

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMAS MULTIDISCIPLINARIOS DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

“ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DEL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO PARA LA PUESTA EN MARCHA DE PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

KATIA GABRIELA HERNÁNDEZ DOMÍNGUEZ,

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Luis Armando Bernal Jácome

ASESORES:

**Dr. Nahúm Andrés Medellín Castillo
Dr. Israel Razo Soto**

SAN LUIS POTOSÍ, SAN LUIS POTOSÍ.

ENERO 2015.

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

El Laboratorio de Investigación en el Tratamiento de las Aguas Residuales
DEL Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de
Ingeniería de la UASLP

**FINANCIADO CON BECA A LA ESTUDIANTE DE MAESTRIA Katia Gabriela Hernández
Domínguez:**

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

Becario No. 274136 Periodo: agosto 2012 a julio 2014.

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 274136

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

A mi asesor el Dr. Luis Armando Bernal por su guía, apoyo y paciencia llevada al límite para llevar a cabo mi proyecto de maestría. Así mismo, a mis dos asesores el Dr. Nahúm Medellín y el Dr. Israel Razo por su tiempo y dedicación que tuvieron hacia este proyecto. Y especialmente, al Dr. Antoni Escalas por ser un excelente asesor en mi proyecto de estancia en Terrassa y por toda su ayuda.

Al Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales por abrirme sus puertas y haberme brindado la oportunidad de expandir mis conocimientos y ver las cosas desde una perspectiva diferente. A todos los profesores que conocí y de los que aprendí muchísimo durante estos dos años.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por sus instalaciones del laboratorio que sin ellas hubiera sido imposible realizar mi trabajo de investigación.

A CONACYT, por el apoyo brindado para realizar mis estudios de maestría.

Y finalmente a todas las personas involucradas, amigos, compañeros y familiares, que sin su ayuda, apoyo y amistad no hubiese concluido este trabajo. Pero especialmente a mi compañero y amigo del alma Rodolfo.

RESUMEN

El contexto global y regional del agua exige la implementación de más y mejores estrategias para asegurar la disponibilidad del recurso hídrico para las generaciones presentes y futuras. Uno de los sectores de mayor demanda de agua en el mundo es el sector industrial, que es responsable, de manera general, del consumo de aproximadamente 20% del vital líquido.

Una de las alternativas para disminuir este consumo es el uso de agua residual tratada dentro de los procesos industriales. Sin embargo, los altos requerimientos de calidad han dificultado su aplicación en la realidad. En este sentido, la implementación de trenes de tratamientos para agua residual debe incluir etapas que aseguren la excelencia en la calidad del agua.

Una de las tecnologías para llevar a cabo dicho tratamiento es el intercambio iónico. Sin embargo, este proceso se ve limitado por el costo relativamente alto asociado a los materiales, la operación y la regeneración de las resinas en un equipo de Intercambio Iónico. En particular, la regeneración de las resinas de intercambio es un proceso que pocas veces es estudiado y optimizado cuando no se conocen las especificaciones del proveedor. Es por ello que, en el presente trabajo se estudió, desde un punto de vista práctico, cuáles son las mejores estrategias de regeneración de las resinas de intercambio iónico.

En este trabajo, se utilizó como modelo de estudio a un grupo de resinas comerciales contenidas en un equipo de intercambio iónico comercial. Las resinas se caracterizaron mediante una técnica de espectrometría infrarroja y su regeneración se investigó mediante la utilización de distintas concentraciones de regenerante. Posteriormente, el comportamiento de las resinas regeneradas fue evaluado en un sistema de flujo continuo.

Por último, se hicieron simulaciones a fin de estimar costos de un proceso alternativo de intercambio iónico y ósmosis inversa.

Los resultados obtenidos indican que las mejores estrategias de regeneración varían conforme al tipo de resina a regenerar. En este trabajo, las mejores estrategias para la regeneración de resinas aniónicas fueron la utilización de NaOH (12.5%), NH₄OH (12.5%) y NH₄OH (7.5%), para las resinas 1, 2 y 4A, respectivamente. Mediante esta estrategia de regeneración se alcanzaron capacidades máximas de intercambio desde 10.6 mg SDT/g_{resina} hasta 45.6 mg SDT/g_{resina}. Por otra parte, las mejores estrategias de regeneración para las resinas catiónicas, fueron la utilización de H₂SO₄ (2.5%) y HCl (2.5%) para las resinas 3 y 4B, respectivamente. En el primer caso, la máxima capacidad de intercambio iónico registrada fue de 30 mg SDT/g_{resina}, mientras que con la resina 4A, la máxima capacidad de intercambio iónico fue de 26.8 mg SDT/g_{resina}. Finalmente, mediante el uso de software especializado, se estimaron costos de producción de agua de aproximadamente 43.1 MXN/m³ y 850.3 MXN/m³ mediante los procesos de ósmosis inversa e intercambio iónico, respectivamente. Considerando las mejores estrategias de regeneración encontradas en este trabajo, los costos de regeneración se verían disminuidos en aproximadamente 20%.

ABSTRACT

The global and regional context of water calls for the implementation of more and better strategies of water management. Industrial sector is one of the most water-demanding sectors of the world, being responsible for the consumption of 20% of total freshwater worldwide.

An alternative to diminish such a consumption is the use of reclaimed wastewater into industrial processes. However, high quality standards have made it difficult its application in real life. In this regard, implementation of wastewater treatment processes must include steps to accomplish the aforementioned quality of standars.

One of the available technologies for advanced treatment of water is ion exchange. Nevertheless, it is limited by the relatively high costs of materials, operation, and resin regeneration. In particular, resins regeneration is an important step, which has been poorly studied and optimized when their origin is unknown. Therefore, the present work was focused on the study of regeneration strategies of ion exchange resines.

As model of study, a group of exhausted commercial ion exchange resins were used. Resins were characterized by FTIR and best regeneration strategies were investigated through the study of multiple regenerant concentrations. Afterwards, the behaviour of regenerated resins was evaluated in a continuous system. Finally, software simultaions were carried out in order to estimate the specific costs of an alternative processes for water treatment.

Results indicated that best strategies depend on the type of the resin. In this thesis, the best strategies for the regeneration of anionic resins were NaOH (12.5%), NH₄OH (12.5%) and NH₄OH (7.5%) for resins 1, 2 and 4A, respectively. Through such regeneration strategies, maximum exchange capacities of 10.6 mg SDT/g_{resina} hasta 45.6 mg SDT/g_{resina}, were achieved. On the other hand, the best strategies for cationic resins were the use of H₂SO₄

(2.5%) and HCl (2.5%) for resins 3 and 4B, respectively. In the first case, a maximum exchange capacity of 30 mg SDT/g_{resina} was reached, while a maximum exchange capacity of 26.8 mg SDT/g_{resina} was achieved with resin 4A. Finally, through specialized software, water production costs of 43.1 MXN/m³ and 850.3 MXN/m³ were estimated with reverse osmosis and ion exchange, respectively. Furthermore, considering the best strategies found in our work, the regeneration cost in ion exchange process can be decreased by 20%.

TABLA DE CONTENIDOS

CREDITOS INSTITUCIONALES	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ABSTRACT	v
RESUMEN	vii
TABLA DE CONTENIDOS	ix
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Definición del sistema de estudio	4
1.1.1 Tratamiento terciario: equipo de Intercambio Iónico	5
1.2 Objetivos	
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.4 Justificación	8
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	
2.1 Agua residual	9
2.1.1 Tipos de Aguas Residuales	10
2.1.2 Constituyentes de las aguas residuales	10
2.2 Tratamiento de aguas residuales	11
2.2.1 Sistemas de tratamiento de aguas residuales	12
2.2.2 Reúso de Aguas residuales	13
2.3 Tratamientos avanzados de aguas residuales	15
2.3.1 Osmosis Inversa	15
2.4 Intercambio Iónico	16
2.4.1 Aplicaciones del Intercambio Iónico	19
2.4.2 Resinas de Intercambio Iónico	19
2.4.2.1 Estructura física y química de las resinas	20
2.4.2.2 Selectividad de las resinas	22
2.4.2.3 Factores que afectan el proceso de Intercambio Iónico	23
2.4.3 Tipos de resinas de Intercambio Iónico	25
2.4.3.1 Resinas catiónicas de ácido fuerte	25
2.4.3.2 Resinas catiónicas de ácido débil	25
2.4.3.3 Resinas aniónicas de base fuerte	27
2.4.3.4 Resinas aniónicas de base débil	27
2.4 Legislación en materia de aguas residuales	28
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	27
3.1 Introducción	30
3.2 Análisis fisicoquímico de las muestras de agua	31
3.2.1 Muestreo	31
3.2.2 Caracterización del agua	32
3.2.2.1 pH	32
3.2.2.2 Conductividad	33
3.2.2.3 Dureza total en aguas naturales	33
3.2.2.4 Alcalinidad en aguas naturales	34

3.2.2.5	Acidez en aguas naturales	34
3.3	Análisis de las resinas	35
3.3.1	Análisis infrarrojo (FTIR)	35
3.3.2	Metodología de regeneración de resinas de intercambio iónico	36
3.3.2.1	Pretratamiento	36
3.3.2.2	Tratamiento de regeneración	36
3.3.3	Medición de la capacidad de intercambio	37
3.3.4	Curvas de ruptura	39
3.3.5	Pruebas en columnas	39
3.4	Resultados y discusión	41
3.4.1	Caracterización del agua potable	41
3.4.2	Identificación de las resinas de intercambio	42
3.4.3	Efecto de la concentración de regenerante en la velocidad de intercambio y el tiempo de ruptura	
3.4.3.1	Resina 1	45
3.4.3.2	Resina 2	47
3.4.3.3	Resina 3	51
3.4.3.4	Resina 4	55
3.4.3.5	Pruebas en columnas	65
3.4.4	Discusión de los resultados	67
3.4.5	Conclusiones parciales	69
CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE OSMOSIS INVERSA E INTERCAMBIO IÓNICO		
4.1	Introducción	71
4.2	Simulación de Ósmosis Inversa	72
4.2.1	Metodología para la simulación de ósmosis inversa	72
4.2.2	Sistema de ósmosis inversa	73
4.2.3	Resultados de la simulación	73
4.2.4	Costos del proceso	75
4.3	Simulación de Intercambio Iónico	75
4.3.1	Metodología para el sistema de Intercambio Iónico	75
4.3.2	Sistema de Intercambio Iónico	76
4.3.3	Resultados de la simulación	77
4.3.4	Costos del Intercambio Iónico	79
4.3.5	Conclusiones parciales	80
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES		81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85
GLOSARIO		91
ANEXOS		93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Equipo BARNSTEAD™ E-PURE™ para laboratorio	5
Figura 1.2	Resinas del equipo BARNSTEAD™ E-PURE™	6
Figura 3.1	Representación de pruebas en columnas.	39
Figura 3.2	Espectrogramas FTIR de las resinas. 1, resina catiónica; 2, resina aniónica; 3, resina catiónica; 4A, resina aniónica; y 4B, resina catiónica. El apostrofo señala a las resinas al final del proceso de regeneración.	44
Figura 3.3	Velocidad de intercambio y regeneración de la resina 1 con regenerante con NaOH a distintas concentraciones.	46
Figura 3.4	Curvas de ruptura de la resina regenerada con NaOH a distintas concentraciones.	47
Figura 3.5	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 2. Regenerante: NaOH	48
Figura 3.6.	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 2 regenerada con NaOH.	49
Figura 3.7.	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 2. Regenerante: NH ₄ OH	50
Figura 3.8	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 2 regenerada con NH ₄ OH.	50
Figura 3.9.	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 3. Regenerante: H ₂ SO ₄	52
Figura 3.10	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 3 regenerada con H ₂ SO ₄ .	53
Figura 3.11	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 3. Regenerante: HCl	54
Figura 3.12	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 3 regenerada con HCl.	55
Figura 3.13	1) Gráfico de la velocidad de intercambio y 2) curva de ruptura de la resina mixta 4 sin regenerar.	56
Figura 3.14.	Gráfico de la velocidad de intercambio de la resina 4A y 4B sin regenerar.	56
Figura 3.15	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4A regenerada NaOH.	57
Figura 3.16	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4A regenerada con NaOH.	58
Figura 3.17	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4A regenerada con NH ₄ OH.	59
Figura 3.18	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4A regenerada con NH ₄ OH.	59
Figura 3.19	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4B regenerada con H ₂ SO ₄ .	60
Figura 3.20	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4B regenerada con H ₂ SO ₄ .	61
Figura 3.21	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4B regenerada con HCl.	63

Figura 3.22	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4B regenerada con HCl.	54
Figura 3.23	Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4 mixta regenerada.	64
Figura 3.24	Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4 mixta.	64
Figura 3.25	Intercambio iónico y regeneración en columnas	66
Figura 4.1	Descripción gráfica del sistema de Osmosis Inversa.	73
Figura 4.2	Diagrama del sistema de Intercambio Iónico.	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Tecnologías de tratamiento de aguas	14
Tabla 2.2	Factores que afectan la velocidad de intercambio iónico (International Atomic Energy Agency, 2002)	24
Tabla 3.1	Arreglo experimental.	37
Tabla 3.2	Características fisicoquímicas del agua analizada.	41
Tabla 3.3	Concentración de regenerante para cada una de las resinas en las columnas.	65
Tabla 3.4	Flujos de operación.	65
Tabla 4.1	Análisis físico-químicos y valores recomendados.	72
Tabla 4.2	Resultados del proceso de Osmosis Inversa.	74
Tabla 4.3	Costos de inversión y operación del sistema de Osmosis Inversa.	75
Tabla 4.4	Valores del agua de alimentación.	76
Tabla 4.5	Información físico-química y de operación las dos resinas utilizadas en el modelo.	78
Tabla 4.6	Valores del agua de salida del sistema de Intercambio Iónico.	79
Tabla 4.7	Costos del proceso de Intercambio Iónico.	80

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es uno de los recursos más valiosos en el mundo dado que es esencial para todo tipo de vida en la Tierra. Además, el recurso hídrico hace posible la existencia de diversos beneficios como son la agricultura, el comercio, la salud, y la manufactura. El agua también provee múltiples beneficios no extractivos como el transporte, recreación, energía hidroeléctrica y hábitat para la vida acuática (Jackson et al., 2001).

En los últimos años, debido a distintos factores tales como: demográficos, económicos, sociales, tecnológicos, de gobierno, medio ambiente y cambio climático, la calidad y disponibilidad del agua en el mundo se convierte día a día en un problema crítico en el marco global (UNESCO, 2009).

Actualmente, aproximadamente 3829 km^3 de agua son consumidos cada año por tres sectores principales: 10% sector doméstico, 20% sector industrial y 70% sector agricultura. Alrededor del 20% del total es extraído de fuentes subterráneas y este rubro incrementa rápidamente, sobre todo en asentamientos ubicados en zonas áridas y semi-áridas donde el agua subterránea es comúnmente la única fuente disponible para la obtención del vital líquido (UNESCO, 2009). Esta particularidad ha causado escasez o presión sobre el agua subterránea en distintas partes del mundo, siendo algunas regiones de India, el oeste de Estados Unidos, México, Arabia Saudita y el norte de África, los lugares más afectados (Aeschbach-Hertig and Gleeson, 2012).

Particularmente, México es considerado como uno de los diez más grandes consumidores de agua en el mundo, con un consumo de aproximadamente 80.2 km^3 en el año 2012 (UNESCO, 2009; CONAGUA 2012), un 37.7% de este volumen ha sido extraído de 653

acuíferos localizados a lo largo del país. Tal intensidad en la extracción de agua subterránea ha llevado a la sobreexplotación de 101 reservorios localizados principalmente en el centro, norte y noroeste del país, donde el clima es generalmente árido o semiárido (CONAGUA 2012).

Lo anterior demanda más y mejores estrategias para el cuidado del agua, siendo el tratamiento del agua y su reutilización, una de las alternativas más exploradas hoy en día. En este sentido, las tecnologías para la depuración de aguas son variadas, y su aplicación depende de las necesidades propias del tipo de agua a tratar (por ejemplo: residual, gris, industrial, natural), de la naturaleza de sus componentes, y de las características requeridas al final del tratamiento.

El continuo desarrollo tecnológico y la investigación nos ayuda para evolucionar los procesos de tratamientos de aguas residuales con la finalidad de cumplir con las normas vigentes. Pero también es importante evaluar nuevos productos que han sido desarrollados con este fin y dar a conocer desarrollos tecnológicos en cuanto a nuevos equipos y diferentes alternativas para el tratamiento del agua residual.

La gran variabilidad de contaminantes que presentan las aguas residuales hace necesario realizar un estudio concreto de caracterización, en especial cuando se desea definir estrategias de tratamiento y aplicación para asegurar la conformidad con la normativa de vertido a causes receptores (Barajas, 2002). Las plantas de tratamiento se han convertido en la principal herramienta para tales objetivos. Los principales tratamientos para la eliminación de residuos son la sedimentación, sistemas biológicos (lodos activados u otros) o tratamientos fisicoquímicos.

Dentro de los tratamientos fisicoquímicos se encuentra el intercambio iónico. El intercambio iónico es un proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales sobre la superficie de un sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por iones de una especie diferente en disolución (Ramalho, 1996) sin que se aprecien cambios en la estructura sólida. El intercambio es estequiométrico y, como regla, reversible. Este proceso es esencialmente un proceso de difusión y tiene un poco, o ninguna, relación con la cinética de reacción química en el sentido usual. Normalmente el intercambiador iónico es selectivo, es decir, que ocupa ciertos contra-iones en preferencia a otros (Helfferich, 1995) Este procedimiento ha llegado a ser notablemente importante en el campo del tratamiento de aguas residuales para remover el nitrógeno, metales pesados y sólidos disueltos totales (Metcalf & Eddy, 2003). También se utiliza en muchos otros procesos químicos, incluyendo separaciones simples o cromatográficas, en hidrometalurgia para la separación y recuperación de metales, en la manufactura del azúcar, en farmacia y medicina, en bioquímica y biotecnología, así como en agricultura y en el procesamiento de alimentos. Los intercambiadores iónicos de uso más generalizado tanto en el laboratorio como en la industria son las denominadas resinas sintéticas de intercambio iónico, estas resinas pueden ser definidas como una matriz insoluble conteniendo iones lábiles capaces de intercambiarse con otros iones del medio, sin ningún otro cambio físico que el de ocupar un lugar en la estructura. Estos intercambiadores iónicos están al alcance comercial, tienen capacidad de adsorción alta y son de gran interés tanto en el laboratorio como en aplicaciones industriales.

1.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO

El sistema de estudio en este trabajo es una planta piloto de tratamiento de aguas residuales que, hasta ahora solo cuenta con la etapa del tratamiento primario, por lo que se pretende incorporar un proceso de intercambio iónico.

El tipo de efluente a tratar proviene de una industria metal mecánica, siendo este tipo de agua residual caracterizada por su alto contenido en materia disuelta y en suspensión, tal como carbonatos, sulfuros, cloruros, compuestos orgánicos, metales pesados, aceites y materia orgánica. La etapa de tratamiento primario involucra procesos como remoción de arenas, remoción de grasas, homogenización y procesos de coagulación-floculación. Sin embargo, la problemática radica en la necesidad de mejorar las características finales del agua residual para su utilización en el ramo industrial.

En la planta de tratamiento se ha propuesto la implementación de un proceso de intercambio iónico que utiliza cartuchos comerciales con resinas. El objetivo es mejorar la calidad del efluente de manera tal que pueda ser reutilizada. No obstante, es sabido que los cartuchos se agotan eventualmente, es decir que su capacidad va disminuyendo con el tiempo y se vuelve necesario reemplazarlos. Ello genera un costo muy alto y difícilmente costeable.

Por ello, las resinas deben ser regeneradas mediante procedimientos simples. Pero deberán definirse condiciones adecuadas para llevar a cabo esta tarea. Una vez tratados, los cartuchos comerciales pueden incorporarse nuevamente en el proceso.

1.1.1 TRATAMIENTO Terciario: EQUIPO DE INTERCAMBIO IÓNICO

En particular, el estudio del tratamiento terciario se llevó a cabo utilizando un sistema de Intercambio Iónico para laboratorio. El sistema en cuestión se seleccionó por la disponibilidad que presentaba este para su estudio. Éste es un equipo *Barnstead E-pure*, de la empresa Barnstead Thermolyne Corporation serie 1090, equipado con cuatro cartuchos (columnas) empacados con resinas comerciales (Figura 1.1). El agua de alimentación puede ser pre-tratada o conectarse directo del grifo. El equipo cuenta con una bomba de recirculación, un filtro que elimina bacterias y partículas, y un medidor digital de resistividad con indicador de temperatura.

Este equipo produce agua de tipo 1 (desionizada) que bajo condiciones normales de operación presenta una conductividad de $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$ (resistividad de $18.2 \text{ MW}/\text{cm}$).



Figura 1.1 Equipo BARNSTEAD™ E-PURE™ para laboratorio.

La conformación de los cartuchos es variada, de acuerdo a la información del equipo, el primer cartucho se ocupa de retener las partículas de mayor tamaño, el segundo cartucho es el encargado de intercambiar la mayor cantidad de iones que quedan aún en el agua, el

tercer cartucho elimina los iones que no fueron eliminados en los primeros dos cartuchos, y por último, el cuarto cartucho se encarga de los organismos remanentes.

