	-	-	-	-
Total de aniones	951	40.84	2173.34	1
Dureza Total (ppm de CaCO ₃)	416	-	-	-
pH	7.35	4.8	4.8	6-9
Conductividad (μS/cm)	1715	-	-	1
Alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	460	-	-	-
Bióxido de carbono (ppm de CaCO ₃)	40	16	10	-
Sílice (SiO ₂) (ppm de CaCO ₃)	66	2.09	66	0.3

En la tabla 20 se presenta el comparativo de los costos de inversión para las dos propuestas de desmineralización planteadas.

Tabla 20. Comparativo de costos de inversión de los procesos

Concepto	Para intercambio iónico				Para ósmosis inversa			
	Inversión de equipo mayor		\$2,403,757		Inversión de equipo mayor		\$2,362,675	
	Limite inferior	Limite superior	Factor empleado	Costo estimado	Limite inferior	Limite superior	Factor empleado	Costo estimado
Instalación eléctrica (incluye alumbrado)	1.07	1.15	1.11	\$264,413	1.07	1.15	1.1	\$236,268
Costo de tubería		1.13	1.13	\$312,488		1.13	1.13	\$307,148
Costo de instrumentación y control (instrumentos de medición)			1.25	\$600,939			1.2	\$472,535
Tablero de control			1.07	\$168,263			1.06	\$141,761
Costos de edificios y vialidades			1.14	\$336,526	1.05	1.18	1.18	\$425,282
Costos de servicios auxiliares Agua de dilución, aire de instrumentos	1.005	1.25	1.12	\$288,451	1.005	1.25	1.09	\$212,641
Costos de ingeniería y supervisión								
Ingeniería			1.15	\$360,564			1.21	\$496,162
revisión			1.1	\$240,376			1.15	\$354,401
procuración			1.1	\$240,376			1.1	\$236,268
Pruebas y arranque			1.1	\$240,376			1.1	\$236,268
Administración								
Viáticos	1.01	1.1	1.01	\$24,038	1.01	1.1	1.055	\$129,947
Reproducciones y comunicaciones	1.02	1.05	1.02	\$48,075	1.02	1.05	1.02	\$47,254
Contingencias	1.05	1.1	1.07	\$168,263	1.1	1.2	1.15	\$354,401
Inversión total	\$5,696,904				\$6,013,009			

En la tabla 21 se presentan los costos de operación Costos de operación para la desmineralización mediante intercambio iónico.

Tabla 21. Costos de operación de intercambio iónico

Concepto	Costo para intercambio iónico US\$/año				%
	Volumen	Consumo anual	Costo unitario US\$	Costo total US\$/año	
Costos fijos				\$759,761	25.68%
Depreciación				\$240,376	
Mantenimiento (3%)				\$72,113	
Sueldos y salarios				\$447,273	
Costos variables de operación					
Aguas de suministro				\$1,934,161	65.37%
Pozo	7,259 m ³ /día	2,649,535 m ³ /año	0.73 US\$/m ³	\$1,934,161	
Productos químicos				\$135,415	4.58%
Acido sulfúrico (98%)	1,250.00 kg/día	456,250 kg/año	0.1 USD/kg	\$45,625	
Hidróxido de sodio (50%)	600 kg/día	219,000 kg/año	0.41 USD/kg	\$89,790	
Energía eléctrica motores	157.46 kwh/h	1,379,350 kwh/año	0.05 US\$/kwh	\$68,967	2.33%
Membranas (garantía de 3 años)					
Resinas (3% de reposición/año)				\$60,472	2.04%
Catiónica débil IRC-84RF	54.26 m ³	0.03 Rep/año	9,706 US\$/m ³	\$15,799	
Catiónica fuerte 1200H	45.96 m ³	0.03 Rep/año	3,623 US\$/m ³	\$4,995	
Aniónica débil IRA-67RF	83.55 m ³	0.03 Rep/año	11,040 US\$/m ³	\$27,672	
Aniónica fuerte IRA-458F	40 m ³	0.03 Rep/año	10,005 US\$/m ³	\$12,006	
Total US\$/año				\$2,958,776	100.00%

En la tabla 22 se presentan los costos de operación para el proceso de desmineralización mediante ósmosis inversa y pulidores.