El primer cartucho contiene resina (*Resina 1*) y carbón activado, el segundo cartucho tiene dos tipos de resina (*Resina 2* y *Resina 3*) en lecho estratificado, el tercer y cuarto cartucho contienen un lecho mixto de las resinas de tipo *4A* y *4B* (Figura 1.2). Finalmente, el último cartucho también incluye carbón activado. La clasificación de estos tipos de resinas se mostrará a continuación.

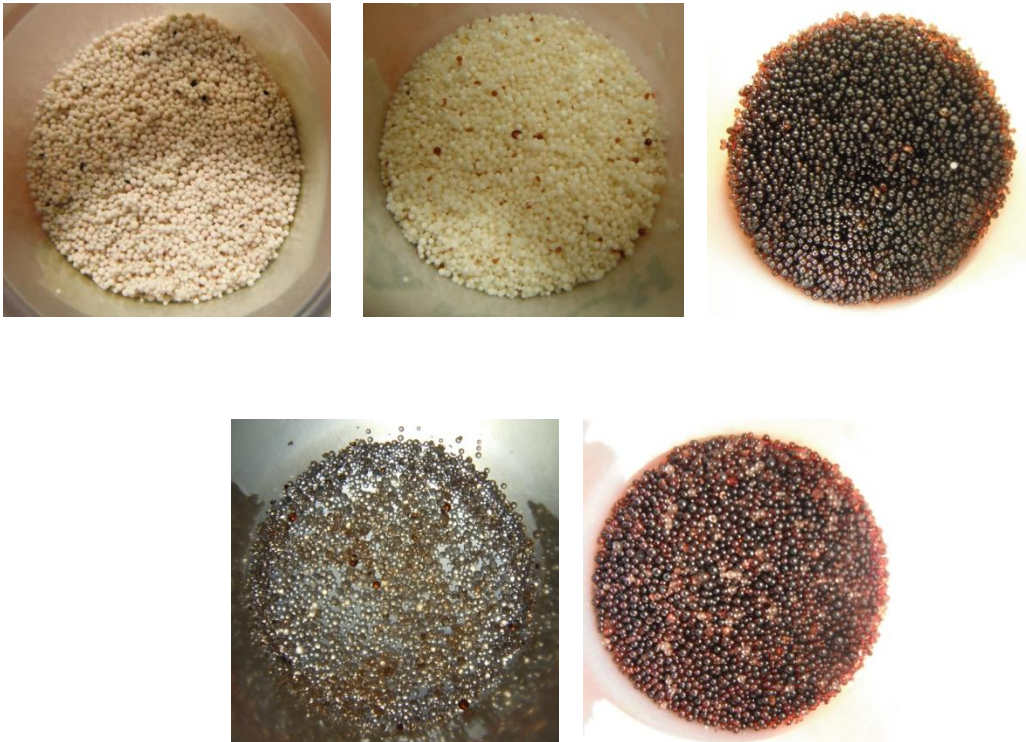


Figura 1.2 Resinas de las cuatro columnas de intercambio del equipo Barnstead E-pure.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar la regeneración de resinas de intercambio iónico comerciales, para su reutilización en un tren de tratamiento de aguas residuales industriales y la obtención de agua desionizada que pueda ser reutilizada en otros procesos que así la requieran.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudiar el efecto de la concentración de la solución regenerante en la eficiencia de regeneración de resinas de intercambio (individualmente).

Proponer una estrategia de regeneración de resinas de intercambio iónico para su reutilización en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Simular el proceso de intercambio iónico y estimar el costo del proceso en comparación con otros sistemas de tratamiento terciario

1.4 JUSTIFICACIÓN

Los requerimientos actuales de tratamiento de Aguas Residuales son establecidos por la normativa existente en el país. Estos requerimientos han impulsado la aparición de nuevas tendencias en la configuración y operación de los sistemas de tratamiento. Sin embargo, el costo de los procesos también incrementa y por ello es importante encontrar soluciones que no sólo sean eficientes en el aspecto ambiental, sino también en el económico.

Por otra parte, en los últimos años, los problemas de escasez de agua han ido en aumento. El objetivo del tratamiento de aguas residuales ya no debería limitarse solo a alcanzar

ciertos límites de descarga. Cada vez en más países se da mayor atención a incluir opciones de reciclaje dentro de los esquemas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de producir efluentes de alta calidad para diferentes propósitos. Los trenes de tratamiento son cada vez más específicos, ya que están orientados a la reutilización del efluente o de los materiales de tratamiento. Dentro de este escenario, las alternativas a los trenes convencionales de tratamiento deben desarrollarse de acuerdo a las necesidades específicas a cumplir.

Este proyecto está enfocado en el estudio y propuesta de un método de regeneración de resinas de intercambio iónico con el objetivo de obtener agua del tipo desionizada para su venta o reutilización en procesos dentro de la misma empresa o su laboratorio que requieran del uso de agua ultrapura. Con lo anterior se pretende un ahorro económico en el uso de cartuchos con resinas regeneradas en lugar de la compra de nuevos cartuchos.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

La contaminación del agua ha contribuido a un rápido deterioro mundial del medio ambiente, y por lo tanto es una de las principales cuestiones que se intenta evitar por la industria. Descargas de aguas industriales pueden contener una amplia gama de contaminantes y, en muchos casos, no sólo drena directamente a los ríos y lagos, sino que también se filtra en el suelo contaminando los acuíferos y pozos (UNEP, 2010).

2.1 AGUA RESIDUAL

El agua residual es esencialmente el agua suministrada a la comunidad después de que esta fue usada en una variedad de aplicaciones. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, el agua residual puede ser definida como una combinación de líquido o el agua que lleva los residuos eliminados de las residencias, instituciones, comercios y establecimientos industriales, junto con el agua subterránea, de la superficie, de lluvias (Metcalf & Eddy, 2003).

Esta agua contiene nutrientes, que pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas, puede contener componentes tóxicos o potencialmente mutagénicos o cancerígenos. Por esta razón, la recolección, tratamiento, reuso o disposición del agua residuales es necesaria para proteger la salud pública y el medio ambiente (Metcalf & Eddy, 2003).

Las cuatro fuentes principales de aguas residuales son: (1) aguas domesticas o urbanas, (2) aguas residuales industriales, (3) escorrentías de usos agrícolas, y (4) pluviales (Ramalho, 1996).

2.1.1 TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

Es común clasificar a las aguas residuales en dos tipos: industriales y municipales. En muchos casos las aguas residuales industriales requieren tratamiento antes de ser descargadas en el sistema de alcantarillado municipal o en cualquier otro receptor; como las características de estas aguas residuales cambian de una a otra industria, los procesos de tratamiento son también muy variables. No obstante, muchos de los procesos empleados para tratar aguas residuales municipales se emplean también con las industrias. Existen aguas residuales industriales que tienen características compatibles con las municipales, por lo que se descargan directamente en los sistemas públicos de alcantarillado (Valdez & González, 2003).

2.1.2 CONSTITUYENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los contaminantes del agua se clasifican en tres categorías: (1) químicos, (2) físicos y (3) biológicos. Los contaminantes químicos comprenden tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. El aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos. En el caso de la contaminación derivada de la presencia de compuestos inorgánicos el resultado más importante es su posible efecto tóxico, más que la disminución de oxígeno. Sin embargo, hay casos en los cuales los compuestos inorgánicos presentan una demanda de oxígeno, contribuyendo a la disminución del mismo (Ramalho, 1996).

Algunos contaminantes físicos incluyen (1) cambios térmicos (contaminación térmica); (2) el color; (3) turbidez; (4) espumas y (5) radioactividad. Los contaminantes biológicos son

los responsables de la transmisión de enfermedades en las aguas de abastecimiento (Ramalho, 1996).

2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento del agua es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua residual con el fin de remover o reducir sus contaminantes y lograr que sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas cumplan las especificaciones contenidas en las normas que regulan la materia (Cartwright, 2009).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales se han diseñado y operado para controlar la contaminación del agua y reducir al mínimo los impactos ambientales de los vertidos de aguas residuales industriales y municipales. Sin embargo, los sistemas de tratamiento de aguas crudas consumen energía y reactivos químicos, además de la producción de lodos y emisiones contaminantes. Diferentes opciones de tratamiento de aguas residuales disponibles ofrecen varias características de rendimiento, así como los efectos directos distintos sobre el medio ambiente. Existen estos impactos en todo el ciclo de vida del proceso de tratamiento. Por lo tanto, es necesario analizar los sistemas para determinar su contaminación en general y permitir futuras mejoras. (Wu et al, 2010).

Los procesos de tratamiento de aguas residuales industriales deben satisfacer, por un lado, los requerimientos cada vez mayores de las leyes ambientales y, por otra parte, es necesario minimizar los costos de construcción y operación, que cada vez juegan un papel más importante en la economía de la industria. Para poder satisfacer estos requerimientos son necesarias, además de procesos de tratamiento eficaces, estrategias de control adecuadas (Moreno, 2002).

2.2.1 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En la mayoría de los casos para tratar el agua, se necesita una combinación o secuencia de métodos, que depende de la calidad del agua sin tratar y la calidad deseada para el agua tratada (Crittenden et al., 2005).

Los procesos para la depuración de las aguas residuales municipales e industriales han sido divididos típicamente en tres categorías (Henry, 1999; EEA, 2006): a) El tratamiento primario; que involucra filtración y la remoción físico-química de contaminantes (Tamizado, Aeración, Destilación, Filtración, Coagulación, Floculación, Flotación, Mezclado y Sedimentación); b) El tratamiento secundario o biológico, consistente en la remoción de los contaminantes microbiológicos y la materia orgánica consumidora de oxígeno (oxidación aerobia, digestión anaerobia), y c) El tratamiento terciario, que involucra métodos químicos para remover contaminantes más complejos (Oxidación avanzada, Adsorción, Precipitación, Neutralización e Intercambio iónico).

Los componentes en el agua residual son removidos por medios físicos, químicos y biológicos. Aunque varias de estas operaciones y procesos se combinan en la mayoría de los sistemas de tratamiento, por lo general se consideran por separado (Crittenden et al., 2005).

Los trenes de tratamiento convencionales se utilizan típicamente para el tratamiento de las aguas con problemas de calidad tales como una alta turbidez (típicamente > 20 Unidades Nefelométricas de Turbidez), coloración (> 20 Unidades de Color), o una concentración alta de Carbono Orgánico Total (> 4 mg/L). Un tren de tratamiento convencional consiste

proceso de la coagulación, floculación, sedimentación, filtración en medio granular, y desinfección (Crittenden et al., 2005).

2.2.2 REÚSO DE AGUAS RESIDUALES

A través de los años, se han desarrollado una gran cantidad de tecnologías de tratamiento para la reducción de contaminantes y la Tabla 2.1 identifica aquellas que son apropiadas para cada tipo de contaminantes (Cartwright, 2009).

Las provisiones de agua cruda por lo general tienen concentraciones de contaminantes bastante menores que la mayoría de las aguas residuales; sin embargo, las mismas tecnologías que son utilizadas para purificar las provisiones de agua cruda (purificación del agua) pueden ser utilizadas para tratar las aguas residuales para su reúso (Cartwright, 2009).

Los factores motivadores que impulsan las decisiones de tratamiento de aguas residuales son los siguientes:

- Reglamentos de descarga cada vez más estrictos.
- Aumento de costos para el tratamiento de materias residuales en Obras de Tratamiento de Propiedad Pública (POTW).
- Aumento de costos de suministros de agua cruda.
- Valor de las relaciones públicas de la responsabilidad ecológica.
- Valor potencial de volver a usar el material residual concentrado.
- Alta presión de consumo en los mantos acuíferos.

Tabla 2.1 Tecnologías de tratamiento de aguas.

Tecnologías de tratamiento	Remoción de sólido suspendidos	Remoción de orgánicos disueltos	Remoción de sales	Remoción de microorganismos
PROCESOS BIOLÓGICO				
Bioreactor de membrana (MBR)	X	-	-	X
Lodo activado	X	X	-	X
Digestión anaerobia	X	X	-	-
Bio-filtros	-	X	-	-
AIREACION EXTENDIDA				
Bio-desnitrificación	-	L	-	-
Bio-nitrificación	X	X	-	-
PROCESOS QUIMICOS				
OXIDACIÓN QUÍMICA				
Oxidación catalítica	X	X	-	-
Cloración	X	X	-	X
Ozonización	-	L	-	-
Precipitación química	-	-	X	X
Reducción química	-	-	X	X
COAGULACIÓN				
Químicos inorgánicos	X	X	-	X
PROCESOS ELECTROLÍTICOS				
Electrodialisis	-	-	X	-
Electrólisis	-	-	X	-
EXTRACCIONES				
Intercambio iónico	-	-	X	-
Líquido-líquido (Solvente)	-	-	X	-
PROCESOS FISICOS				
ADSORCIÓN DE CARBÓN				
Carbón activado granular	X	X	-	-
Resinas especiales	-	L	L	-
Destilación	X	X	X	X
FILTRACIÓN				
F. de tierra diatomácea	X	-	-	X
Micro-rastreo	X	-	-	X
Filtración de arena	X	-	-	X
Floculación-sedimentación	X	-	-	X
Flotación por aire disuelto (DAF)	X	X	-	-
PROCESOS DE MEMBRANA				
Microfiltración	X	-	-	X
Ultrafiltración	X	X	-	X
Nanofiltración	X	X	L	X
Ósmosis inversa	X	X	X	X
Arranque (aire o vapor)	X	X	-	-

L= bajo ciertas condiciones habrá una efectividad limitada

2.3 TRATAMIENTOS AVANZADOS DE AGUAS RESIDUALES

En los tratamiento avanzados, la suma de combinaciones de métodos de tratamientos y procesos son usados para remover solidos suspendidos y otros constituyentes que no son removidos significativamente por tratamientos secundarios convencionales (Metcalf & Eddy, 2003).

Para que el reciclaje completo del agua sea factible, es esencial la eliminación de los solutos inorgánicos disueltos. El efluente del tratamiento secundario de aguas residuales contiene generalmente 300-400 mg/L más de material inorgánico disuelto que el suministro de agua municipal. Por consiguiente, es obvio que reciclar al 100% el agua sin la remoción de los compuestos inorgánicos causaría la acumulación de un nivel intolerable de material disuelto. Incluso cuando el agua no se destina para la reutilización inmediata, la eliminación de nutrientes inorgánicos fosforo y nitrógeno, es muy deseable para reducir la eutrofización aguas abajo en una corriente hídrica. En algunos casos, la remoción de metales traza tóxicos es necesario (Manahan, 2007).

Uno de los métodos más obvios para eliminar los compuestos inorgánicos del agua es la destilación. Sin embargo, la energía requerida para la destilación es bastante alta, por lo que en general, esta no es económicamente factible. No obstante, procesos como Intercambio Iónico y procesos de membrana como Osmosis Inversa son los medios más rentables para remover materiales inorgánicos del agua (Manahan, 2007).

2.3.1 ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es uno de los varios procesos de membrana conducidos bajo presión para la purificación del agua (Van der Bruggen et al., 2003), esta es una técnica muy útil y bien desarrollada (Magara et al., 2000). El tratamiento de ósmosis inversa reduce la concentración de sólidos disueltos, incluyendo una variedad de iones y metales y partículas suspendidas muy finas tales como asbestos que pueden ser hallados en la muestra; sin embargo, este tratamiento no remueve todos los contaminantes, los gases disueltos como el oxígeno y el dióxido de carbono logran pasar las membranas de ósmosis inversa junto con el agua tratada (Wagenet et al., 2005).

El tratamiento de ósmosis inversa consiste en forzar el agua a través de una membrana semipermeable que permite el paso del agua pero no de otro material. Este proceso, que no es una simple separación a través de tamices o ultrafiltración, depende de la sorción preferencial del agua en la superficie de una membrana porosa de acetato de celulosa o poliamida (Manahan, 2007). El agua tratada pasa de ser una solución concentrada a otra más diluida. A la primera se le llama “rechazo” y a la segunda (solución diluida) se le llama “permeado”.

2.4 INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico es el proceso mediante el cual un material sólido insoluble, intercambia los iones de su estructura por una cantidad estequiométricamente equivalente de otros iones de la misma carga cuando se encuentra en contacto con una solución de electrolitos (Handershot et al. 2007; Helfferich, 1995).

El intercambio iónico es normalmente un proceso reversible. En el ablandamiento del agua, por ejemplo, un intercambiador catiónico el cual ha perdido todos sus iones Na^+ y por lo tanto se ha agotado, puede ser “regenerada” con una solución de sal tal como NaCl . En la regeneración el proceso se revierte, y el ion intercambiador es reconvertido a la forma Na^+ (Harland, 1994; Helfferich, 1995).

El intercambio iónico se asemeja a la adsorción, ya que, en ambos casos, una especie disuelta es tomada por un sólido. La diferencia característica entre los dos fenómenos es que el intercambio iónico, en contraste a la adsorción, es un proceso estequiométrico. Cada ion que es removido de la solución es remplazado por una cantidad equivalente de otra especie iónica de la misma carga. (Helfferich, 1995; Margineda, 2004).

Los intercambiadores iónicos deben sus propiedades características a un peculiar rasgo de su estructura. Consisten de una estructura/entramado que permanece estable debido a enlaces químicos o energía reticular. Este entramado lleva una carga excedente eléctrica positiva o negativa, llamado *contra iones*. Los contra iones son libres de moverse sin el entramado y pueden ser remplazados por otros iones de la misma carga.

De acuerdo con este simple modelo, el contra ion contenido en el intercambiador iónico – llamado capacidad de intercambio iónico - es una constante que se da únicamente por la magnitud de la carga de entramado y es independiente de la naturaleza del contra ion.

Cuando un intercambiador iónico en forma R-A es puesto en una solución electrolítica BY, los contra iones A van a migrar del intercambiador (R) a la solución y los contra iones B van a ir de la solución al intercambiador iónico, es decir, un intercambio de contra iones toma lugar. Después de cierto tiempo, el equilibrio del intercambio iónico es alcanzado.

Ahora, tanto el intercambiador iónico como la solución contienen ambas especies de contra iones A y B. (Perry and Green, 2008).

A fin de entender completamente cómo ocurre el intercambio iónico, es importante mencionar que cuando un intercambiador iónico es puesto en contacto con una solución, enseguida se forma una capa sobre la superficie del material. El espesor de dicha capa puede variar entre 10 y 100 micrometros, dependiendo de la velocidad del flujo de agua que pasa sobre las resinas. Entonces, una manera simplificada de describir el mecanismo y la cinética del proceso de intercambio iónico involucra las siguientes 5 etapas: 1) difusión de los iones en la solución hacia la superficie del material, 2) difusión de los iones a través de la capa hidratada que rodea al material, 3) transporte del ión a través de la interfase capa límite-partícula, 4) difusión intraparticular y 5) la reacción de intercambio iónico (International Atomic Energy Agency, 2002).

Anteriormente se ha mencionado que, en el equilibrio de intercambio iónico, las relaciones de concentración de las especies de contra-iones que compiten en el intercambiador iónico y en la solución no son las mismas. Como regla, el intercambiador iónico prefiere a una especie que otra. Esto muestra que la redistribución de los contra-iones no es puramente estadística. La preferencia por una especie puede tener muchas causas, entre las que destacan (Stahlberg, 2005):

1. La carga electrostática de las resinas y sus interacciones con la solución
2. El radio de hidratación de la resina
3. Tamaño de los iones
4. Polaridad de los iones en solución

Todos estos efectos dependen de la naturaleza del contra-ion y por tanto puede dar lugar a una captación preferencial de una especie sobre otras. La habilidad del intercambiador iónico para distinguir entre varias especies de contra-iones es llamada *selectividad* (Helfferich, 1995).

2.4.1 APLICACIONES DEL INTERCAMBIO IÓNICO (AGUA POTABLE)

Los suministros de agua natural contienen sales que se disocian 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. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y 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 carbonato, bicarbonato, sulfato, cloruro y silicio (Avilla, 1999).

La principal aplicación del intercambio iónico se produce en el ablandamiento de aguas, eliminando iones divalentes que son sustituidos por sodio. Con este tratamiento se pretende eliminar el calcio y magnesio, aunque de la misma forma sean eliminados el radio y el bario. El intercambio iónico también puede ser empleado para eliminación de nitratos, fluoruros, arsénico, selenio, cromatos, uranio y percloratos (AWWA, 2002).

2.4.2 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de la mayoría de especies iónicas en las aguas por varias razones: las resinas poseen una alta

capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y pueden regenerarse (con previo conocimiento de sus características físico-químicas y condiciones de regeneración), los efectos de la temperatura son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto en grandes como en pequeñas instalaciones, por ejemplo, desde suavizadores de agua para el hogar hasta grandes instalaciones de servicios (Avilla, 1999).

Las resinas se presentan de dos formas, en forma de perlas granulares (resinas) y láminas o membranas. Aunque la mayoría de los materiales de Intercambio Iónico suelen comercializarse en forma de gránulos o esferas (resinas) de tamaño y uniformidad apropiada para llevar a cabo cada aplicación. Estos materiales presentan un diámetro entre 0.04 mm y 1.3 mm, regularmente.