Tabla 22. Costos de operación de ósmosis inversa

Concepto	Costo para ósmosis inversa US\$/año				%
	Volumen	Consumo anual	Costo unitario US\$	Costo total US\$/año	
Costos fijos				\$1,430,784	25.22%
Depreciación				236,268	
Mantenimiento (3%)				70,880	
Sueldos y salarios				1,123,636	
Costos variables de operación					
Aguas de suministro				3,488,363	61.49%
Pozo	13,092.00 m ³ /día	4,778,580 m ³ /año	0.73 US\$/m ³	\$3,488,363	
Productos químicos				425,085	7.49%
Acido sulfúrico (98%)	1,300.00 kg/día	474,500.00 kg/año	0.1 USD/kg	\$47,450	
Hidróxido de sodio (50%)	650 kg/día	237,250.00 kg/año	0.41 USD/kg	\$97,273	
Solución de limpieza	79.68 kg/día	29,083.20	0.44 USD/kg	\$12,797	
Anti-incrustante	79.68 kg/día	29,083.20	9.2 USD/kg	\$267,565	
Energía eléctrica motores	178.30 Kwh/h	1,561,908 KWh/año	0.05 US\$/KWh	\$78,095	2.33%
Membranas (garantía de 3 años)	280.00 Membr.	280 Membr.	850.00 US\$/membr.	\$237,998	1.38%
Resinas (3% de reposición/año)				\$13,124	0.23%
Catiónica fuerte 1200H	34 m ³	0.03 Rep/año	3,623 US\$/m ³	\$3,744	
Aniónica fuerte IRA-458F	31 m ³	0.03 Rep/año	10,005 US\$/m ³	\$9,380	
Total US\$/año				\$5,673,449	100%

En la tabla 23 se presentan los principales costos de inversión, operación y mantenimiento que se obtuvieron de la comparación de las dos tecnologías propuestas.

Tabla 23. Comparativo de costos de las dos opciones de desmineralización

	INTERCAMBIO IÓNICO	ÓSMOSIS INVERSA
EFICIENCIA DE APROVECHAMIENTO DE AGUA	99%	55%
INVERSION INICIAL	U\$ 5'696,904.00	U\$ 6'013,009.00
COSTOS DE MANTENIMIENTO ANUAL	U\$ 60,472.00	U\$ 251,122.00
COSTOS DE OPERACIÓN ANUAL	U\$ 2,958,776.00	U\$ 5,673,449.00
CONSUMO DE AGUA ANUAL	2,649,535 m ³ /año	4,778,580 m ³ /año
COSTO ANUAL DE REACTIVOS	U\$ 135,415.00	U\$ 425,085.00
COSTO DE ENERGIA	U\$ 68,967.00	U\$ 78,095.00



De acuerdo a la comparación realizada, los resultados que se obtienen son:

- ✓ Comparando los costos de inversión inicial es notable que la inversión de la ósmosis inversa es más mayor, esto debido a que no alcanza la calidad planteada en un principio, además de que sólo trabaja al 55% de aprovechamiento de agua, lo cual trae consigo mayor consumo de agua de suministro.
- ✓ En cuanto a los costos de mantenimiento, operación y reactivos es notable que la ósmosis consume dos o tres veces más que el intercambio iónico.
- ✓ El proceso factible de implementar para la desmineralización de agua de pozo es el intercambio iónico debido a que presenta mayor beneficio y trae consigo un costo más bajo en la tecnología proporcionada.