En presencia de agua, las resinas de intercambio poseen densidades del orden de 1.1-1.5 kg/L. Cuando se colocan en una columna suelen dejar un volumen libre del orden del 50-75% del volumen total. Por último, los sistemas de Intercambio Iónico deben de ser capaces de resistir cambios rápidos de concentraciones en las disoluciones con las que están en contacto (Martínez y Rus., 2004).

2.4.2.1 ESTRUCTURA FÍSICA Y QUÍMICA DE LAS RESINAS

Los requisitos básicos de las esferas de intercambio iónico son el tamaño de la esfera, su resistencia a las fracturas; además de que, la resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de funcionamiento y tener dimensiones uniformes con un tamaño de 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 (Avilla, 1999).

Las resinas de intercambio iónico pueden ser gelatinosa o macroporosa. Las resinas gelatinosa con polímeros homogéneos entrecruzados y son las resinas más comúnmente disponibles. Estas tienen sitios de intercambio distribuidos de manera uniforme a través de la esfera. La cantidad de entrecruzamiento de divinilbenceno (DVB) que se utiliza en la síntesis de una esfera determina 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 (Avilla, 1999; Oliveira, 2003).

Las resinas macroporosas están hechas con grandes poros que permiten el acceso a sitios interiores de intercambio. También se conocen como resinas macro-reticulares o de poros fijos. Las resinas macroporosas son fabricadas a través de un proceso que deja una red de vías a través de las 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 de 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 (Avilla, 1999).

Existen dos tipos principales de estructuras químicas, estirénicas y acrílicas. Los materiales a base de estireno son hidrocarburos aromáticos y las acrílicas son hidrocarburos de cadena recta basadas en poliacrilato 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 es parte de la estructura física. Esto significa que sus estabilidades físicas y químicas están entrecruzadas. Cuando una resina se degrada químicamente, ocurre por lo general en el sitio de intercambio, que es el eslabón más débil. Cuando se oxida una resina acrílica, ésta se hinchará y ablandará (Avilla, 1999).

2.4.2.2 SELECTIVIDAD DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

La selectividad es la propiedad por la cual un Intercambiador Iónico, en este caso las resinas de Intercambio Iónico, muestra mayor afinidad a un ión que a otro y la manera en que se determina esta propiedad es a través del coeficiente de selectividad (Chillón, 2009).

El agua es un componente esencial en las resinas de intercambio iónico. Por ejemplo, las resinas catiónicas de ácido fuerte contienen aproximadamente 50% de humedad, aproximadamente. La cantidad de entrecruzamiento de la esfera tiene un impacto sobre su contenido de humedad y, a su vez, el contenido de humedad tiene un impacto sobre la selectividad. Una esfera con un alto contenido de humedad tiene una alta porosidad y los grupos activos se encuentran más separados uno del otro (Avilla, 1999).

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. Por ejemplo una resina catiónica agotada que se utiliza para disminuir la dureza en el agua, por lo general, se encuentra en forma de calcio o magnesio. La resina es restaurada a su condición regenerada, la forma del sodio para este caso el Hidrogeno para otro tipo de casos, introduciendo una solución saturada de cloruro de sodio. Esta solución de cloruro de sodio se encuentra lo suficientemente concentrada como para revertir la selectividad. La fuerza impulsora del ion monovalente de sodio luego convierte la resina a la forma de sodio (Ramos, 2012).

2.4.2.3 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO.

La tasa de intercambio iónico, o cinética, de las reacciones de intercambio es gobernada por varios factores relacionados con los procesos difusivos que se han señalado anteriormente. Tomando en consideración que el intercambio iónico es un proceso no sólo químico (reactivo) sino también físico (difusivo), se pueden señalar algunos factores que afectan al intercambio iónico, por ejemplo: la naturaleza de la resina, la naturaleza de los contra-iones, el régimen de agitación, tamaño de partícula, naturaleza de los grupos funcionales, temperatura, etc. (Tabla 2.2) (International Atomic Energy Agency, 2002).

Tabla 2.2 Factores que afectan la velocidad de intercambio iónico (International Atomic Energy Agency, 2002)

Parámetro	Difusión intraparticular	Difusión en la capa límite
Movilidad del contra-ión		
<i>Fase sólida</i>	Proporcional a D_e	Sin efecto
<i>Fase líquida</i>	Sin efecto	Proporcional a D_f
movilidad del co-ión	Sin efecto	Sin efecto
Tamaño de partícula	Proporcional a $1/r^2$	Proporcional a $1/r$
Capacidad del intercambiador iónico	Sin efecto	Proporcional a $1/x$
Naturaleza de los grupos funcionales	Lento cuando los grupos se asocian con iones móviles	Sin efecto
Porcentaje de entrecruzamiento	Disminuye con el incremento del entrecruzamiento	Sin efecto
Selectividad del intercambiador iónico	La velocidad de intercambio es mayor con los contra-iones por los que se tiene mayor selectividad	
Concentración de la solución	Sin efecto	Proporcional a la concentración
Volumen de solución	Disminuye con el incremento de la solución	
Temperatura	Incrementa con la temperatura	
Agitación	Sin efecto	Incrementa con la velocidad de agitación

Dónde:

De: es el coeficiente de difusividad en la fase sólida.

Df: es el coeficiente de difusividad en la fase líquida

r: es el radio de la partícula

x: es la longitud de la capa límite

2.4.3 TIPOS DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Las diferentes resinas que pueden emplear para el tratamiento de aguas se puede hacer la siguiente clasificación (AWWA, 2002):

- Intercambiadores catiónicos de ácido fuerte y débil.
- Intercambiadores aniónicos de base fuerte y débil.
- Resinas especiales.

2.4.3.1 RESINAS CATIONICAS DE ÁCIDO FUERTE (TIPO ÁCIDO SULFÓNICO)

Las resinas catiónicas fuertemente ácidas derivan su funcionalidad de los grupos ácidos sulfónicos. Estos intercambiadores catiónicos de ácido fuerte funcionan a cualquier nivel de pH (1 a 14), dividen todas las sales, y requieren una cantidad de 200% a 300% más de regenerante. Adicionalmente, estas resinas se caracterizan por rápidas velocidades de intercambio, son estables y pueden utilizarse por largos periodos de tiempo (20 años) con pequeñas pérdidas en su capacidad. 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 (Cheremisinoff, 2002).

2.4.3.2 RESINAS CATIONICAS DE ÁCIDO DÉBIL

Las resinas catiónicas débilmente ácidas contiene grupos carboxílicos como sitios de intercambio. Estas resinas separan los cationes de una solución, intercambiándolos por iones sodio (ciclo de sodio) o por iones hidrogeno (ciclo de hidrógeno). La separación se presenta de a siguiente manera:

Ciclo del sodio:

Ciclo del hidrogeno:

Donde R indica la resina y M^{2+} el catión (por ejemplo, Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Los iones quedan retenidos sobre la resina y se produce un efluente ablandado. Este efluente ablandado contiene principalmente sales de sodio (si se emplea el ciclo del sodio) o ácido (si se emplea el ciclo del hidrógeno) (Ramalho, 1996).

La resina es altamente eficiente, ya que es regenerada con solo 100% de la cantidad estequiométrica de ácido, comparado con el doble o triple 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 mg/l de $CaCO_3$. Se utilizan muy efectivamente en combinación con una resina catiónica de ácido fuerte, ya sea en configuración de lecho separado (cada tipo de resina en columnas separadas pero continuas entre sí) o lecho estratificado (los dos tipos de resinas en una misma columna pero sin mezclarse). En ambos casos, el agua del efluente se pone en contacto con la resina catiónica de ácido débil donde se eliminan los cationes Ca^+ , Mg^+ , Na^+ y K^+ . 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 (Cheremisinoff, 2002).

2.4.3.2 RESINAS ANIÓNICAS DE BASE FUERTE

Las resinas aniónicas de basicidad fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario. Estas resinas se obtienen con un método relativamente

sencillo a partir de la reacción de productos clorometilados de copolímeros de estireno-divinilbenceno con aminas terciarias. Los intercambiadores obtenidos son extremadamente estables y con una alta capacidad de intercambio. Actúa en un rango de pH de 0 a 13.

Una de las principales aplicaciones de los intercambiadores aniónicos de base fuerte es la eliminación de los nitratos, silicatos y carbonatos (Martinola, 1981).

Las resinas aniónicas de base fuerte requieren de una alta cantidad de NaOH para su regeneración (con eficiencias entre 18 y 33%), y son propensas a la obstrucción por materia orgánica y degradación por oxidación (Cheremisinoff, 2002).

2.3.4.4 RESINAS ANIÓNICAS DE BASE DÉBIL

Las resinas aniónicas de basicidad débil contienen aminas primarias, secundarias, terciarias y, en ocasiones, cuaternarias como grupos funcionales. Las resinas de base débil adsorben eficientemente los minerales de ácidos fuertes (acidez de mineral libre) del efluente del intercambio catiónico. 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.

Las resinas de base débil son utilizadas en aguas con alta cantidad de cloruros, sulfatos y nitratos, y de baja alcalinidad. Sin embargo, su actividad se ve reducida significativamente a pH mayor a 6. En un sistema de intercambio iónico, las resinas de base débil pueden utilizarse previamente a la resina de base fuerte a fin de proteger a esta última y reducir los costos de regeneración (Cheremisinoff, 2002).

2.4 LEGISLACIÓN EN MATERIA DE AGUAS RESIDUALES.

La legislación mexicana en materia de contaminación y protección ambiental parte originalmente de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, de la cual derivan las leyes y reglamentos en la materia, siendo la principal la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). En general, las normas de calidad de aguas están principalmente basadas en dos criterios: calidad del agua superficial y normas de limitación de descargas (Valdez & González, 2003).

En el país, la legislación en materia de aguas residuales prácticamente está depositada en las Normas Oficiales Mexicanas, que son las que a continuación se enlistan:

NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta Norma Oficial Mexicana no se aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes pluviales independientes. Además, establece que la concentración de contaminantes básicos, metales pesados y cianuros para las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales, no debe exceder el valor indicado como límite máximo en esta norma. Los metales pesados que, en concentraciones elevadas producen efectos negativos en la salud humana, flora o fauna, considerados en esta Norma Oficial Mexicana son: cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc, además de arsénico y cianuros (SEMARNAT, 1996a).

NOM-002-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en los sistemas de alcantarillado urbano

o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Esta norma no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado (SEMARNAT, 1996b).

NOM-003-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales tratadas que se reusen en servicio público, con el objeto de proteger el ambiente y la salud de la población, y es de observancia obligatoria para las entidades públicas responsables de su tratamiento y reuso (SEMARNAT, 1996c).

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCION

Se conoce como intercambio iónico al cambio de iones entre un sólido (material de intercambio iónico o resina) y un líquido en el que no hay un cambio permanente en la estructura del sólido. El intercambio iónico se usa en el tratamiento de aguas y también sirve como método de separación para muchos procesos en los que intervienen otros líquidos. Su principal campo de aplicación es el ablandamiento del agua empleada en los hogares, y la producción de agua blanda y desmineralizada en la industria: como por ejemplo en las centrales térmicas, refinerías, en la industria química, así como también en aplicaciones especiales como la síntesis química, investigación médica, procesos de la industria alimentaria, minería, agricultura y en una gran variedad de otras aplicaciones. La utilidad del intercambio iónico reside en la capacidad de usar y reutilizar el material, en el mayor de los casos resinas, de intercambio iónico mediante su regeneración.

Cuando la resina se encuentra agotada, se puede traer de regreso a su estado inicial y comenzar el intercambio de nuevo. La regeneración de las resinas es un proceso inverso al intercambio iónico como se muestra las ecuaciones. En el caso de las resinas de intercambio catiónico, ácidos fuertes como el ácido clorhídrico (HCl) o el ácido sulfúrico (H₂SO₄) son completamente disociados y pueden suministrar iones H⁺ para remplazar los cationes que han sido intercambiados en la superficie de la resina catiónica al final del intercambio.

De manera similar, una base fuerte, como la sosa caustica (NaOH), puede suministrar iones OH^- para reemplazar los aniones en la superficie del intercambiador al final del intercambio:

Como se puede ver en las reacciones de regeneración, el proceso produce residuos salinos (Rohm and Haas, 2008).

Dependiendo del uso de la resina, la regeneración se puede hacer de varias maneras diferentes, cada uno con sus propias ventajas y desventajas dependiendo de tanto de factores químicos y como económicos (Alchin, 2008).

A continuación se presenta la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo. Se describen los materiales y métodos experimentales utilizados a fin de encontrar la estrategia óptima de regeneración de resinas de intercambio iónico para la incorporación de este proceso en un tren de tratamiento.

3.2 ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE LAS MUESTRAS DE AGUA

En este apartado se describen los métodos para la caracterización fisicoquímica de las muestras de agua. Entre estos se encuentran el método de muestreo, medición de pH, conductividad eléctrica, temperatura, dureza, alcalinidad y acidez,

3.2.1 MUESTREO

El objetivo del muestreo fue coleccionar un volumen de muestra, de 20 litros, volumen suficientemente grande para las pruebas realizadas en el presente trabajo. Se optó por

utilizar agua de grifo debido a que la finalidad de los tratamientos primario y secundario instalados en la planta piloto es obtener agua con una baja concentración de materia orgánica y con contenido de iones metálicos similar a la que se encuentra en el agua potable. Por otra parte, el requerimiento de representatividad de las muestras de agua se logró al recolectar un volumen de 1 litro de agua de grifo (UASLP) cada 6 horas durante una semana. Al final de este periodo, las muestras se mezclaron para obtener una muestra compuesta. Las muestras se colectaron siguiendo la norma mexicana NMX-AA-003-1980.

3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

La caracterización del agua se realizó previa a la realización de las pruebas descritas en este trabajo, a fin de establecer parámetros de referencia útiles para la evaluación posterior de los resultados. En particular, por su simplicidad y el alcance de este trabajo, la medición de la conductividad fue seleccionada como característica a seguir durante todas las pruebas realizadas.

3.2.2.1 pH

La determinación del pH se realizó de manera electrométrica con un electrodo de vidrio comercial con la finalidad de identificar el valor de pH al cual se desarrollaron los experimentos. El método se basa en la existencia de una diferencia de potencial entre las dos caras de una membrana de vidrio, expuestas a disoluciones acuosas que difieren en su valor de pH. En primera aproximación, a temperatura constante, la magnitud de esta diferencia de potencial es directamente proporcional a la diferencia de pH entre dichas soluciones.

3.2.2.2 CONDUCTIVIDAD

La conductividad eléctrica de una solución puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y depende, además del voltaje aplicado, del tipo, concentración, carga y movilidad de los iones presentes (Sánchez et al., 2004). La determinación de conductividad es de gran importancia en el estudio de la calidad del agua, pues es una determinación indirecta de la concentración de iones disueltos. La tecnología disponible para su medición se basa en la propiedad que adquiere el agua para conducir electricidad cuando tiene iones disueltos. El instrumento utilizado fue un conductímetro HM DIGITAL EC/TDS/TEMP COM-100 calibrado de fábrica y que además fue comparado con un conductímetro de laboratorio, con lo que se pudo comprobar su correcto funcionamiento. Se realizan mediciones de conductividad a cada muestra colectada sacando un valor promedio.

3.2.2.3 DUREZA TOTAL EN AGUAS NATURALES

La dureza puede expresarse como la suma de las concentraciones de los iones de Calcio y Magnesio que es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías, lo que genera fallas y pérdidas de eficiencia en diferentes procesos industriales (Crittenden, 2005).

El método utilizado para la determinación de la dureza se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetra acético (EDTA) con los iones calcio y magnesio. Este consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final, el negro de eriocromo T, que es de color rojo en presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo del EDTA con el

calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, de manera que la competencia por los iones se desplaza hacia la formación de los complejos con EDTA desapareciendo el color rojo de la disolución y tornándose azul.

3.2.2.4 ALCALINIDAD EN AGUAS NATURALES

La alcalinidad se define como la capacidad de una solución para neutralizar ácidos o aceptar protones. La fuente principal de alcalinidad en el agua son los carbonatos. Otros compuestos que contribuyen a la alcalinidad son los boratos, silicatos, fosfatos, carboxilatos y otros ácidos débiles. Para fines prácticos, la alcalinidad puede definirse en términos de las concentraciones de HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , H^+ :

$$\left[\quad \right] \quad \left[\quad \right] \quad \left[\quad \right]$$

El método utilizado se basa en la medición de la alcalinidad en el agua por medio de una valoración de la muestra empleando como solución valorante un álcali, NaOH, de concentración perfectamente conocida (ver anexo 1).

3.2.2.5 ACIDEZ EN AGUAS NATURALES

La acidez se refiere a la presencia de sustancias disociables en agua y que como producto de disociación generan el ión hidronio (H_3O^+), como son los ácidos fuertes, ácidos débiles y de fuerza media; también la presencia de ciertos cationes metálicos como el Fe (III) y el Al (III) contribuyen indirectamente a la acidez del medio, ya que estos consumen el hidroxilo (OH^-) del agua para formar hidróxidos insolubles. Este método está basado en la medición de la acidez en el agua por medio de una valoración de la muestra, empleando como solución valorante un ácido, en este caso HCl, de concentración perfectamente conocida.

3.3 ANÁLISIS DE RESINAS

Las resinas fueron obtenidas de cartuchos saturados de lecho mixto de un equipo comercial de desionización BARNSTEAD E-pure®, por lo cual fue necesario realizar una preclasificación conforme a su naturaleza iónica (catiónicas y aniónicas). El método empleado para tal clasificación fue la Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR).

3.3.1 ANÁLISIS INFRARROJO (FTIR)

El FTIR es la tecnología que utiliza radiación infrarroja en el análisis cualitativo. Es utilizado para determinar los componentes de los compuestos orgánicos. La mayoría de estos compuestos revela su componente distintivo cuando es expuesto a dicha radiación infrarroja al absorberla a longitudes de onda particulares, estas características son representadas en un gráfico llamado espectrograma.

En este trabajo, para identificar los grupos funcionales de las resinas, éstas fueron expuestas a un haz de luz infrarroja (IR). El proceso dio lugar a distintos cambios energéticos producidos por las transiciones de las moléculas de unos estados energéticos vibracionales y rotacionales en otros. Estos cambios fueron registrados en un gráfico con uno de los programas incorporados en el instrumento espectroscópico utilizado. Finalmente, utilizando el gráfico generado, fue posible identificar bandas de absorción distintivas de determinados compuestos en la resina.

Con lo anterior fue posible hacer una clasificación según los grupos funcionales encontrados en las resinas analizadas. Este tipo de análisis se realizó antes y después del

proceso de regeneración de las resinas con la finalidad de corroborar que la clasificación de las resinas se hiciera correctamente.

Teniendo la clasificación y dependiendo de qué tipo de resina fue identificada, se realizó de manera general la siguiente metodología:

3.3.2 METODOLOGÍA DE REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

El estudio del proceso de regeneración depende del tipo de resina y los iones en su superficie. La eficiencia del proceso de regeneración habitualmente se evalúa en términos de la restauración de la capacidad de intercambio iónico de la resina.

3.3.2.1 PRETRATAMIENTO

La resina contenida en el equipo de laboratorio BARSNTEAD™ E-PURE™ fue separada según su posición física en los cartuchos. Después de la separación se procedió al lavado de la resina con agua desionizada con el objetivo de eliminar partículas contaminantes que interfirieran en la regeneración.

3.3.2.2 TRATAMIENTO DE REGENERACIÓN

La regeneración se realizó utilizando tubos Falcon de 50 ml de capacidad. Utilizando una relación volumétrica resina: regenerante de 25% v/v. Para la regeneración, se utilizaron distintos tipos de regenerante, como HCl o H₂SO₄ y NaOH o NH₄OH según sea el caso (resina catiónica o resina aniónica), a diferentes concentraciones como se indica en la Tabla 3.1. Finalmente la resina regenerada se enjuagó con agua desionizada hasta obtener un pH constante.

Tabla 3.1 Arreglo experimental.

Condiciones de regeneración	Tipo de resina	
	Catiónica	Aniónica
Regenerante	HCl, H ₂ SO ₄	NaOH, NH ₄ OH
Concentración de regenerante	2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%	2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 12.5%
Concentración de resina	25% v/v	25% v/v
Tiempo de reacción	24h	24h
Agitación	70 rpm	70 pm

3.3.3 MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO

La capacidad de intercambio es el parámetro principal que determina la eficiencia del proceso de regeneración de las resinas. Este parámetro se define como la cantidad o porcentaje de los iones que son intercambiados con una cantidad determinada de resina y en un lapso de tiempo conocido (Michaud, 2011). Dado que la concentración de iones en este estudio se determinó mediante la conductividad total, la capacidad de intercambio se definió como la cantidad o porcentaje de conductividad que se reduce en una muestra de agua con una cantidad determinada de resina y en un lapso de tiempo conocido.

Paralelamente, el cálculo de la eficiencia de remoción de la resina se realizó con respecto a los mg SDT/g_{resina} removidos durante todo el proceso de experimentación. El cálculo se realizó con la aproximación de conductividad a mg SDT/L (ppm) con el factor de conversión de 0.64 mg SDT/ μ S/cm (McNeil and Cox, 2000) y finalmente a mg SDT/g_{resina}

dependiendo de la cantidad de muestra añadida. La suma de la remoción de iones en la muestra a lo largo del experimento se determina a partir de las siguientes ecuaciones:

<p>Pruebas en lote</p> $\sum \frac{(\quad)}{\quad}$	<p>Pruebas en columnas</p> $\int \frac{\quad}{\quad}$
--	--

Dónde:

R= remoción de iones (mg SDT/ g_{resina})

C₀= conductividad inicial (μS/cm)

C_f= conductividad final (μS/cm)

f= factor de conversión

(0.64 mgSDT/μs/cm)

V= ml de muestra (0.015 L)

r= cantidad de resina (200 mg)

n= número de ciclo

N= número total de ciclos

R= remoción de iones (g SDT/mL_{lecho})

C₀= conductividad inicial (μS/cm)

C_t= conductividad en el tiempo t (μS/cm)

f= factor de conversión

(0.64 mgSDT/μs/cm)

V_{H2O}= Volumen de agua que pasa por la columna en un tiempo Δt (mL)

V_{columna}= Volumen del lecho (mL)

t= tiempo (min)

T= tiempo total del experimento

Q= Flujo de agua (mL/min)

Δt= tiempo entre dos mediciones de conductividad (min)

En todos los experimentos realizados en lote se utilizó una relación constante de volumen de resina y volumen de muestra del 25%. Posteriormente, se midió la conductividad de la solución a intervalos de tiempo regulares. A partir de dichas determinaciones se construyeron gráficos de velocidad de intercambio de las distintas resinas a diferentes concentraciones de regenerante.

Cabe mencionar que cada experimento de determinación de la capacidad de intercambio, curvas de ruptura y pruebas en columnas, de cada una de las resinas se realizó por triplicado; sin embargo, el resultado presentado es solo el promedio de las determinaciones.

3.3.4 CURVAS DE RUPTURA

De manera similar se realizaron una serie de curvas de ruptura. Estas curvas se realizaron para representar la concentración de iones en la salida de la columna de Intercambio Iónico. En estos ensayos la muestra de agua fue remplazada después de alcanzar el equilibrio en el sistema.

3.3.5 Pruebas en columnas

Las pruebas en columnas se realizaron en contenedores cilíndricos de 10 ml en el cual fueron colocadas las resinas de acuerdo a su ubicación en el equipo comercial BARNSTEAD™ E-PURE™, como se muestra en la Figura 3.1, alcanzando un volumen de 5 ml. Cada capa de resina se mantuvo separada del resto con ayuda de un filtro poroso.

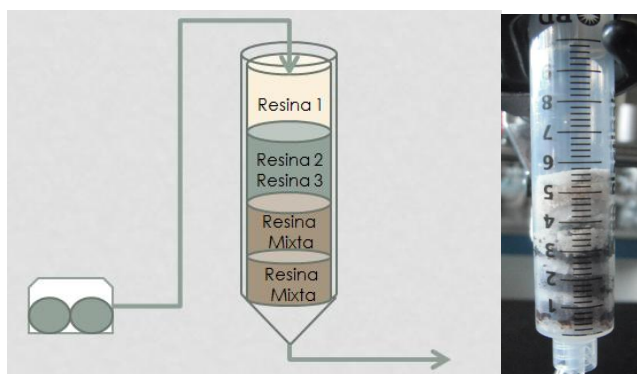


Figura 3.1 Representación de pruebas en columnas con las resinas identificadas en el equipo. Resina 1, Aniónica; Resina 2, Aniónica; Resina 3, catiónica; Resina mixta, aniónica/catiónica.

Las resinas utilizadas en estos ensayos fueron seleccionadas de acuerdo a sus capacidades de intercambio, como se explica en la sección de resultados, dependiendo del regenerante y concentraciones utilizadas.

Se seleccionaron tres diferentes flujos para evaluar el desempeño de las resinas a diferentes tiempos de residencia. Los tres flujos fueron los siguientes: 1, 1.7 y 5 mL/min, que corresponden a tiempos de residencia de 5, 3 y 1 min, respectivamente.

1.- Para el cálculo del tiempo de residencia se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

Numero de columnas en el equipo comercial: $n=4$

Diámetro de la columna $D=7\text{cm}$

Radio en la columna $= r=3.5\text{cm}$

*Volumen en la columna $= V=(\pi) * (r^2) * h = 3.1416 * 3.5^2 * 41 = 1577\text{cm}^3 = 1.57\text{L}$*

*Volumen Total del quipo $= V_T = V * n = 6.31\text{L}$*

Finalmente el tiempo de residencia se determinó de la siguiente manera:

Tiempo de residencia (mínimo) $= V/Q_{max} = 6.31\text{L}/2\text{L}/\text{min} = 3.15\text{min} = 3\text{min}$
(aprox.)

2.- Para el cálculo del flujo:

3.- El resto de los tiempos de residencia se calcularon de manera similar partiendo de flujos de 1 y 5 mL/min.

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POTABLE

El agua utilizada en el presente estudio, fue obtenida de una toma de agua potable localizada en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se caracterizó por poseer un valor de pH en el rango de valores permitidos por la secretaría de salud, ligeramente ácido. Por otra parte, el agua es de baja dureza y alcalinidad media. Finalmente, la conductividad registrada fue de 354.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que es más de 40% mayor al valor sugerido por la organización mundial de la salud, esto sería posible dadas las altas concentraciones de iones en los acuíferos de la región (OMS, 1995). Las principales características fisicoquímicas del agua implementada en los experimentos se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características fisicoquímicas del agua analizada.

Características	Promedio	Valor de Referencia
pH	7,52	6-8,5 (NOM-127-SSA1-1994)
Temperatura	26,17°C	-
Conductividad	354,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$	250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (OMS 1995)
Dureza	56,69 mg CaCO_3/L	500 mg CaCO_3/L (NOM-127-SSA1-1994)
Acidez	0,72 mg CaCO_3/L	-
Alcalinidad	132,84 mg CaCO_3/L	Media 75-150 mg CaCO_3/L

Los resultados obtenidos de la caracterización de las muestras de agua, muestran que en comparación con distintos valores de referencia es posible asegurar que el agua analizada cumple con los estándares normativos y sugeridos en la Tabla 3.2 para asegurar una buena

calidad del agua, a excepción de la conductividad. Este parámetro está directamente relacionado con la presencia de sólidos disueltos, por esta razón es recomendable la utilización de un tratamiento de agua avanzado para su utilización en laboratorio y/o industrial.

3.4.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO

El equipo comercial, descrito anteriormente, se compone de cuatro columnas (cartuchos) de intercambio iónico independientes que se conectan en serie. Estas columnas se empaquetan con resinas de intercambio aniónicas, catiónicas y de lecho mixto. No obstante, la identidad de dichas resinas no es de fácil acceso, pues es considerada información confidencial, y por ello es igualmente complicado llevar a cabo cualquier proceso de regeneración.

Con la finalidad de superar dicha barrera, se separaron y analizaron las diferentes resinas identificadas visualmente en las 4 columnas de intercambio iónico. De esta manera, pudieron separarse 5 resinas diferentes, mismas que fueron analizadas mediante espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) (Figura 3.2) antes y después del proceso de regeneración. Los espectrogramas obtenidos mostraron que la resina en la columna 1 correspondió a una resina catiónica con grupos funcionales carboxílicos (Figura 3.2-1 y 1'). Sin embargo, a la postre se observó que el comportamiento de esta resina no correspondía con una resina catiónica. En cambio, cuando esta resina se sometió a un tratamiento de regeneración aniónico, los resultados confirmaron que la resina es de naturaleza aniónica (Ver sección 3.3.4.1).

Las resinas en la columna 2 correspondieron, la primera, a una resina aniónica con grupos de amina secundaria en su estructura (Figura 3.2-2 y 2') y la segunda resina en la columna

fue identificada como catiónica debido a la presencia de grupos sulfónicos (Figura 3.2-3 y 3'). Por último, la resina contenida en la tercera y cuarta columna, se identificó como una resina mixta que se conforma de dos resinas distintas, una de ellas catiónica y la otra aniónica, con grupos amino cuaternario y sulfónico, respectivamente (Figura 3.2-4A, B y A', B').

La interpretación de los espectrogramas obedece a los siguientes puntos:

- El espectro infrarrojo de los ácidos carboxílicos se constituye por dos grupos, un grupo carbonilo (C=O) y un hidroxilo (OH), de modo que el espectro infrarrojo de los ácidos carboxílicos refleja ambas unidades estructurales. Para ácidos unidos por puentes de hidrógeno (dímeros), los alargamientos O-H dan una banda ancha, intensa, en el intervalo de 2500-3000 cm^{-1} (Figura 3.2-1)..
- Los grupos funcionales amino secundario de la resina 2 presentan tensión en el enlace N-H en la banda 3200 cm^{-1} y estiramiento en el enlace C-N al 1078 cm^{-1} .
- Los grupos funcionales del amonio cuaternario de la resina 4A y 4A' se identificaron mediante la banda sobrepuesta a 1650 cm^{-1} de estiramiento del enlace carbonilo (C=O), la banda a 1190 cm^{-1} de estiramiento del enlace C-N de la amina alifática, y la banda a 670 cm^{-1} de flexión fuera del plano del enlace N-H (Zaragodni et al. 2001).
- La existencia del grupo sulfónico de las resinas 3, 4B y 4B' se pudo detectar mediante las bandas atribuibles a los compuestos de azufre: la banda a 1413 cm^{-1} muestra los metilenos activos ($-\text{CH}_2-\text{SO}_2$); las bandas a 1129 cm^{-1} , 1042 cm^{-1} de estiramiento del sulfito del enlace S=O y la banda a 1013 cm^{-1} de estiramiento del SO_2 (Pouchert 1981).

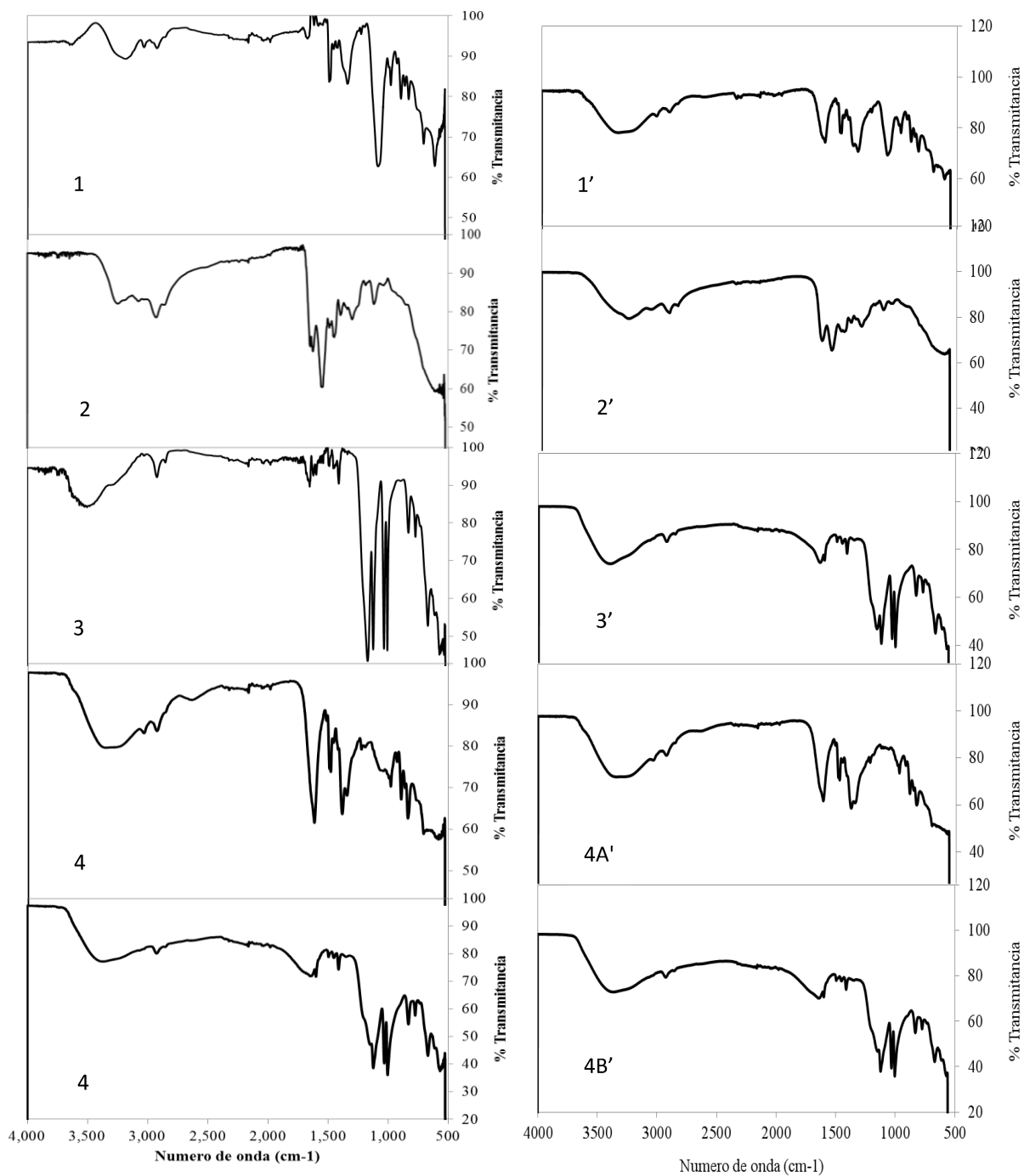


Figura 3.2 Espectrogramas FTIR de las resinas. 1, resina catiónica; 2, resina aniónica; 3, resina catiónica; 4A, resina aniónica; y 4B, resina catiónica. El apostrofo señala a las resinas al final del proceso de regeneración.

3.4.3 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE REGENERANTE EN LA VELOCIDAD DE INTERCAMBIO Y EL TIEMPO DE RUPTURA

3.4.3.1 Resina 1 (Resina Aniónica)

La clasificación de la resina 1, en base al espectrograma de FTIR, indica que se trata de una resina catiónica carboxílica, como se muestra en la Figura 3.2-1 y 1'. No obstante, mediante ensayos complementarios, que consistieron en probar regenerantes ácidos y básicos, se determinó que la resina tiene características más bien aniónicas. Por lo cual, se decidió utilizar NaOH como regenerante.

La resina 1 se regeneró con múltiples concentraciones de hidróxido de sodio. Como se muestra en la Figura 3.3, el intercambio iónico se vio favorecido conforme se incrementó la concentración de dicho regenerante. Cuando las resinas fueron puestas en contacto con la solución, los iones de la solución comenzaron a intercambiarse con los iones hidroxilos de la resina, de modo que la concentración de iones en solución, al igual que la conductividad, disminuyó gradualmente.

Los porcentajes de disminución de conductividad alcanzados al cabo de 360 minutos (duración del primer ciclo de intercambio iónico) fueron de 7.61, 9.58, 12.39, 16.62 y 23.94% para las concentraciones de 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5% (v/v), respectivamente. Los resultados muestran que la concentración de regenerante utilizada está relacionada con la capacidad de regeneración, lo cual es concordante con la literatura (Herrera-Calderón y Palomino-Downham, 2012).

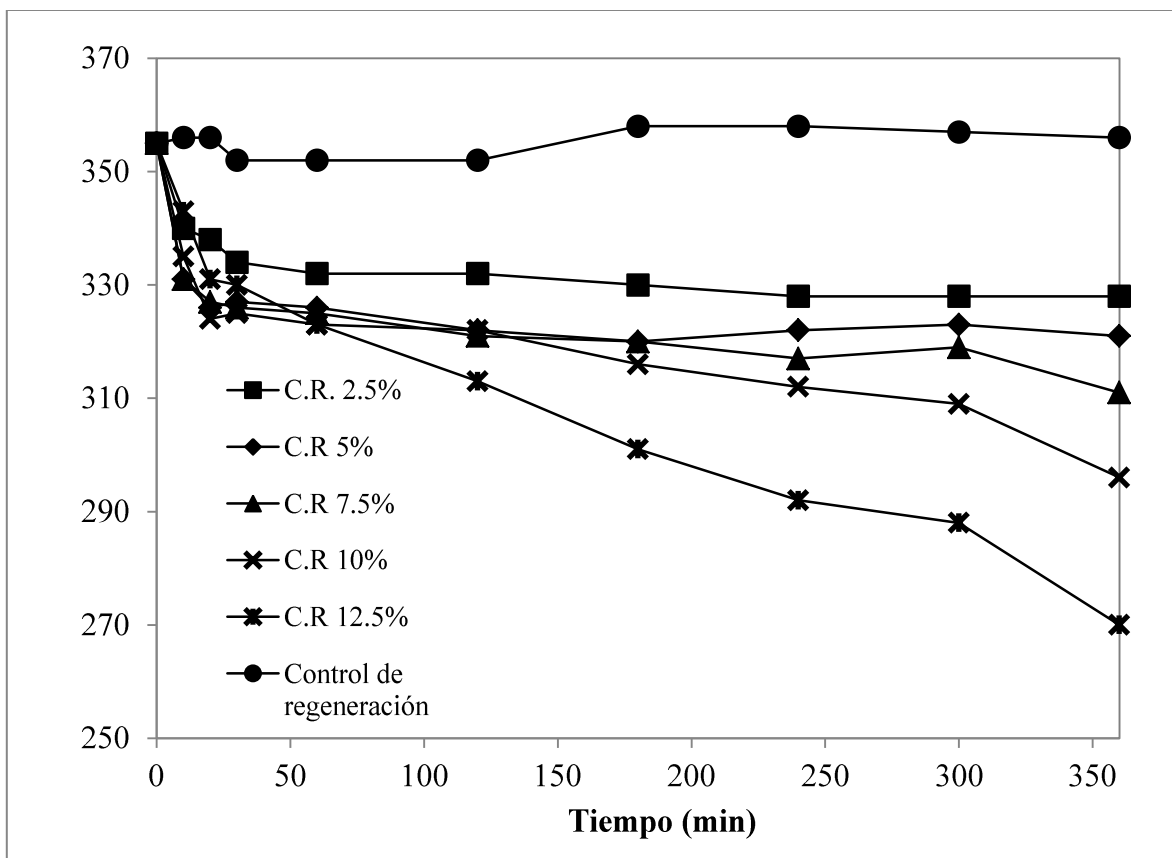


Figura 3.3 Velocidad de intercambio y regeneración de la resina 1 con regenerante con NaOH a distintas concentraciones.

Por otro lado, las curvas de ruptura permitieron observar el desempeño de las resinas regeneradas y determinar el volumen de agua necesario para agotar su capacidad de intercambio. En concordancia con los datos obtenidos del experimento anterior, se requirió un menor tiempo de operación, es decir, un menor volumen de agua, para agotar las resinas regeneradas con concentraciones relativamente bajas de NaOH. En cambio, el tiempo máximo de ruptura fue de aproximadamente 48 h ($>55 \text{ ml/g}_{\text{resina}}$) en las resinas regeneradas con concentraciones de 10 y 12.5 % (v/v) de NaOH.

En términos de capacidad de intercambio iónico (haciendo uso de factores generales de conversión para una solución de iones mixtos, $0.64 \text{ mg SDT}/\mu\text{S}/\text{cm}$, la resina regenerada con 12.5% de NaOH mostró la máxima capacidad total de intercambio ($10.6 \text{ mgSDT}/\text{g}_{\text{resina}}$ o $0.12 \text{ eq}/\text{L}_{\text{resina}}$) equivalente a la regeneración del 12% de la capacidad original de intercambio de las resinas comerciales (DOWEX Marathon A, The Dow Chemical Company). Las curvas de ruptura correspondientes se muestran en la Figura 3.4.