CONCLUSIÓN



CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se planteó la selección de un sistema de desmineralización de agua de pozos con calidad de la región cercana a Tula Hidalgo, para suministrar agua a calderas de alta presión. El agua de pozos contiene una diversidad importante de constituyentes minerales que la hacen perjudicial a calderas, en caso de no darle el tratamiento adecuado, puede llegar a ocasionar paros innecesarios, pérdida de eficiencia, incrustaciones y hasta explosiones. Entre los procesos que se estudiaron para la desmineralización de agua de pozo, se encuentran ósmosis inversa, electrodiálisis, electrodesionización e intercambio iónico.

La ósmosis inversa por si sola no proporciona la calidad requerida de agua de suministro a calderas debido a que es una desmineralización parcial, por lo cual se debe de poner un tratamiento posterior que bien puede ser una electrodesionización o un tratamiento mediante pulidores con resinas de intercambio iónico; proceso que hace mas costoso el tratamiento.

La electrodesionización se descartó debido a que es un proceso de pulimento no competitivo para aguas con altas concentraciones de sales, en cuanto a la electrodiálisis no elimina el sílice presente en el agua, ambos sistemas tienen altos costos de operación haciéndolos poco rentables para la desmineralización.

El análisis de costos indicó que el proceso de intercambio iónico, es la mejor tecnología ya que representa menores costos de inversión y de operación a corto y largo plazo.

Con base en el análisis del presente trabajo, la mejor tecnología para desmineralizar agua de pozo es el intercambio iónico, siempre y cuando se tome en cuenta que la regeneración de la resina genera desechos industriales por lo cual hay que implementar un tratamiento para evitar las descargas de agua contaminada a drenajes, ríos, lagunas y mares.

BIBLIOGRAFIA

1. AVILLA A. JOSEPH, *Lo esencial acerca del intercambio iónico*, XXV Conferencia anual de la Water Quality Association (WQA), 1999.
2. CARL D. SHIELD, *Calderas. Tipos, características y sus funciones*, 1^{er} ed, México: CECOSA, 1965, p.716
3. CITME, *Tratamiento avanzado de aguas residuales industriales*, CIEMAT, vt2, Madrid 2006, p.136. M-30985-2006
4. DEPARTAMENTO TECNICO DE RG SYSTEMS, *Fundamentos de la ósmosis inversa*, Zaragoza (España), 2002, p.54
5. DEY AVIJIT, PH. D., *Water conditioning & purification, A more forgiving electrodeionization technology with higher feed water hardness tolerance*, june, 2005.
6. DOWEX ION EXCHANGE RESINS, *Water Conditioning Manual*, USA, p.93, No.177-01766-1105.
7. JIMENEZ CISNEROS BALANCA ELENA, *La contaminación ambiental en México, Causas efectos y tecnología apropiada*, México: Limusa, 2001, p.925.
8. L.GERMAIN, L. COLAS, J. ROUQUET, *Tratamiento de la aguas: Redes de distribución de aguas potables e industriales, alimentación de calderas de vapor y circuitos de refrigeración*, Barcelona: Omega, c1982, p. 165.
9. MARTINEZ RUBIO JUAN, *Aguas subterráneas: Captación y aprovechamiento*, Sevilla: Progensa, 1998, p. 404.
10. NMX-K-435-1977, *Determinación del ion cloruro en muestras de aguas para alimentación de calderas*.
11. NMX-K-436-1977, *Determinación del ion sulfato en muestras de aguas para alimentación de calderas*

12. NMX-K-437-1978, *Determinación de sílice en muestras de aguas para alimentación de calderas*
13. NMX-K-440-1978, *Determinación de la conductividad eléctrica en muestras de agua para alimentación de calderas*
14. NMX-K-443-1978, *Determinación de dureza en agua para calderas*
15. NMX-K-474-1979, *Determinación de acidez o alcalinidad total en muestras de agua para alimentación de calderas.*
16. NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-003-CNA-1996, *Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos*, México: comisión nacional del agua 1996.
17. NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-004-CNA-1996, *Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general*, México: comisión nacional del agua 1996.
18. OSMONICS, INC. SOLO II™, *Reverse Osmosis Unit, Operation and Maintenance Manual*, USA, 2000.
19. PERRY, ROBERT H., *Manual del Ingeniero Químico*, 3ª ed, México: Mc Graw Hill, 1992, p
20. RICHARD J. REED & JOST O WENDT, *Applied combustion technology*, 1991.
21. ROHM AND HAAS Company, *Amberjet 1200H, Strong Acid Cation Exchanger*, USA, 1998, IE-490EDS-Nov.1998.
22. ROHM AND HAAS Company, *Amberjet 4200 Cl, Strong Base Anion Exchanger*, USA, 1998, IE-487EDS-Nov.1998.
23. ROHM AND HAAS Company, *Amberlite IRA96RF, Weak Base Anion Exchanger*, USA, 1998, IE-532EDS-Nov.1998.

24. ROHM AND HAAS Company, *Amberlite IRC86RF, Weak Acid Cation Exchanger*, USA, 1998, IE-507EDS-Nov.1998.
25. SANZ JEAN, GUERRERO LEOPOLDO, BOCA MANUEL, *Producción de agua de alta pureza: Electrodesionización en continuo (CEDI)*, Tecnología del Agua, noviembre/diciembre 06, p. 28-31
26. TCHOBANOGLIOUS GEORGE, *Wastewater engineering: Treatment, disposal, and reuse/Metcalf & Eddy*, 3^a ed, New York: Mc Graw Hill, 1991, p. 1334.
27. UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID, *Intercambio Iónico*, Área de Ingeniería Química, p.10
28. UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO, *ISO 690, Documentación-Referencias bibliográficas, Contenido, forma y estructura*, 12^a ed, 1987, p.26

**ANEXO 1: PREDIMENSIONAMIENTO
SIMPLIFICADO DE LA UNIDAD
DESMINERALIZADORA DE AGUA
MEDIANTE INTERCAMBIO IÓNICO.**

PREDIMENSIONAMIENTO SIMPLIFICADO DE LA UNIDAD DESMINERALIZADORA DE AGUA MEDIANTE INTERCAMBIO IÓNICO.

En base al análisis realizado en el capítulo IV, resulta más viable implementar la desmineralización mediante Intercambio Iónico, ya que ésta ofrece el menor costo de inversión y operación.

A continuación se presenta una metodología de cálculo simplificado que tiene como objetivo dar una idea de las dimensiones que pudieran tener las unidades de intercambio iónico, cabe mencionar que la memoria de cálculo de dicho proceso fue sacada de libros y manuales de operación de Unidades Desmineralizadoras de Agua que actualmente se encuentran operando.

Tal como se mencionó anteriormente la calidad de agua de suministro a la unidad desmineralizadora es de pozo de la región de la Ciudad de Tula Hidalgo, en la tabla 24 se presenta la calidad de agua de dicho pozo.

Tabla 24. Calidad de agua de suministro para el diseño del equipo de intercambio iónico

Parámetro	Agua de suministro a unidades desmineralizadoras	Agua esperada a la salida de unidades desmineralizadoras
Calcio (ppm de CaCO ₃)	234	-
Magnesio (ppm de CaCO ₃)	182	-
Sodio (ppm de CaCO ₃)	500	1
Potasio (ppm de CaCO ₃)	35	-
<i>Total de cationes</i>	951	1
Hidróxido (ppm de CaCO ₃)	-	1
Bicarbonatos (ppm de CaCO ₃)	460	-
Cloruros (ppm de CaCO ₃)	305	-
Sulfatos (ppm de CaCO ₃)	186	-
Nitratos (ppm de CaCO ₃)	-	-
<i>Total de aniones</i>	951	1
Dureza Total (ppm de CaCO ₃)	416	-
pH	7.35	6-9
Conductividad (µS/cm)	1715	1
Alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	460	-
Bióxido de carbono (ppm de CaCO ₃)	40	-
Sílice (SiO ₂) (ppm de CaCO ₃)	66	0.3

El flujo de agua a desmineralizar es de 300 ton/h.