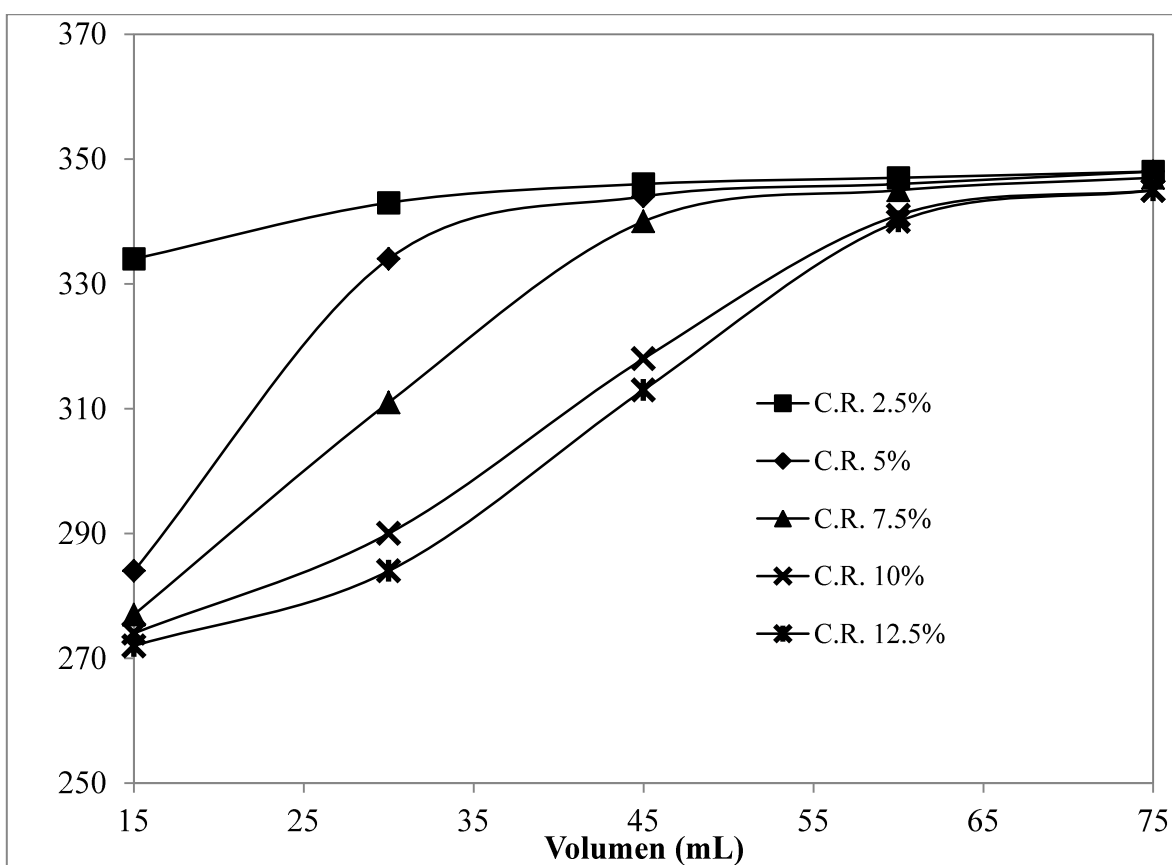


Figura 3.4 Curvas de ruptura de la resina regenerada con NaOH a distintas concentraciones.

3.4.3.2 Resina 2 (Resina Aniónica)

De acuerdo al espectrograma de la resina 2 (Figura 3.4-2 y 2'), los grupos funcionales superficiales del material fueron de naturaleza aniónica. Por lo cual, se utilizó NaOH como regenerante. Los resultados, mostrados en la Figura 3.5, indicaron que la concentración de NaOH no tuvo un efecto notable en la eficiencia de regeneración de la resina.

La disminución en la conductividad de las muestras de agua fue de aproximadamente 5% después de 120 minutos, que es un porcentaje apreciablemente menor en comparación con los resultados obtenidos con la resina 1.

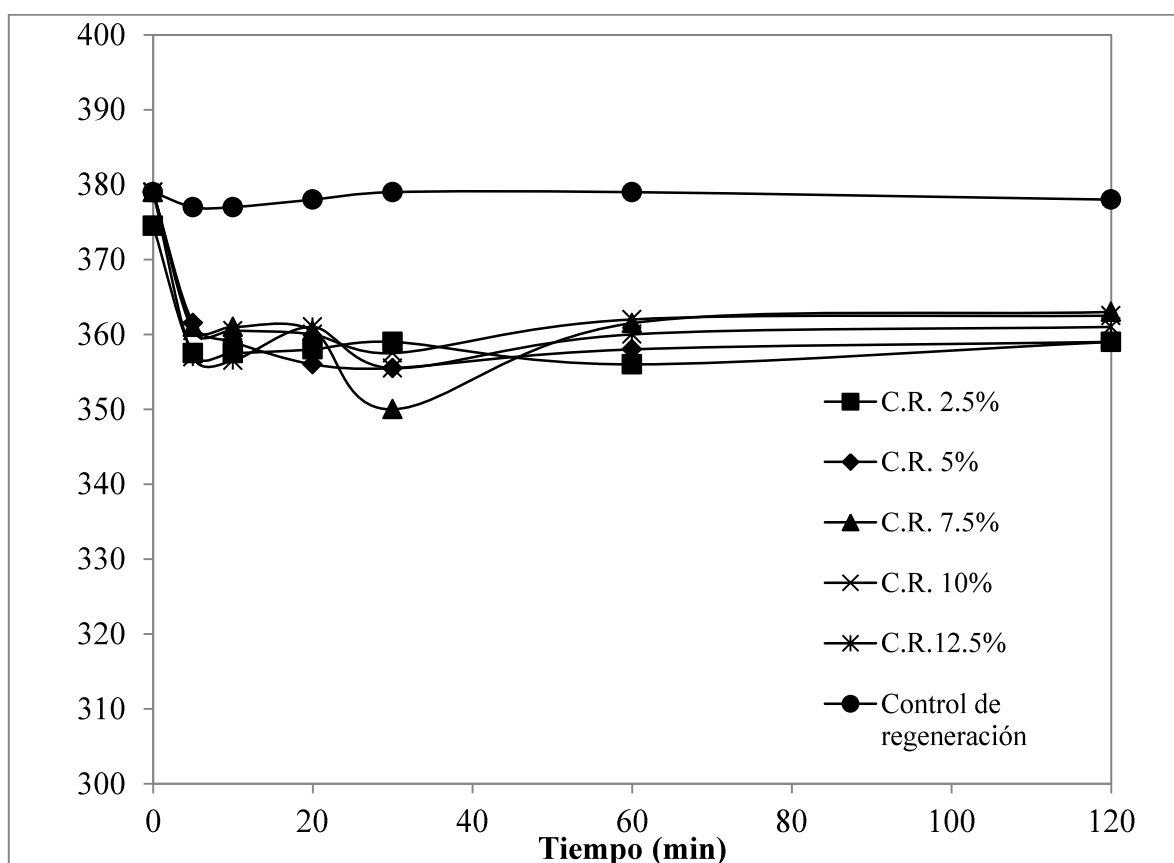


Figura 3.5 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 2.

Regenerante: NaOH

Por otro lado, las curvas de ruptura (Figura 3.6) muestran que la concentración de regenerante utilizado tuvo un mínimo efecto sobre la regeneración de las resinas, siendo la capacidad total de remoción promedio de 34.5 ± 4.2 mg SDT/g_{resina}, equivalente a 0.39 eq/L_{resina}.

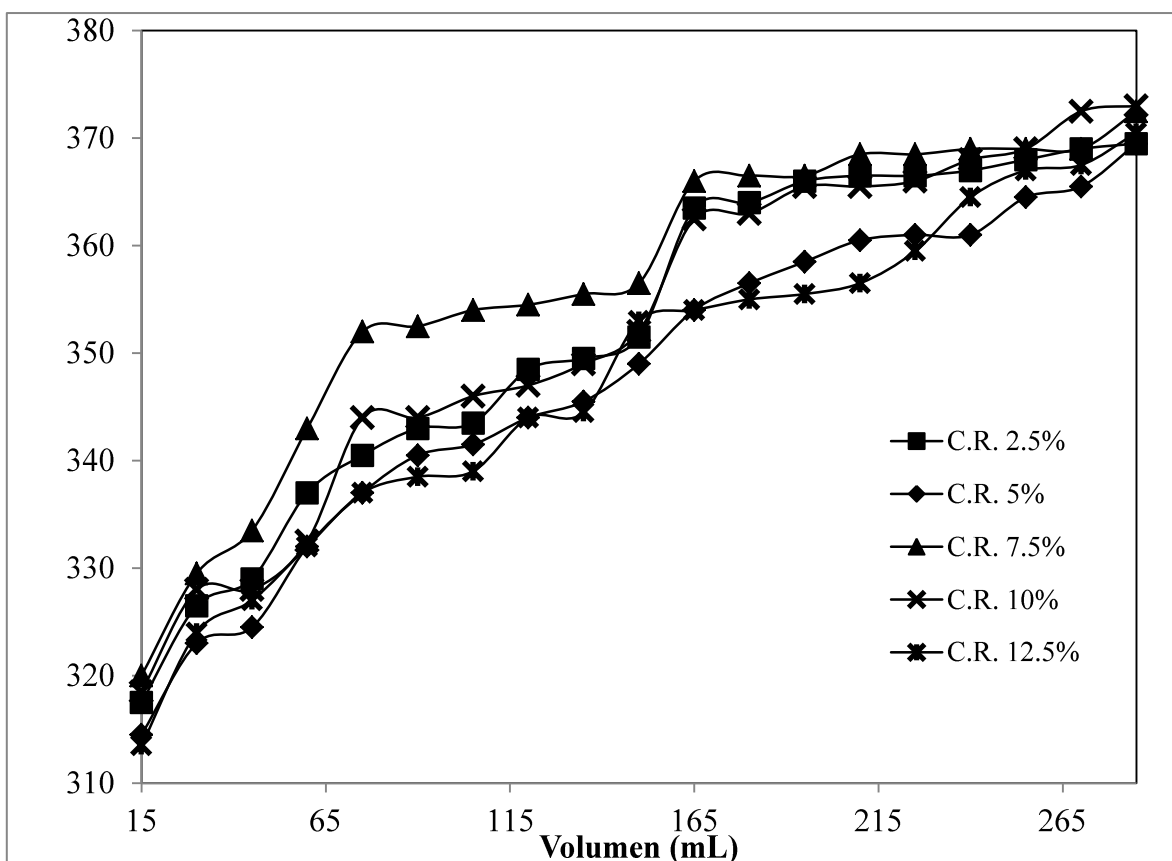


Figura 3.6. Gráfico de la curva de ruptura de la resina 2 regenerada con NaOH.

Alternativamente, para esta resina se utilizó como regenerante hidróxido de amonio bajo el mismo esquema de concentraciones. Las curvas de ruptura correspondientes (Figura 3.8), mostraron una diferencia apreciable en la capacidad total de intercambio calculada en 38.1 ± 0.8 mg SDT/g_{resina} (0.44 eq/L), valor 10% mayor al determinado con las resinas regeneradas con NaOH.

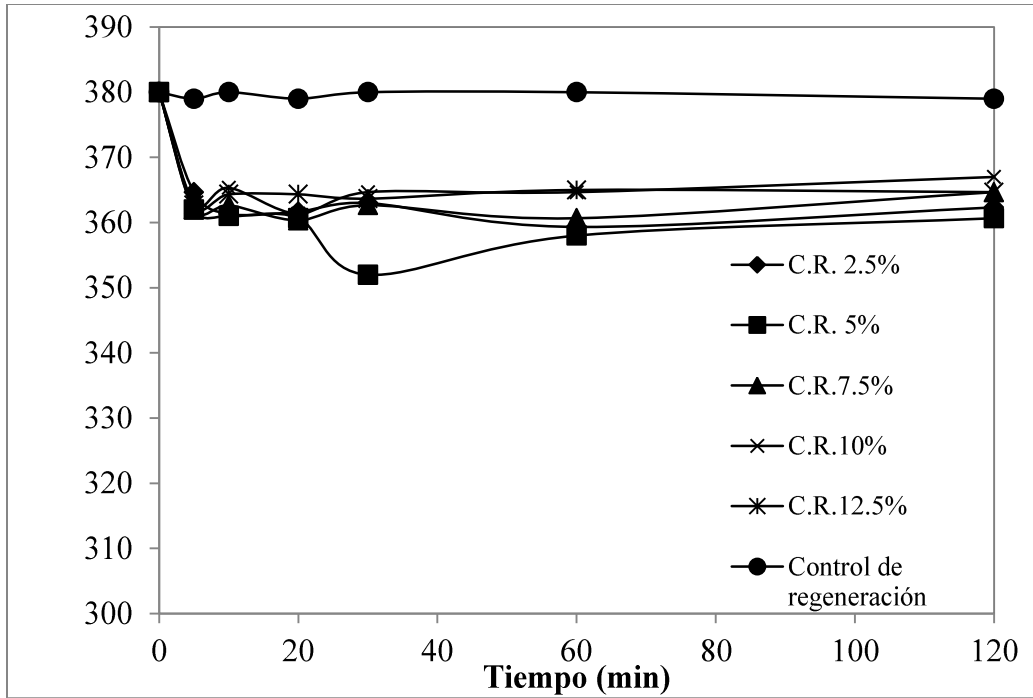


Figura 3.7 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 2.

Regenerante: NH_4OH

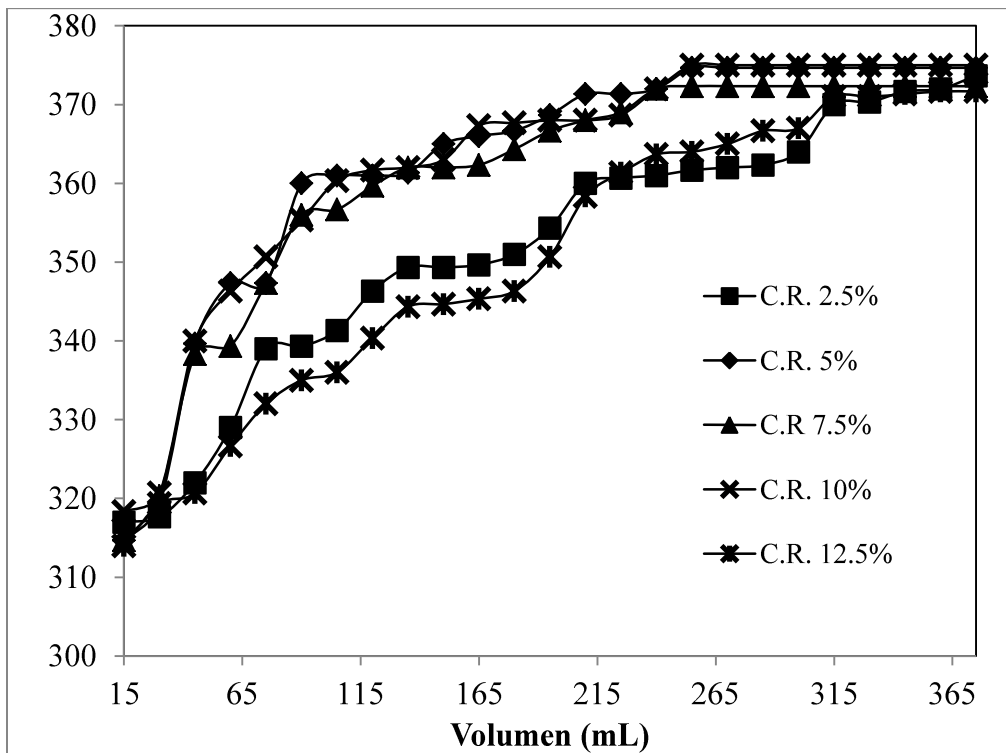


Figura 3.8 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 2 regenerada con NH_4OH .

3.4.3.3 Resina 3 (Resina Catiónica)

En concordancia con los espectrogramas FTIR (Figura 3.2-3 y 3') que indican la naturaleza catiónica del material, se probaron dos tipos de regenerantes para llevar a cabo la regeneración de la resina: H_2SO_4 y HCl . En el caso del ácido sulfúrico, los resultados mostraron una relación inversa entre la concentración del ácido utilizado y la eficiencia de la regeneración (Figura 3.9). Las resinas regeneradas con 2.5 y 5% de ácido sulfúrico mostraron una disminución de la conductividad de la muestra de agua de 16.6 y 4.5%, respectivamente. En contraste, con concentraciones de regenerante de 7.5, 10 y 12.5% no se logró el objetivo de regenerar las resinas.

En la misma figura, es posible observar una disminución pronunciada de la conductividad durante los primeros 5 minutos de adicionar la resina regenerada a las muestras de agua. A dicha disminución, sigue un incremento igualmente pronunciado en la conductividad de la muestra bajo estudio. Una posible explicación de este fenómeno es que, durante los primeros minutos, la resina comienza a intercambiar protones de sus grupos funcionales superficiales por cationes en la solución muestra. Esto causa que en la solución incremente la concentración de iones H^+ , lo cual causa la disminución de HCO_3^- en solución:

La pérdida de carbonatos como CO_2 a la fase gas es una posible explicación de la disminución de la conductividad durante los primeros minutos del experimento. Eventualmente, se llega a un agotamiento del y es posible que la resina aun con capacidad de intercambio siga liberando iones H^+ , incrementándose paulatinamente la conductividad de la solución.

No obstante este proceso solo ocurre durante los primeros minutos. En las curvas de ruptura, es evidente que el proceso funciona adecuadamente y entonces el fenómeno ocurrido durante los primeros minutos es de una importancia relativamente baja desde el punto de vista operacional.

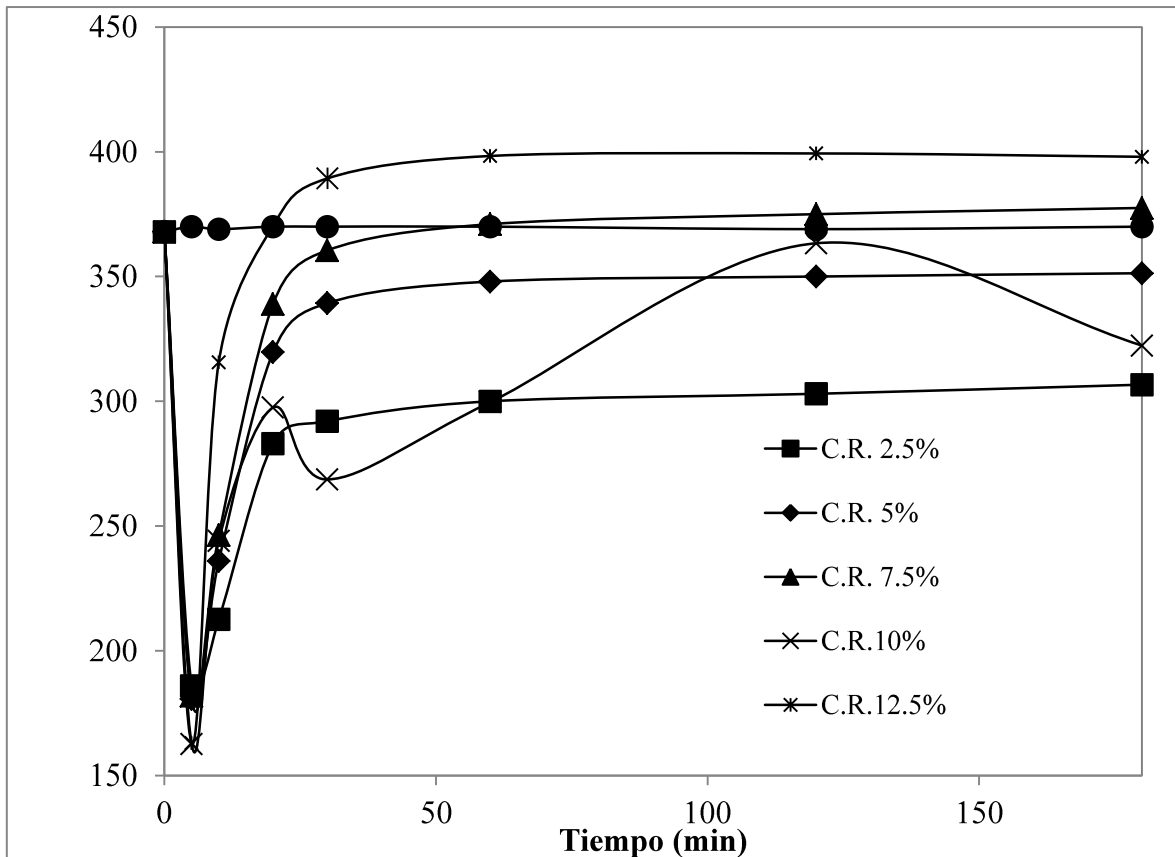


Figura 3.9 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 3.

Regenerante: H_2SO_4

En las curvas de ruptura fue posible apreciar que, independientemente del incremento inicial en la conductividad de la muestra en las pruebas de velocidad de intercambio y regeneración, todas las resinas mostraron capacidades de intercambio muy similares, en

promedio de 28.7 ± 0.9 mg SDT/g_{resina} (0.33 ± 0.01 eq/Lresina) (Figura 3.10).

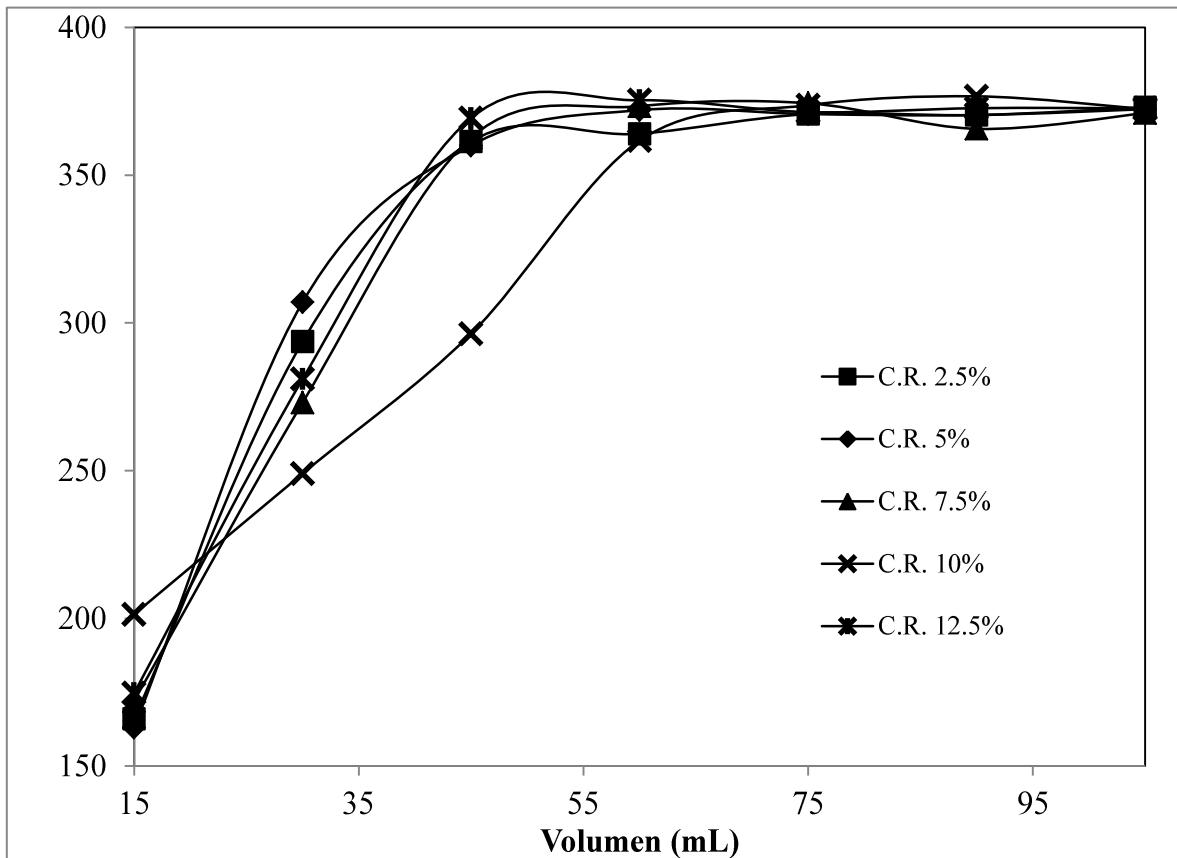


Figura 3.10 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 3 regenerada con H_2SO_4 .

Adicionalmente, se utilizó HCl como regenerante. En este caso, la respuesta de la resina se diferenció de la resina tratada con H_2SO_4 en que ninguna de las concentraciones probadas causó algún incremento considerable en la conductividad de las muestras de agua a lo largo del experimento. Es relevante señalar que durante los primeros minutos de intercambio iónico ocurre un fenómeno similar al ocurrido con la resina regenerada con H_2SO_4 (Figura 3.11).

Y por otro lado, como puede observarse en la figura 3.12, existe una relación entre la capacidad de remoción en curvas de ruptura y las concentraciones de regenerante

utilizadas. Con una concentración de 2.5% de HCl, la columna de intercambio iónico mostró una capacidad total de intercambio de 20.16 mgSDT/g_{resina}, equivalente a 0.23 eq/L_{resina}. Contrastantemente, la resina regenerada con 12.5% de HCl, mostró una capacidad total de intercambio iónico de 27.18 mgSDT/g_{resina}, equivalente a 0.31 eq/L_{resina}.

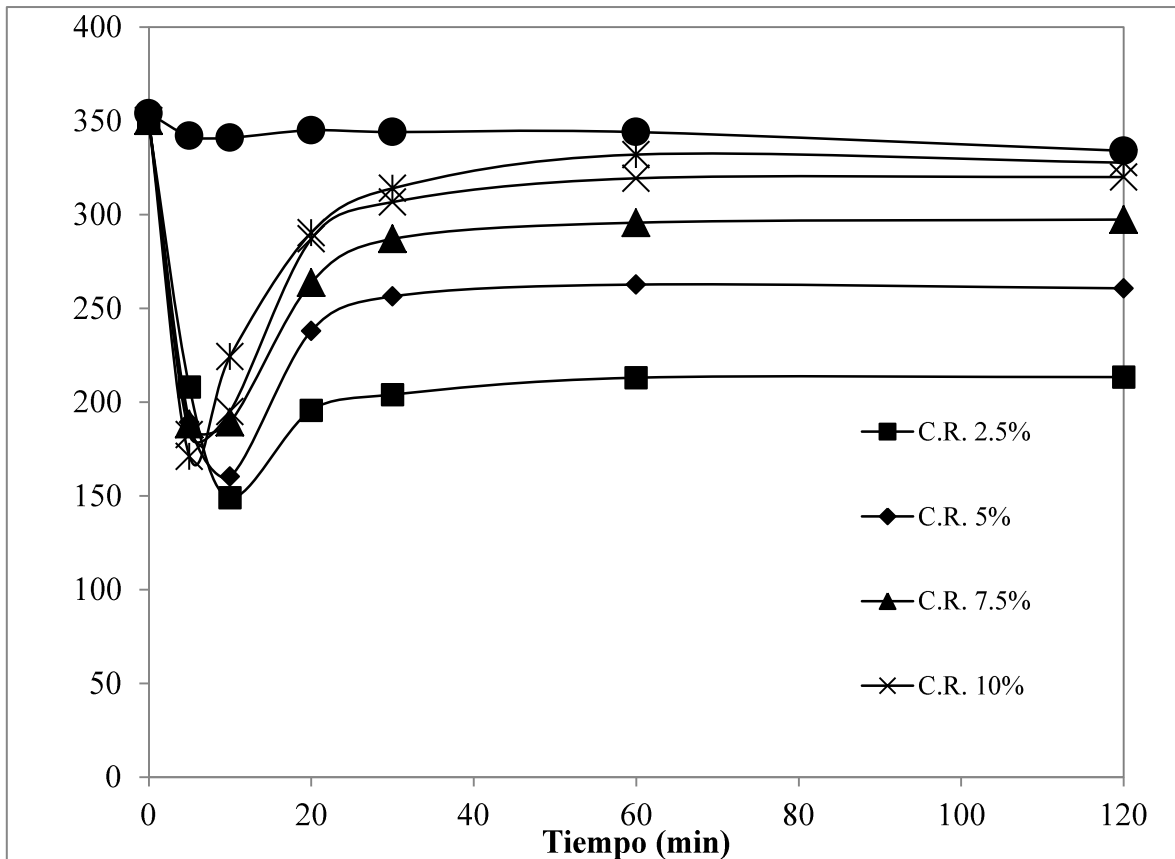


Figura 3.11 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 3.

Regenerante: HCl

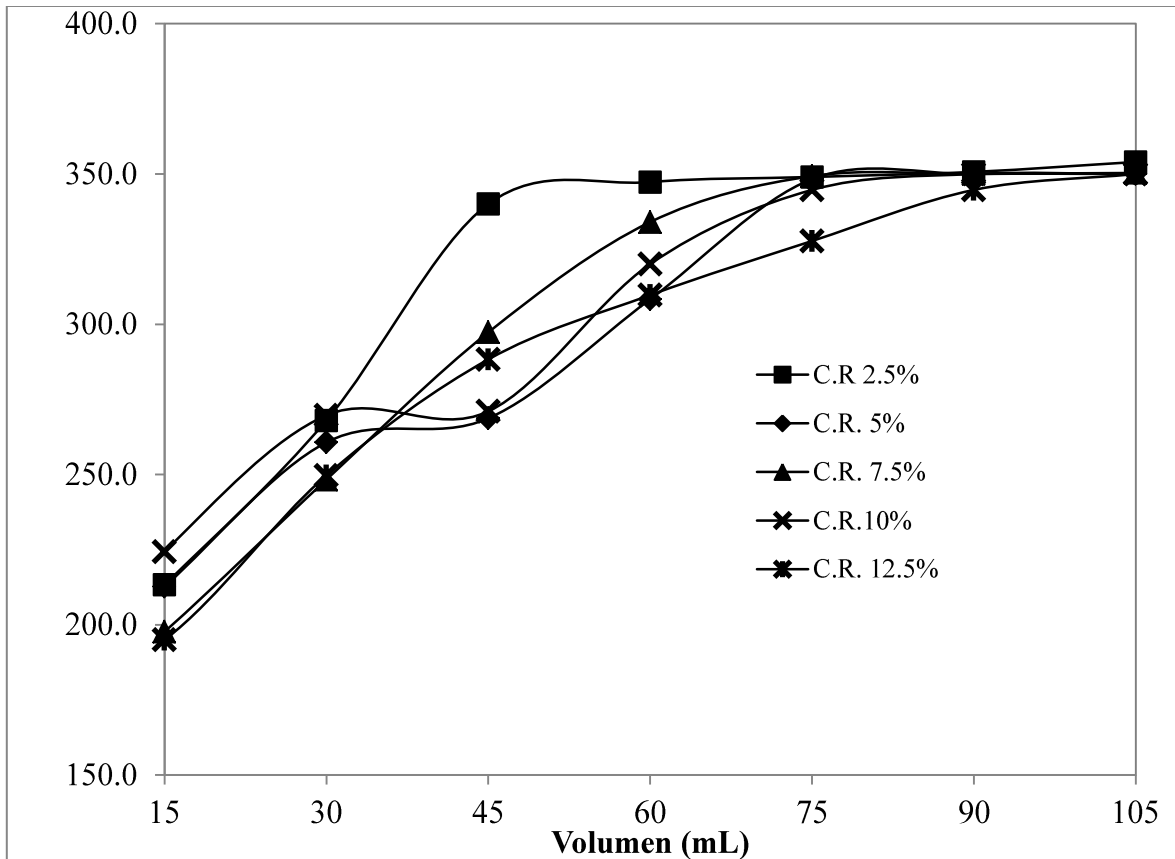


Figura 3.12 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 3 regenerada con HCl.

3.4.3.4 Resina 4 (Resina Mixta)

La resina empacada en la columna 3 y 4 del equipo de intercambio iónico se compone de dos resinas de naturaleza opuesta: una resina catiónica (sulfónica) y otra aniónica (amino cuaternario) empacadas en lecho mixto.

En primera instancia, la capacidad de intercambio de este lecho fue evaluada sin ningún tipo de tratamiento de regeneración. Los resultados indicaron que el lecho mixto no había agotado por completo su capacidad de intercambio iónico, al mostrar una capacidad de 39.8 mgSDT/g_{resina} (Figura 3.13). En particular, la resina 4A (resina aniónica) tuvo una capacidad residual de intercambio de 6.2 ± 0.3 mgSDT/g_{resina}, y la resina 4B (resina catiónica) mostró una capacidad de intercambio de 31 ± 1.3 mgSDT/g_{resina} (Figura 3.14).

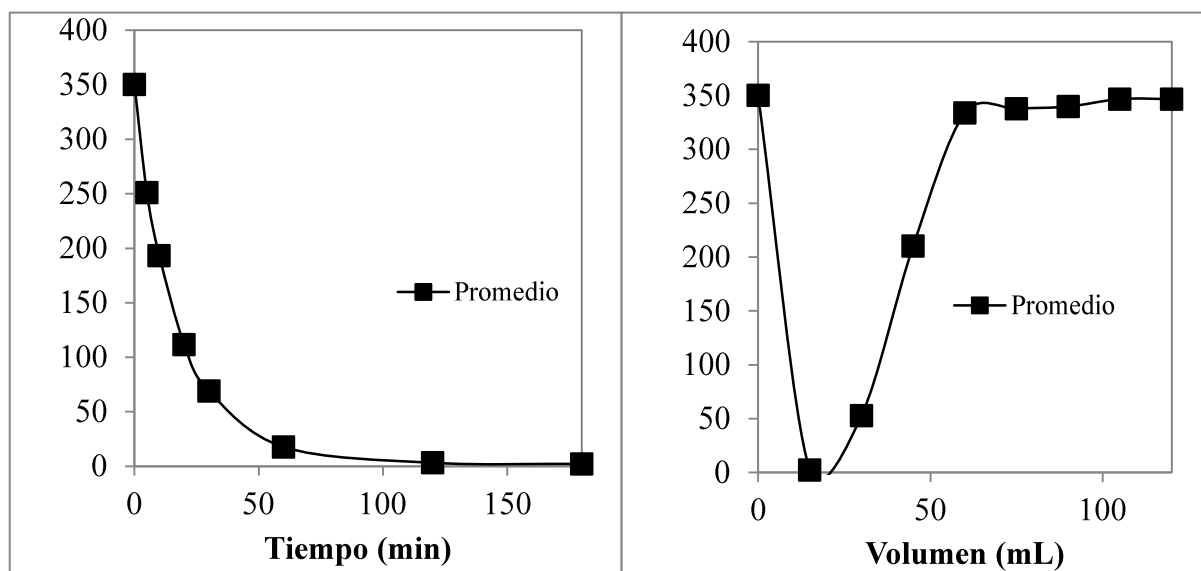


Figura 3.13 1) Gráfico de la velocidad de intercambio y 2) curva de ruptura de la resina mixta 4 sin regenerar.

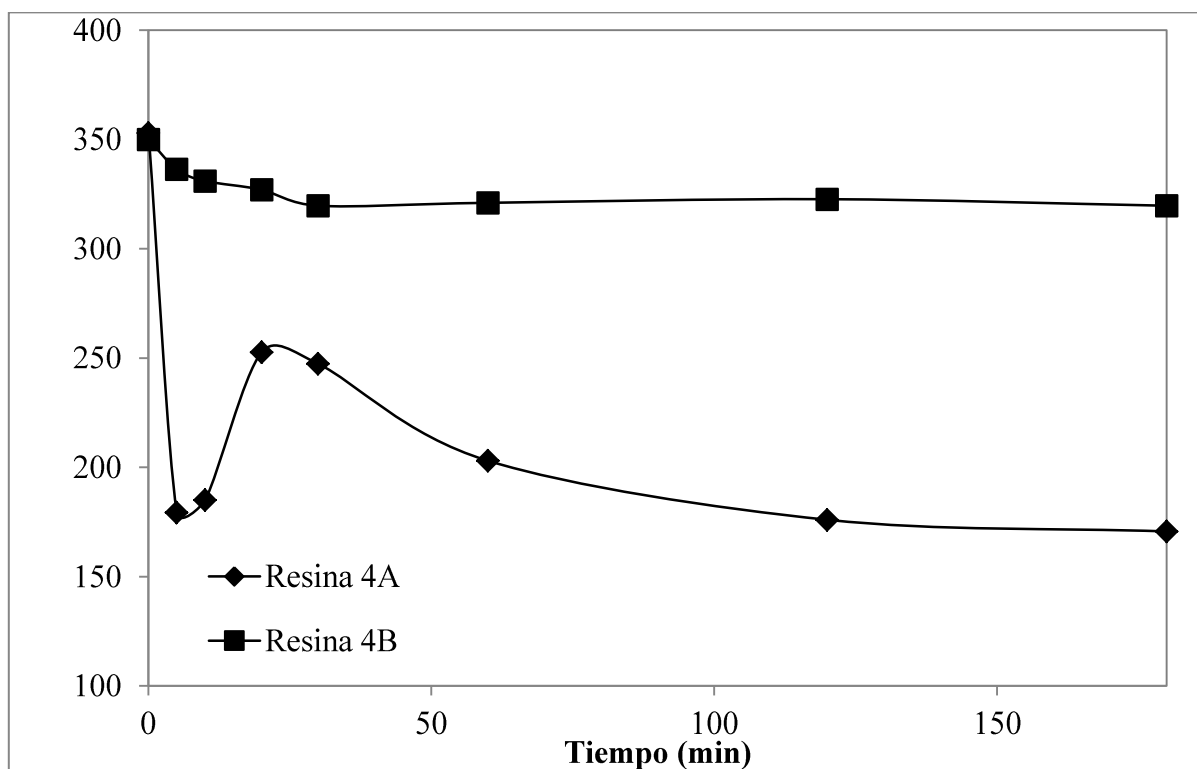


Figura 3.14. Gráfico de la velocidad de intercambio de la resina 4A y 4B sin regenerar.

En una segunda instancia, la resina aniónica (4A) fue tratada con NaOH con el fin de recuperar su capacidad de intercambio.

De acuerdo a las curvas de ruptura de las resinas tratadas con NaOH (Figura 3.16), fue posible observar que las resinas tratadas mostraron capacidades de intercambio relacionadas en forma inversa con la concentración de NaOH utilizada. En un extremo, la resina regenerada con 2.5% de NaOH mostró una capacidad total de 33.7 mgSDT/g_{resina} (0.38 eq/L_{resina}). Y en el otro extremo, la resina regeneradas con 12.5% de NaOH mostró una capacidad total de 23.1 mgSDT/g_{resina} (0.26 eq/L_{resina}).

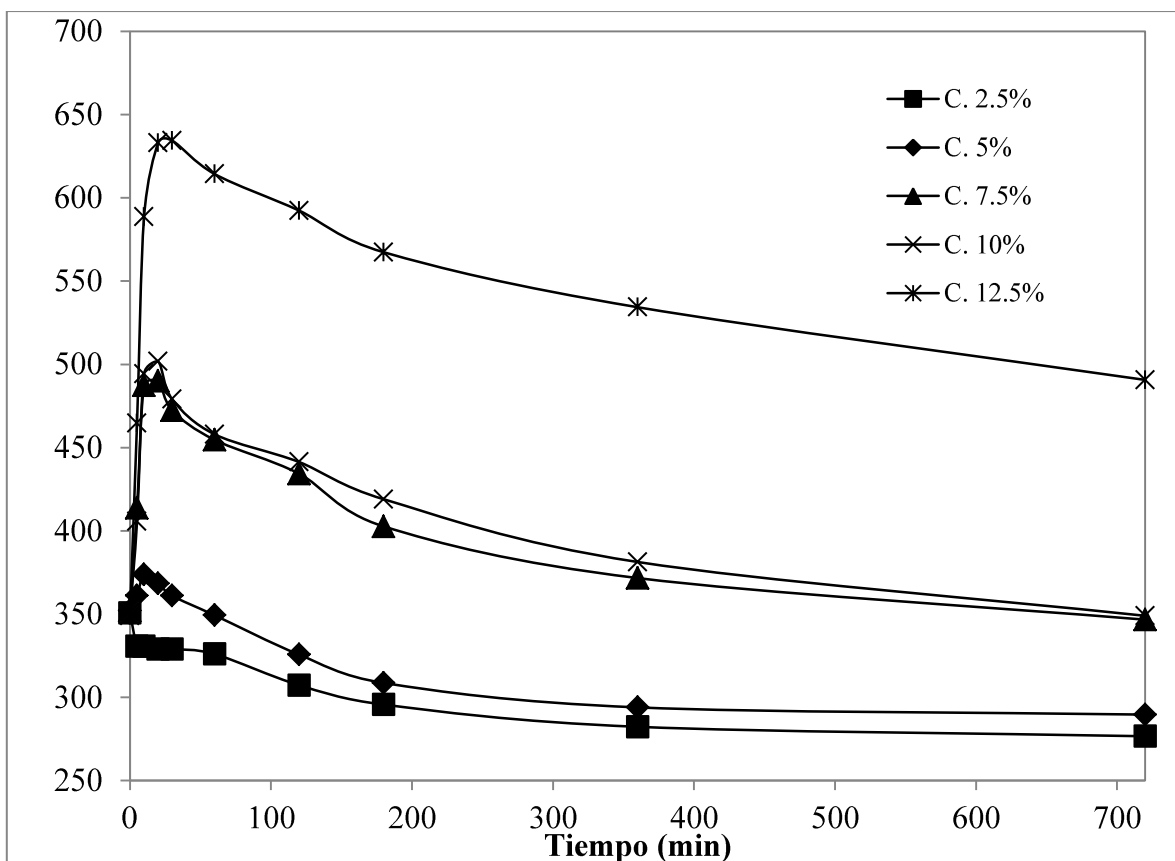


Figura 3.15 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4A regenerada NaOH.