Calculo del volumen de resina catiónica débil:*Cationes en ppm de CaCO₃:*

Ca ²⁺	234
Mg ²⁺	182
Na ⁺	500
K ⁺	35
<i>Total</i>	<i>951</i>

Aniones en ppm de CaCO₃:

HCO ₃ ²⁻	460
Cl ⁻	305
SO ₄ ²⁻	186
NO ₃ ⁻	0
<i>Total</i>	<i>951</i>
SiO ₂	66
CO ₂	40

*Resina utilizada IRC 86RF**Características*

- ✓ Grupo funcional: ácido carboxílico
- ✓ Forma física: esferas amarillo claro
- ✓ Forma iónica disponible: H⁺
- ✓ Capacidad de intercambio total: 4.10 meq/ml
- ✓ Contenido de humedad: 47 – 53 %
- ✓ Diámetro efectivo: 0.60-0.80 mm
- ✓ Rango de pH de operación: 5-14

Calculo del lecho de resinaComo alcalinidad = 460 ppm de CaCO₃Cationes alcalinos = 460 ppm de CaCO₃

Cationes no-alcalinos = 491 ppm

El lecho de resina se diseñará para la cantidad de Na⁺ equivalente a la alcalinidad = 460 ppm de CaCO₃, y el efluente esperado por lo tanto será:

Cationes (ppm):

Ca ²⁺	234
Mg ²⁺	182



Na ⁺	40
K ⁺	35
<i>Total</i>	<i>491</i>

Aniones (ppm):

HCO ₃ ²⁻	0
Cl ⁻	305
SO ₄ ²⁻	186
NO ₃ ⁻	0
<i>Total</i>	<i>491</i>
SiO ₂	66
CO ₂	455.51

Por lo tanto la carga catiónica que se quedará en la unidad catiónica débil será:

$$Carga_Cationica = \frac{460\text{ ppm}}{17.1\text{ ppm/ granos/ gal}} = 26.9\text{ granos/ gal}$$

Volumen de resina

$$Cation_débil = \frac{264000\text{ gal} * 26.9\text{ granos/ gal}}{17955.1\text{ granos/ ft}^3} = 395.52\text{ ft}^3 = 11.2\text{ m}^3$$

Calculo del volumen de resina catiónica fuerte.

La resina catiónica fuerte a utilizar es la 1200H

Características.

- ✓ Grupo funcional: ácido sulfónico
- ✓ Forma física: esferas insolubles
- ✓ Forma iónica disponible: H⁺
- ✓ Capacidad de intercambio total: ≥ 1.8 meq/ml
- ✓ Contenido de humedad: 49 – 55 %
- ✓ Diámetro efectivo: 0.58-0.68 mm
- ✓ Rango de pH de operación: 0-14

Calculo del lecho de resina.

La calidad de agua que entrará a la unidad catiónica fuerte será el esperado a la salida de la unidad catiónica débil, En el catión fuerte se intercambiarán todos los iones no alcalinos correspondientes a los sulfatos y cloruros de calcio, magnesio, potasio y sodio.



El análisis del agua esperado en el efluente será:

Cationes (ppm):

Ca ²⁺	0
Mg ²⁺	0
Na ⁺	5
K ⁺	0
H ⁺	486
<i>Total</i>	<i>491</i>

Aniones

HCO ₃ ⁻	0
Cl ⁻	305
SO ₄ ²⁻	186
NO ₃ ⁻	0
<i>Total</i>	<i>491</i>
SiO ₂	66
CO ₂	455.51

Por lo tanto la carga catiónica que se quedará en la unidad catiónica fuerte será:

$$Carga_Cationica = \frac{491 ppm}{17.1 ppm / granos / gal} = 28.71 granos / gal$$

Volumen de resina

$$Cation_fuerte = \frac{264000 gal * 28.71 granos / gal}{14009.53 granos / ft^3} = 541.02 ft^3$$

$$resina_total = 541.02 + 395.52 = 936.54 ft^3 = 26.52 m^3$$

Eligiendo un diámetro de 3.5 m y relación de expansión de resina de 1.5 m se puede calcular la sección que es igual a:

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{3.1416}{4} * (3.5)^2 = 9.6211 m^2$$

Calculando la profundidad

$$Profundidad = \frac{Volumen_de_resina}{Sección} = \frac{26.52 m^3}{9.6211 m^2} = 2.7564 m$$

Altura de la columna es igual:

$$altura = relación * profundidad = 1.5 * 2.7564 m = 4.1346 m$$



Dimensiones de la unidad catiónica

Dimensiones	Cantidad por columna
Volumen de resina catiónica fuerte	15.32 m ³
Volumen de resina catiónica débil	11.2 m ³
Sección	9.6211 m ²
Profundidad	2.7564 m
Altura	4.1346 m

Cabe mencionar que el volumen de resina con el que se calculó la columna es para una sola unidad por lo cual para desmineralizar las 300 ton/h se necesita de tres columnas de las mismas dimensiones que la anterior para abastecer dicho flujo.

Cálculo de la unidad aniónica

Tomando como referencia la calidad de agua presentada en la tabla 24 se tiene lo siguiente:

Aniones por remover (ppm de CaCO₃):

Débiles:

SiO ₂	66
HCO ₃ ⁻	40
<i>Total: 106</i>	

Fuertes:

Cl ⁻	305
SO ₄ ²⁻	186
Total: 491	

Resina aniónica débil utilizada IRA96RF:

Características

- ✓ Grupo funcional: amina terciária
- ✓ Forma física: granos esféricos opacos
- ✓ Forma iónica disponible: FB
- ✓ Capacidad de intercambio total: 1.25 meq/ml
- ✓ Contenido de humedad: 57 – 63 %
- ✓ Diámetro efectivo: 0.63-0.83 mm
- ✓ Rango de pH de operación: 0-7



Calculo del lecho de resinaDébiles (ppm de CaCO₃):

HCO ₃ ⁻	40
SiO ₂	66
Totales	106

Por lo tanto la carga aniónica que se quedará en la unidad será:

$$carga_anionica = \frac{106 ppm}{17.1 ppm / gr / gal} = 6.2 granos / gal$$

Volumen de resina IRA96RF

$$anion_debil = \frac{264000 gal * 6.2 granos / gal}{3778.48 granos / ft^3} = 433.19 ft^3 = 12.3 m^3$$

Calculo de resina aniónica fuerte.

Resina aniónica fuerte utilizada 4200 Cl

Características

- ✓ Grupo funcional: amina cuaternaria tipo 1
- ✓ Forma física: granos insolubles claros
- ✓ Forma iónica disponible: cloruro
- ✓ Capacidad de intercambio total: 1.30 meq/ml
- ✓ Contenido de humedad: 49 – 55 %
- ✓ Diámetro efectivo: 0.60-0.80 mm
- ✓ Rango de pH de operación: 0-14

Calculo del lecho de la resinaFuerzas (ppm de CaCO₃)

Cl ⁻	305
SO ₄ ²⁻	186
Total:	491

Por lo tanto la carga aniónica que se quedará en la unidad será:

$$carga_anionica = \frac{491 ppm}{17.1 ppm / granos / gal} = 28.71 granos / gal$$