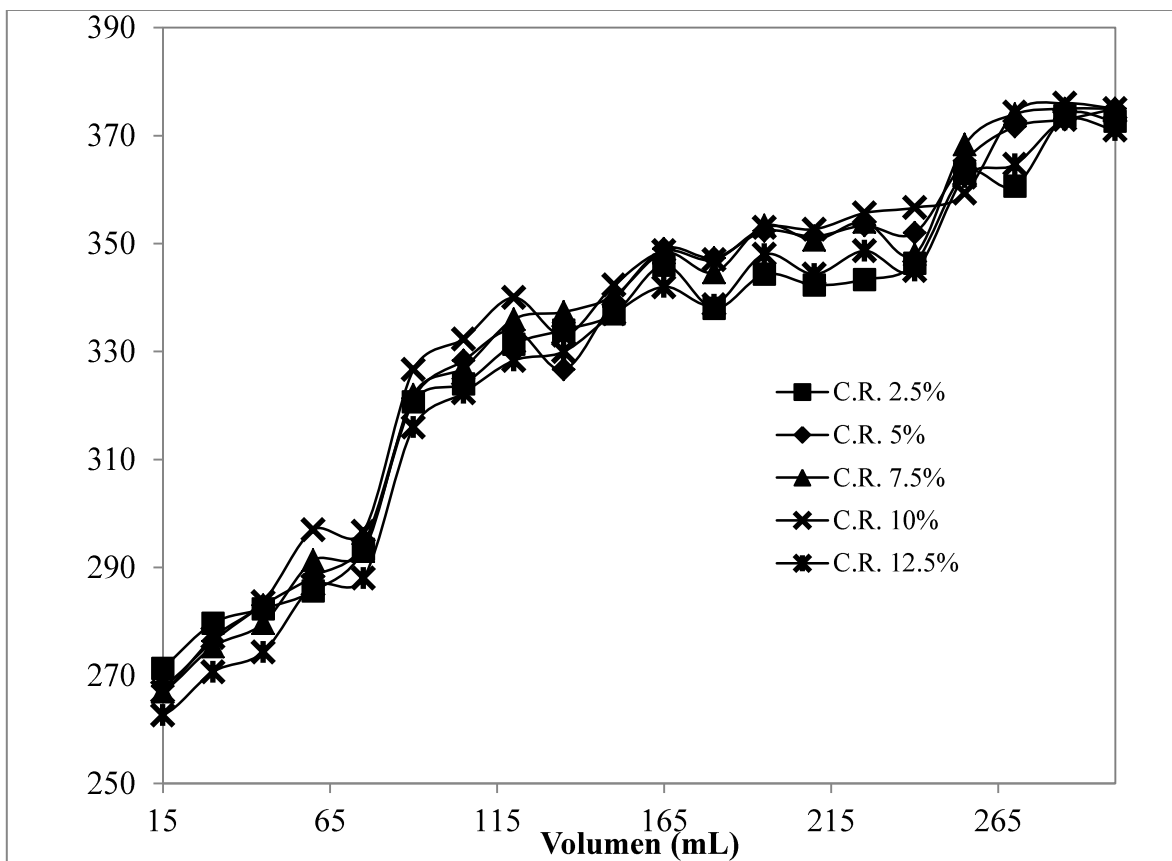


Figura 3.16 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4A regenerada con NaOH.

Adicionalmente, se utilizó un segundo regenerante básico NH_4OH con la finalidad de observar si el tipo de regenerante utilizado influye en la eficiencia de regeneración. Los resultados mostraron una mejora importante con la utilización de NH_4OH en comparación con la utilización de NaOH (Figura 3.17). Como se muestra en las curvas de ruptura correspondientes (Figura 3.18), la utilización de NH_4OH incrementó la capacidad total de intercambio hasta $41 \pm 2 \text{ mgSDT/g}_{\text{resina}}$, equivalente a $0.47 \pm 0.03 \text{ eq/L}_{\text{resina}}$. Este incremento representa una eficiencia de regeneración 20% mayor en comparación con la estrategia de regeneración utilizando NaOH.

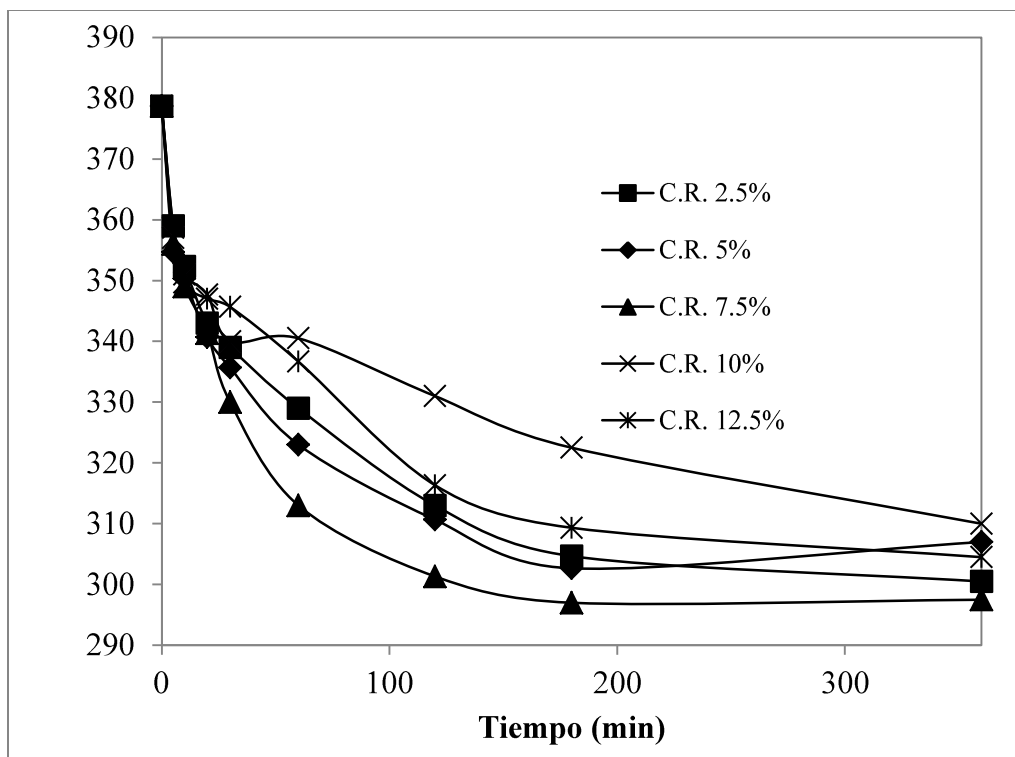


Figura 3.17 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4A regenerada con NH_4OH .

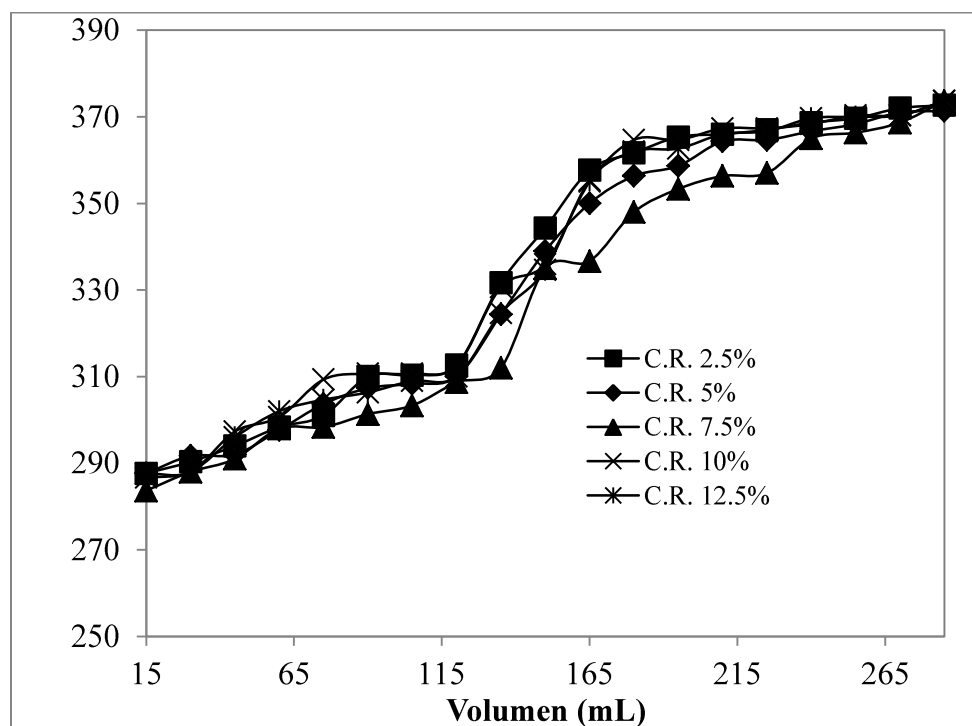


Figura 3.18 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4A regenerada con NH_4OH .

Por otro lado, la fracción del lecho mixto identificada como resina catiónica (4B) fue regenerada con H_2SO_4 a distintas concentraciones. Inicialmente, durante los primeros minutos se observa una disminución seguida de un incremento pronunciado que posiblemente se deba a la pérdida de carbonatos como CO_2 a la fase gas, como se ha explicado anteriormente.

Como se muestra en la Figura 3.19, en general, una mayor concentración se refleja en una mejora de la capacidad de intercambio. No obstante, el desempeño mostrado en las curvas de ruptura muestra que la concentración del regenerante nos es un factor importante en la eficiencia de regeneración (Figura 3.20). En promedio, las resinas regeneradas con H_2SO_4 mostraron una capacidad total de intercambio de 33.5 ± 1.5 mgSDT/g_{resina}, equivalente a 0.37 eq/L_{resina}.

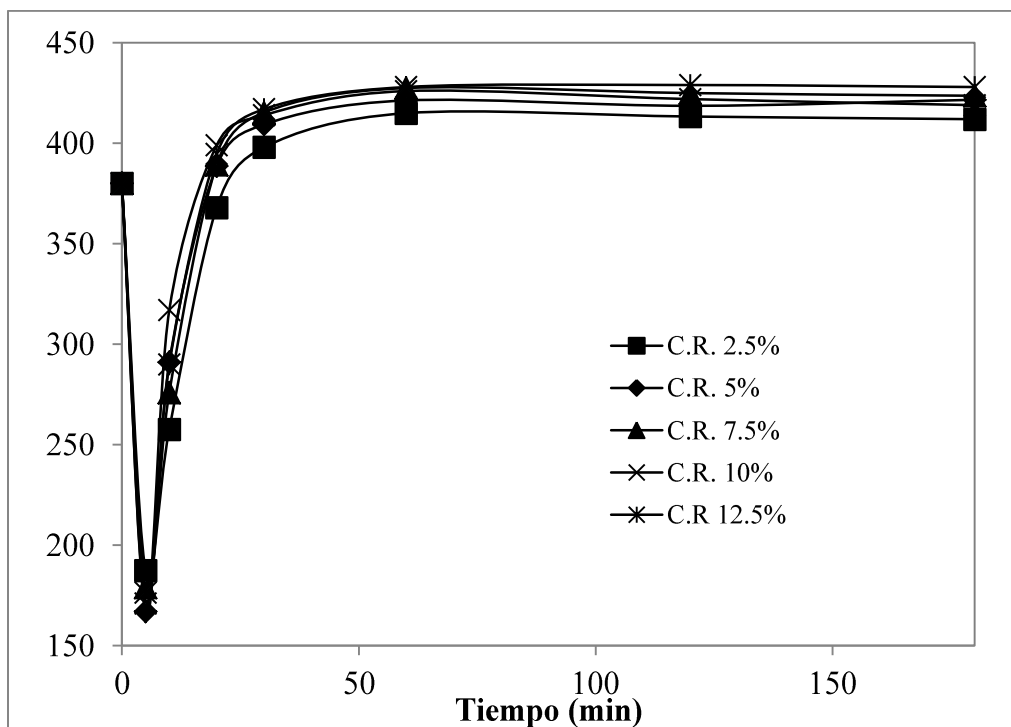


Figura 3.19 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4B regenerada con H_2SO_4 .

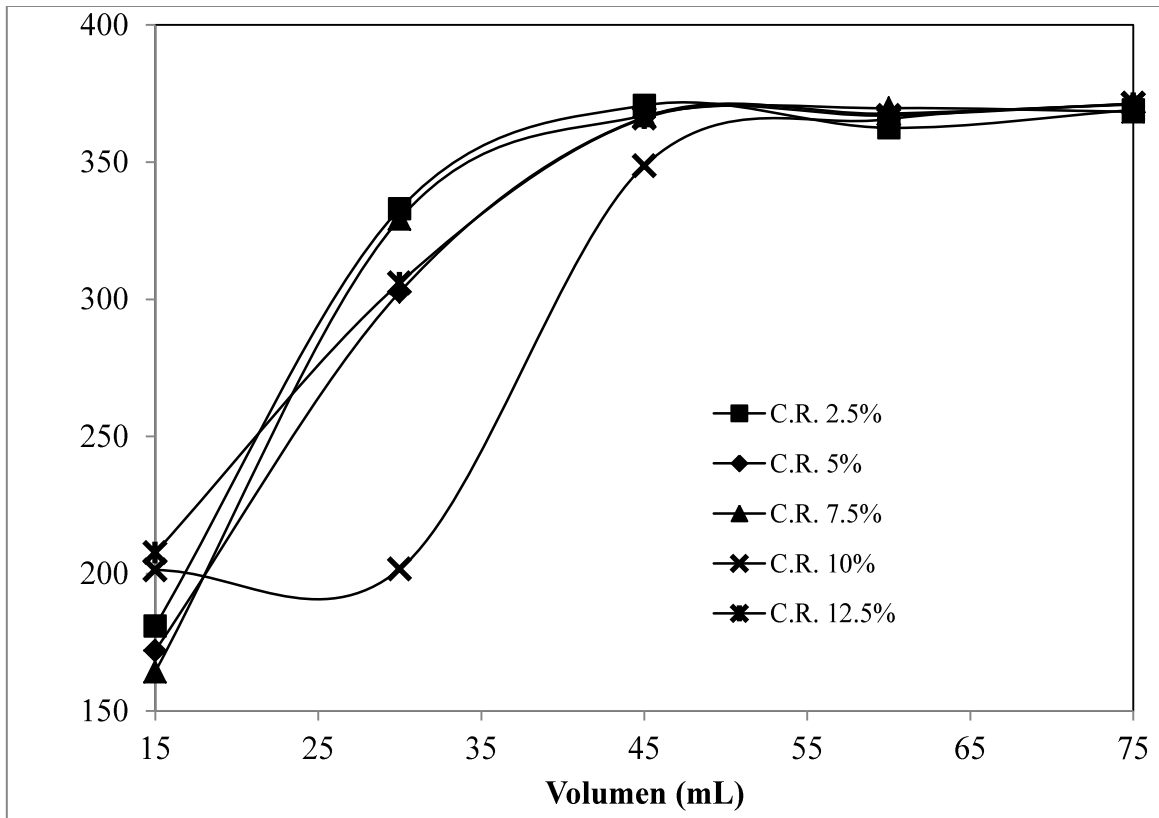


Figura 3.20 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4B regenerada con H₂SO₄.

Adicionalmente, la resina catiónica fue regenerada con HCl con el objetivo de identificar el efecto del tipo de regenerante en la eficiencia de la regeneración. Las Figuras 3.21 y 3.22 muestran la velocidad de intercambio y regeneración, así como, las curvas de ruptura, respectivamente. Los resultados indicaron que la capacidad total promedio alcanzada con HCl fue de 27.1 ± 0.5 mgSDT/g_{resina} (0.31 eq/L_{resina}), es decir, 19.1% menor que la capacidad alcanzada con H₂SO₄.

Por último, cabe mencionar que, como ha ocurrido consistentemente en las resinas catiónicas, durante los primeros minutos de intercambio existe una marcada disminución de la conductividad durante los primeros minutos del proceso. Hemos atribuido este comportamiento a la pérdida de HCO₃⁻; sin embargo, en futuras investigaciones será

relevante la realización de ensayos más detallados a fin de dar claridad a las observaciones descritas en esta tesis.

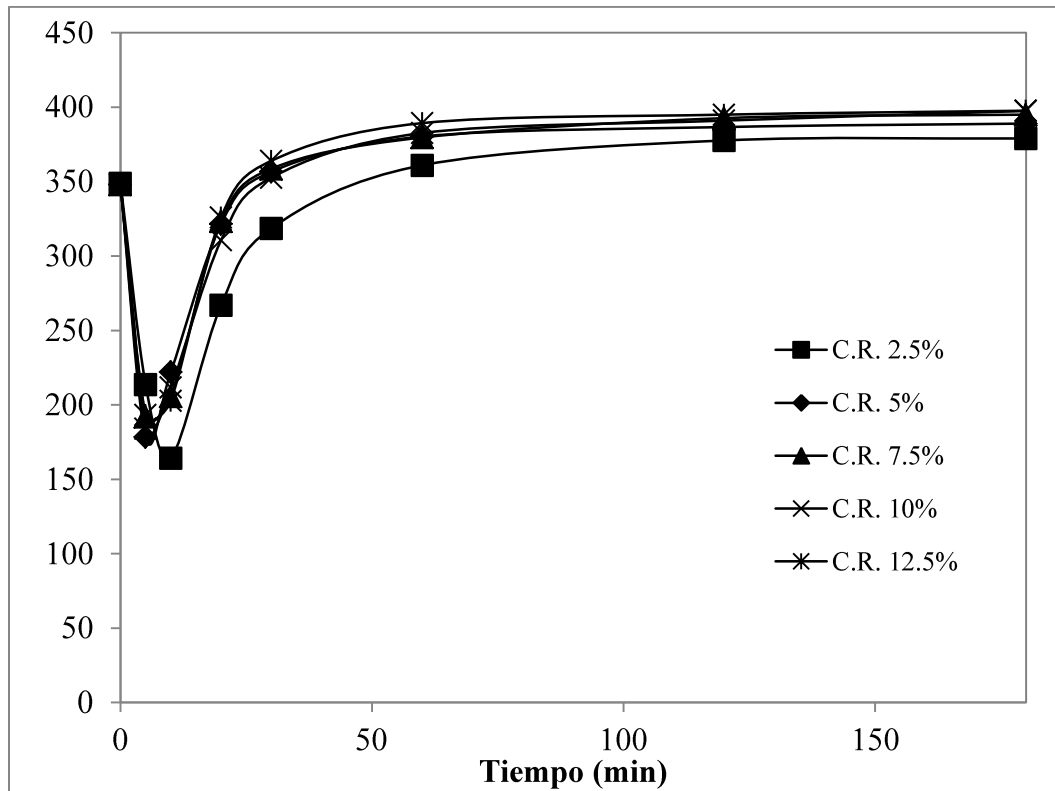


Figura 3.21 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4B regenerada con HCl.

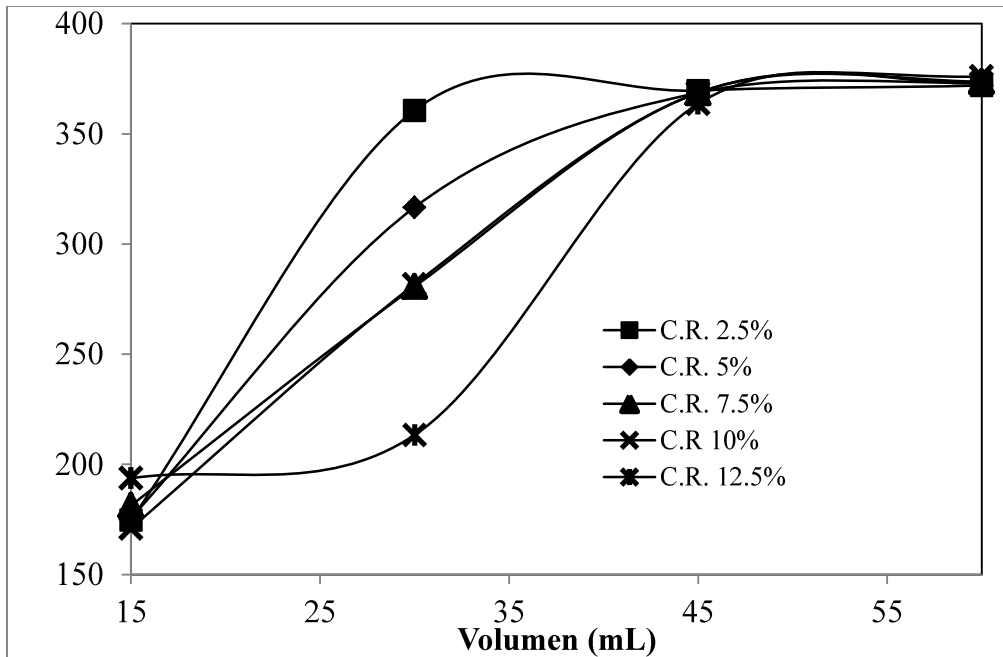


Figura 3.22 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4B regenerada con HCl.

Finalmente, las resinas 4A y 4B tratadas con diferentes tipos de regenerantes fueron mezcladas entre sí para simular la manera en la que se encuentra en las columnas, la proporción de la mezcla fue 50/50 w/w combinando cada uno de los regenerantes utilizados de la siguiente manera:

- *Resina 4A* regenerada con NaOH + *resina 4B* regenerada con HCl,
- *Resina 4A* regenerada con NaOH + *resina 4B* regenerada con H₂SO₄,
- *Resina 4A* regenerada con NH₄OH + *resina 4B* regenerada con H₂SO₄ y
- *Resina 4A* regenerada con NH₄OH + *resina 4B* regenerada con HCl,

para determinar su capacidad de intercambio total a través elaboración de curvas de ruptura (Figura 3.25 y 3.26). En promedio, las combinaciones evaluadas mostraron una capacidad total de intercambio de 44.6 ± 3.4 mg SDT/g_{resina} (0.51 eq/L_{resina}).