Volumen de resina 4200 Cl

$$anion_debil = \frac{264000 gal * 28.71 granos / gal}{16101.117 granos / ft^3} = 470.74 ft^3$$



$$resina_total = 433.19 ft^3 + 470.74 ft^3 = 903.93 ft^3 = 25.6m^3$$

Eligiendo un diámetro de 3.2 m y relación de expansión de resina de 1.5 m, se puede calcular la sección que es igual a:

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2 = \frac{3.1416}{4} * (3.2)^2 = 8.042m^2$$

Calculando la profundidad

$$Profundidad = \frac{Volumen_de_resina}{Sección} = \frac{25.6m^3}{8.042m^2} = 3.1818m$$

Altura de la columna es igual:

$$altura = relación * profundidad = 1.5 * 3.1818m = 4.7727m$$

Dimensiones de la unidad aniónica

Dimensiones	Cantidad por columna
Volumen de resina aniónica fuerte	13.33 m ³
Volumen de resina aniónica débil	12.27 m ³
Sección	8.042 m ²
Profundidad	3.1818 m
Altura	4.7727 m

Cabe mencionar que las dimensiones presentadas en la tabla anterior son para una sola columna, por lo cual para desmineralizar el flujo de 300 ton/h se necesitan tres columnas en serie de las mismas dimensiones.

ANEXO 2: FICHA TECNICA DE UNA UNIDAD DESMINERALIZADORA DE AGUA

SOLICITUD DE COTIZACIÓN DE TREN DE TRATAMIENTO DE AGUA

1. Objetivo:

Construcción de un tren de desmineralización de agua, para producción de 300 T/h de agua con calidad de alimentación a Calderas y sistemas de generación de vapor.

2. Sitio de localización:

Municipio Tula Hidalgo.
 Altitud: 2020 msnm
 Precipitación: 802.4 mm anuales
 Máxima extrema promedio anual: 24.6 °C.
 Mínima promedio anual: 10.3 °C.
 Temperatura media anual: 17.4 °C.
 Presión: 594 mm Hg

3. Descripción técnica:

El influente a este tren será agua proveniente de pozos de la Ciudad de Tula Hidalgo, cuya calidad se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Influyente a tren de desmineralización

Parámetro	Promedio (ppm de CaCO ₃)
Hidronio	-
Calcio	234
Magnesio	182
Sodio	500
Potasio	35
<i>Total de cationes</i>	951
Hidróxido	-
Bicarbonatos	460
Cloruros	305
Sulfatos	186
Nitratos	-
<i>Total de aniones</i>	951
Dureza Total	416
pH	7.35
Conductividad	1715
Alcalinidad	460
Bióxido de carbono	40
Sílice (SiO ₂)	66

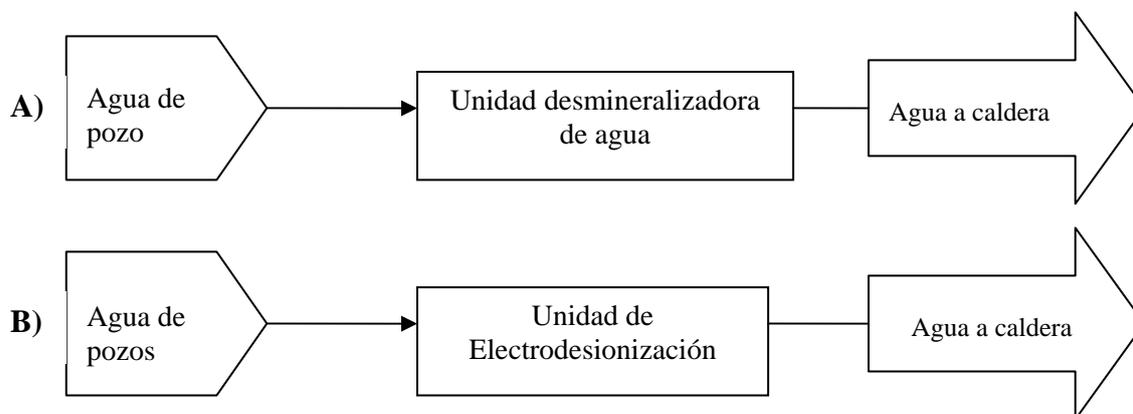
El agua tratada producida por el tren de tratamiento será empleada como agua de alimentación a Calderas y sistemas de generación de vapor, por lo cual debe presentar la calidad mostrada en la tabla 2.

Tabla 2. Calidad requerida del efluente del tren de desmineralización

Parámetro	Agua esperada a la salida de unidades desmineralizadoras
Hidronio	
Calcio (ppm de CaCO ₃)	-
Magnesio (ppm de CaCO ₃)	-
Sodio (ppm de CaCO ₃)	1
Potasio (ppm de CaCO ₃)	-
<i>Total de cationes</i>	1
Hidróxido (ppm de CaCO ₃)	1
Bicarbonato (ppm de CaCO ₃)	-
Cloruros (ppm de CaCO ₃)	-
Sulfatos (ppm de CaCO ₃)	-
Nitratos (ppm de CaCO ₃)	-
<i>Total de aniones</i>	1
Dureza Total (ppm de CaCO ₃)	-
pH	6-9
Conductividad (μS/cm)	1
Alcalinidad (ppm de CaCO ₃)	-
Bióxido de carbono (ppm de CaCO ₃)	-
Sílice (SiO ₂) (ppm de CaCO ₃)	0.3

4. Esquemas conceptuales de tratamiento:

El tipo de tren de desmineralización esperado, deberá estar acorde con alguno de los esquemas mostrados a continuación:



5. Puntos a considerar:

- Se solicita cotización, sobre uno o los dos esquemas de tratamiento para desmineralización de agua.
- En el esquema A se solicita al tecnólogo proponer y cotizar un sistema de pretratamiento de agua si es que se requiere, así como el tratamiento final de desmineralizado mediante Unidades convencionales de Intercambió Iónico con Resinas.
- En el esquema B se solicita al tecnólogo proponer y cotizar un sistema de pretratamiento de agua, así como el tratamiento final de desmineralizado mediante Electrodesionización (EDI).

- Se requiere preferentemente información individual especialmente en el costo, sobre cada uno de los procesos que integrarán el tratamiento y la unidad de desmineralización final (Intercambio iónico o Electrodesionización).
- El tecnólogo puede proponer otra opción de desmineralización, siempre y cuando considere las calidades de agua especificadas en las tablas 1 y 2.

6. Información solicitada:

- Recomendación tecnológica (principios operativos, si es posible ventajas respecto a otra alternativa en cuanto a eficiencia uso de agua u otro concepto).
- Desglose de Inversión y costo, incluyendo misceláneos, bombas, tubería e instrumentación y control.
- Energía y químicos (consumo y costo anual).
- Costo anual de mantenimiento y refacciones requeridas (anual o estimación para stock). Definir si existe posibilidad de reparación nacional, u otros servicios posventa.
- Flexibilidad (operativa y en las características de calidad del influente).
- Vida útil.
- Estimados recomendados (porcentuales o especificar si ustedes lo ofertan y precio) para obras de instalación, interconexiones, pruebas y arranque, requerimiento de capital de trabajo (% sobre refacciones u otro criterio).
- Tiempos de ejecución/entrega de equipo previstos.
- Garantías ofertadas y referencias comerciales de sistemas ya instalados con su tecnología.

ATENTAMENTE

P.I.Q: José Alejandro Petrichole Gutiérrez
UNAM, TORRE DE INGENIERIA
NIVEL 4, ALA NORTE
CIUDAD UNIVERSITARIA, 04510 COYOACAN, MÉXICO, D.F.
TEL: (55) 56 23 35 00, EXT: 1415