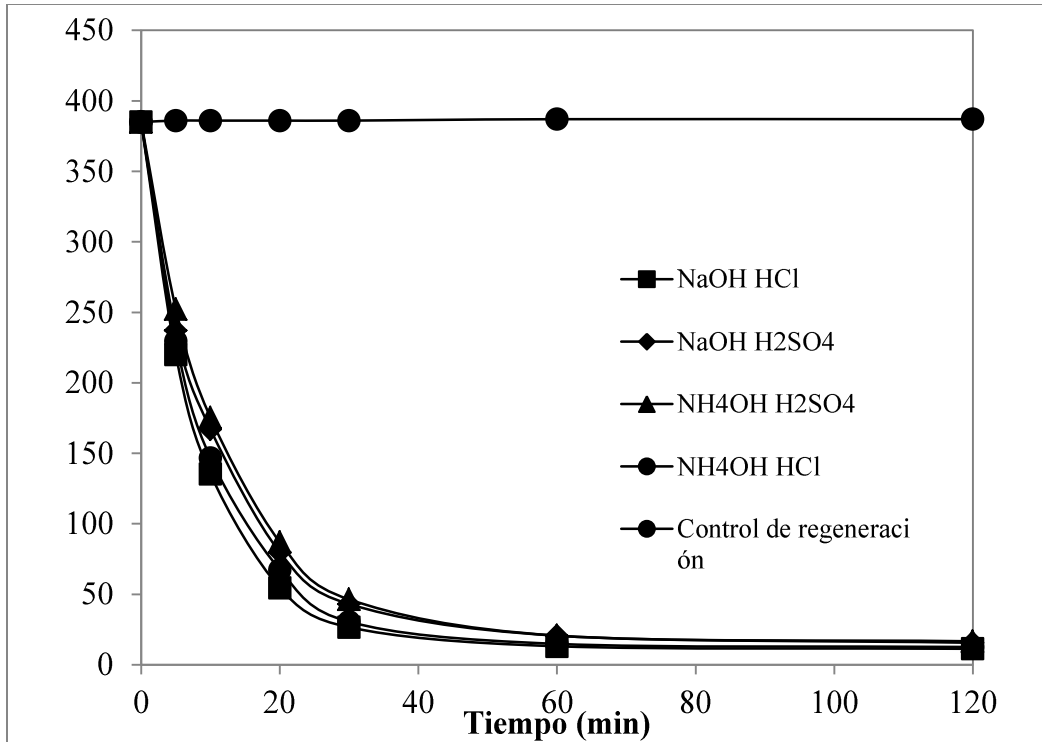


Figura 3.23 Gráfico de la velocidad de intercambio y regeneración de la resina 4 mixta regenerada.

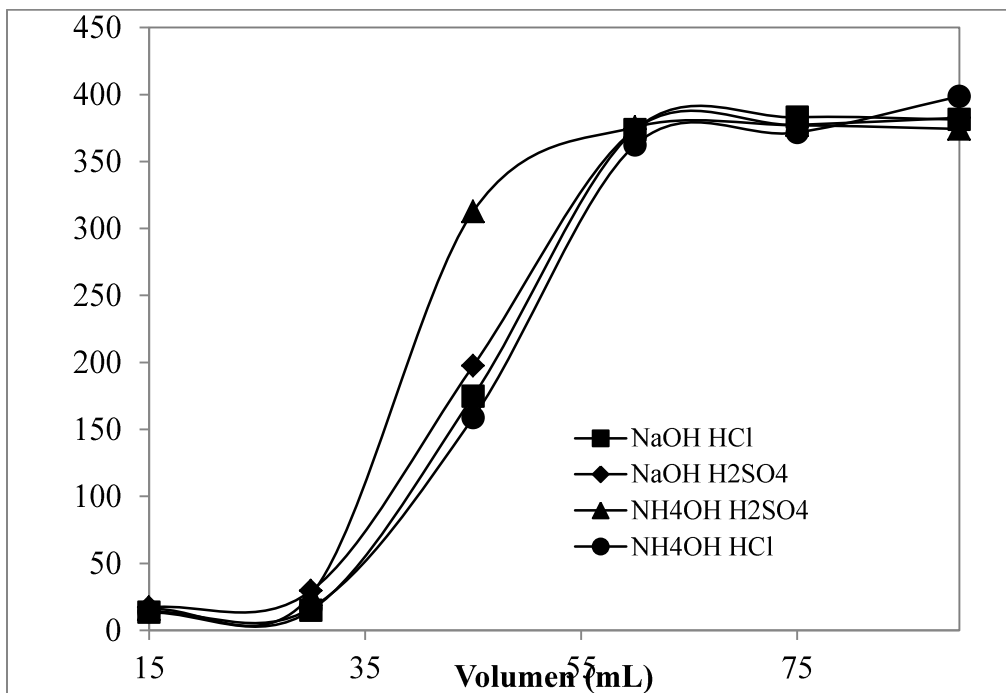


Figura 3.24 Gráfico de la curva de ruptura de la resina 4 mixta.

3.4.3.5 Pruebas en columnas

En base a los resultados obtenidos en la serie de experimentos anteriormente descritos, se seleccionaron las concentraciones más adecuadas para llevar a cabo la regeneración en cada una de las cinco resinas como se observa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Concentración de regenerante para cada una de las resinas en las columnas.

Resina	Regenerante	Concentración (%)
1 (Columna 1)	NaOH	12.5
2 (Columna 2)	NaOH	5
3 (Columna 2)	H ₂ SO ₄	2.5
Mixta 1: 4A+4B (Columna 3)	NaOH- H ₂ SO ₄	2.5-2.5
Mixta 2: 4A+4B (Columna 4)	NH ₄ OH- H ₂ SO ₄	7.5-2.5

Las resinas seleccionadas fueron empacadas en 3 columnas de plástico, guardando las proporciones del equipo comercial de intercambio iónico (BarnsteadTM E-pureTM), lo cual es de especial utilidad en aras de utilizar equipos de mayor tamaño. Adicionalmente, una columna de dimensiones idénticas se empacó con resina sin ningún tratamiento, es decir, resina sin regenerar. Las columnas fueron operadas bajo tres distintos regímenes de flujo que se muestran en el Tabla 3.4. Las determinaciones de estos flujos se explican en el apartado *Análisis de resinas* en la sección 3.3.5 pruebas en columnas.

Tabla 3.4 Flujos de operación.

Columna	Flujo (mL/min)	Tiempo de residencia (min)	Capacidad Total de Intercambio (gSDT/mL _{lecho})
1	1	5	16.76
2	1.7	3	18.86
3	5	1	15.31
Blanco	1	5	9.98

Como se muestra en la Figura 3.25, el intercambio iónico se ve favorecido a un tiempo de residencia relativamente alto, y a medida que el tiempo de residencia incrementa, la resina se agota en un tiempo menor. Esto se debe a que, a tiempos residencia altos, el flujo de iones es también relativamente alto y por lo tanto el tiempo requerido para intercambiar una determinada cantidad de iones será menor. Por otro lado, a tiempos de residencia bajos, el flujo de iones es también bajo, y por ello, el tiempo que se requiere para intercambiar la misma cantidad de iones que en el supuesto anterior debe de ser mayor.

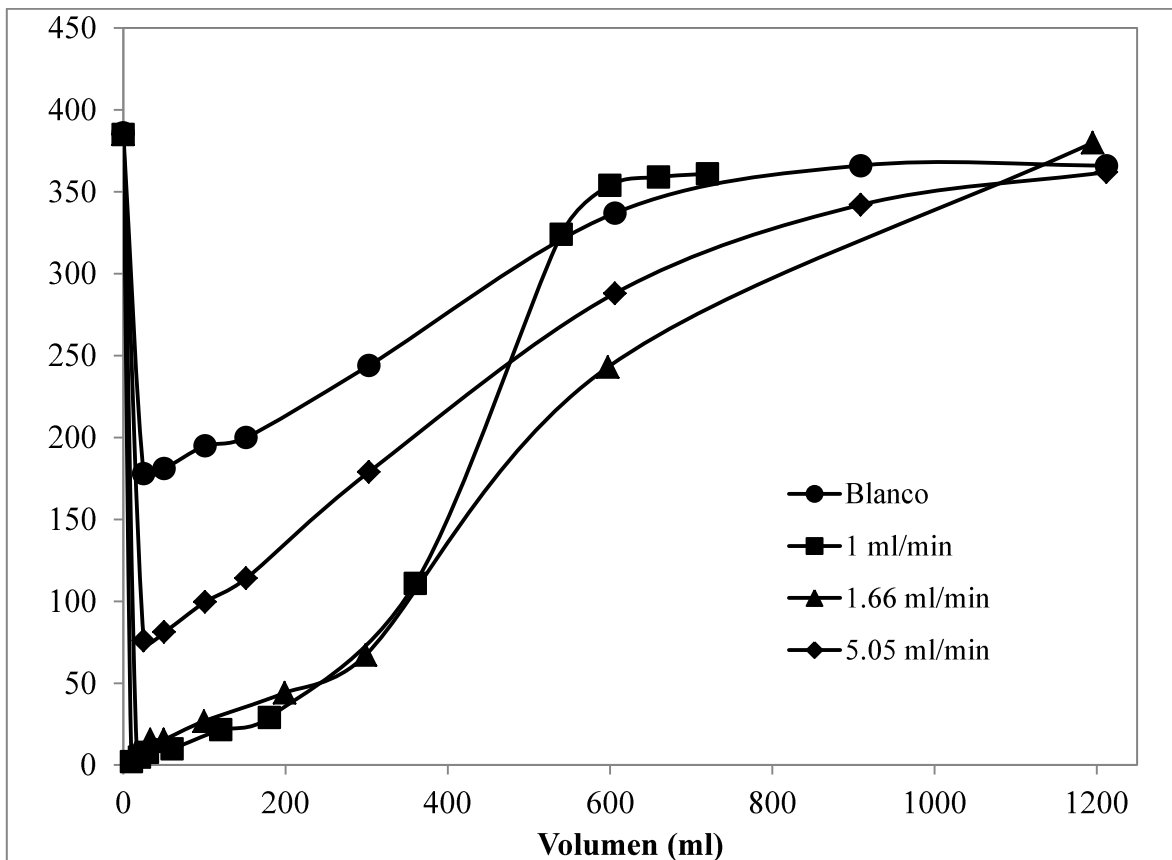


Figura 3.25 Intercambio iónico y regeneración en columnas.

Sin embargo, al comparar las capacidades totales de intercambio de las distintas columnas, es posible notar que la operada a un tiempo de residencia intermedio (3 min), mostró una mayor capacidad de intercambio con un valor de 18.85 gSDT/mL_{lecho}. En los dos casos

restantes, la capacidad de intercambio disminuyó a valores de 16.76 gSDT/mL_{lecho} y 15.31 gSDT/mL_{lecho} a tiempos de residencia de 5 y 1 min respectivamente.

3.4.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con la finalidad de proponer una estrategia eficaz para regenerar resinas de intercambio iónico, se probaron distintos tratamiento de regeneración utilizando distintos regenerantes bajo distintas concentraciones. Los resultados, que han sido descritos en los apartados anteriores, indican que la mejor estrategia para la regeneración del grupo de resinas es la que se muestra en la Tabla 3.3.

En la literatura se ha indicado que en resinas con grupos funcionales básicos, la regeneración con NaOH al 15% es una estrategia óptima para la recuperación de la capacidad de intercambio de dichas resinas (Nevárez Rivadeneira, Martha Elizabeth, 2010). En el presente trabajo, se encontró que la eficiencia del proceso de regeneración es más alta al utilizar NaOH al 12.5%. En ambos casos se concuerda en que mayores concentraciones de regenerante tienden a disminuir el tiempo de contacto necesario para eluir los grupos básicos adsorbidos en los grupos funcionales y reemplazarlos por iones hidroxilo. En particular, en el caso de las resinas 2 y 4A, se mostró la posibilidad de utilizar hidróxido de amonio como regenerante alternativo y alcanzar eficiencias de regeneración hasta 10 y 20% mayores a las obtenidas con NaOH. Esto puede deberse a una mayor capacidad del amonio por el desplazamiento de aniones adsorbidos en la superficie de la resina según lo indicado por Brad Buecker (1997).

Por otra parte, los resultados de velocidad de intercambio obtenidos sobre la regeneración de la resina 3 con ácido sulfúrico y ácido clorhídrico mostraron comportamientos

contrastantes. En particular, la resina tratada con ácido sulfúrico causó un incremento en la conductividad del agua utilizada, especialmente a concentraciones altas de regenerante. Esto pudo deberse a la precipitación de sulfatos en el proceso de regeneración que no fueron lavados completamente de la resina. De hecho, la precipitación de sales de sulfato es uno de los problemas más relevantes en la regeneración de resinas catiónicas utilizando ácido sulfúrico (Dardel y Arden, 2008).

No obstante, de acuerdo a las curvas de ruptura, que evalúan el comportamiento de la resina regenerada hasta el agotamiento de su capacidad de intercambio, se constató que el tipo de regenerante no es un factor de importancia puesto que las máximas capacidades totales de intercambio iónico de las resinas tratadas con ambos regenerantes mostraron valores muy similares (0.31 - 0.33 eq/L). Adicionalmente, empresas especializadas en sistemas de intercambio iónico, como DOW (DOW, 2013), indican que el ácido sulfúrico es el reactivo más económico de ambas alternativas. En contraparte, el ácido clorhídrico podría presentar ciertas ventajas sobre el sulfúrico, especialmente en la capacidad de regeneración que es más alta en comparación con cantidades equimolares de ácido sulfúrico. En este trabajo sin embargo, estas características resultaron poco importantes.

Finalmente, es de gran interés señalar que los distintos tratamientos de regeneración evaluados resultaron en capacidades de intercambio iónico mayores a 0.33 eq/Lresina (a excepción de la resina 1), lo que significa que las eficiencias de regeneración, en general, estuvieron por encima del 20% de la capacidad original de múltiples resinas comerciales, como las distribuidas por DOW (DOWEX Marathon A, The Dow Chemical Company).

De acuerdo a distintos reportes, la regeneración de resinas tipo catiónico se realizan con HCl a concentraciones que van del 8 al 16%, mientras que, la regeneración de resinas aniónicas se realiza con NaOH a distintas concentraciones. Sin embargo, ninguna de estas concentraciones fue seleccionada en base a alguna metodología de optimización, más bien, las metodologías de regeneración se hicieron en base a las especificaciones de los proveedores. Por lo cual, la selección realizada en este trabajo es una de las pocas alternativas basada en una metodología para mejorar la eficiencia de la regeneración.

3.4.5 CONCLUSIONES PARCIALES

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados de los parámetros del agua analizada: pH, temperatura, conductividad, dureza, acidez y alcalinidad, resultaron estar dentro de los estándares normativos del agua para uso y consumo humano dictados en la norma NOM-127-SSA1-1994.
- Las resinas utilizadas en los experimentos proceden del equipo Barnstead E-Pure y fueron clasificadas en 5 tipos de resinas: 1, 2, 3, 4A y 4B, de acuerdo a su ubicación en los cartuchos del equipo. Las resinas tipo 4A y 4B se encontraron mezcladas dentro de un solo cartucho (lecho mixto), mientras que las resinas 2 y 3 se encontraron en un solo cartucho pero con sus límites bien definidos. Se encontró que la resina tipo 1 es una resina aniónica, así como las resinas tipo 2 y 4A. Por otra parte, las resinas tipo 3 y 4B fueron identificadas como resinas catiónicas.
- De acuerdo a las distintos tratamientos de regeneración a los cuales fueron sometidas las resinas, la mejor capacidad de intercambio para la resina 1 fue obtenida de la regeneración con NaOH al 12% con un valor de 10.6 mg SDT/g_{resina}. Para la resina 2 la

capacidad de intercambio más alta, 39 mg SDT/g_{resina}, se alcanzó con el regenerante NH₄OH al 12.5%. La resina 3 obtuvo la capacidad más alta con 30 mg SDT/g_{resina} con H₂SO₄ al 2.5% y la mezcla (4A+4B) que alcanzó una capacidad de intercambio más alta fue la mezcla de resina 4A regenerada con NH₄OH al 7.5% (45.6 mg SDT/g_{resina}) y resina 4B regenerada con HCl al 2.5% (26.8 mg SDT/g_{resina}) a pesar de que la mejor capacidad de intercambio para esta resina fue la regenerada con H₂SO₄ regenerada al 2.5% (36.1 mg SDT/g_{resina}).

CAPÍTULO 4 SIMULACIÓN DE ÓSMOSIS INVERSA E INTERCAMBIO IÓNICO

4.1 INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de evaluar otras alternativas en aspectos técnicos y además económicos a la metodología de regeneración discutida en el capítulo anterior, se decidió diseñar y simular un proceso de ósmosis inversa acoplado a un proceso de intercambio iónico utilizando el software Hydranautics (Nitto Group Company, U.S.) y CADIX (The Dow Chemical Company, U.S.), respectivamente.

El programa Hydranautics se conforma de dos paquetes informáticos: IMSDesign y ROData), a los cuales son de acceso libre para estudiantes y profesionales interesados en el uso de membranas. Hydranautics es un paquete de sistema de diseño de software, puede entregar simulaciones del desempeño bajo distintos tiempos y variedad de condiciones. Por otro lado, IMSDesing te brinda el control sobre la mayoría de la información usada en el proceso de selección de la membrana. El software que se utilizó, IMSDesing, es un programa de diseño que te permite planear un sistema de membranas (Ósmosis inversa) usando las membrana Hydranautics (Nitto, 2014).

Por otra parte, CADIX (Asistente de Diseño por Computadora para Intercambio Iónico) es una herramienta de ingeniería de proceso de Intercambio Iónico para el diseño del sistema y la evaluación de desempeño de la planta de estudio. El programa permite el diseño del flujo y contra-flujo de los sistemas de regeneración para el ablandamiento y aplicaciones de desmineralización usando resinas de intercambio iónico de la marca DOWEX™ (DOW, 2014).

En este capítulo al igual que el anterior, se considera el hecho de que el agua residual ya ha pasado por tratamientos primarios y secundarios. Es decir, que el enfoque de este ejercicio de simulación busca describir los procesos de remoción de partículas disueltas e iones en muestras de agua que ya no son consideradas residuales.

4.2 SIMULACIÓN ÓSMOSIS INVERSA

4.2.1 METODOLOGÍA PARA LA SIMULACION DE ÓSMOSIS INVERSA

En este apartado se describen las consideraciones que se tomaron para realizar la simulación con el programa Hydranautics.

1. La composición utilizada del agua de entrada a tratarse en el equipo de ósmosis inversa posee las características para agua potable mostradas en el Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Análisis físico-químicos y valores recomendados

Parámetros del agua	Valores en el agua de la red
Ca⁺⁺ (me/l)	1.5
Mg⁺⁺ (me/l)	0.39032
Na⁺ (me/l)	1.42631
CO₃⁼ (me/l)	0
HCO₃⁼ (me/l)	2.743064
Cl⁻ (me/l)	0.62972
SO₄⁼ (me/l)	0.609
NO₃-N (mg/l)	-
K⁺ (mg/l)	4.21
pH	7.51
C.E (dS/m)	0.395
TDS	200
SAR (me/l)	1.4671

2. La temperatura y pH del agua de alimentación son 25 °C y 7.5, respectivamente.

3. El sistema de ósmosis inversa se compone de un solo elemento de operación de tipo SWC-2540 (HYDRONAUTICS Nitto Group Company, U.S.).

4.2.2 SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA

Para el sistema simulado de ósmosis inversa, el flujo de agua que entró fluyó a través de una membrana de tipo SWC-2540. La relación permeado/rechazo para este sistema en particular fue de 0.75/1.0. En la Figura 4.1 se muestra un esquema general del sistema descrito.

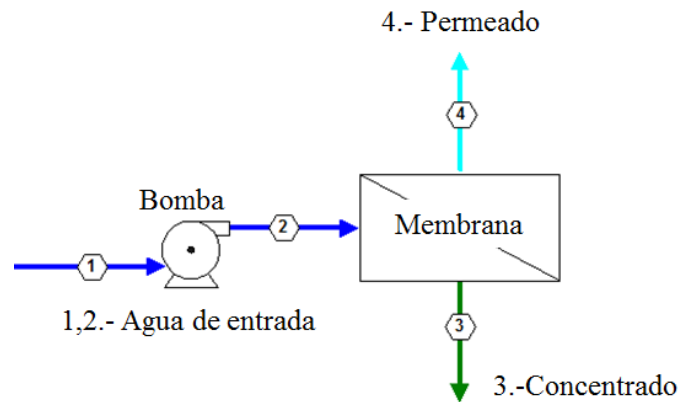


Figura 4.1 Descripción gráfica del sistema de Osmosis Inversa.

4.2.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En todo sistema de ósmosis inversa se generan dos corrientes de salida. Una denominada agua permeada, que es el agua con la calidad más alta, y otra denominada agua de rechazo (concentrado), que contiene una mayor concentración de sales. Las características de ambas corrientes se muestran en el Tabla 4.2 (cuadro de resultados: permeada y concentrada).

El permeado, con una concentración de sólidos disueltos totales de 16.1 mg/L, que representan sólo el 2.8% del valor del afluente, sin embargo, no es un valor suficiente para utilizarse como agua de proceso.

En particular, el sistema tiene una eficiencia de remoción relativamente alta para las especies Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} , con concentraciones en el permeado equivalentes a 0.6, 0.6, 0.3 y 0.5%, respectivamente. Por otra parte, las especies Na^+ , K^+ , HCO_3^{2-} , Cl^- , con concentraciones en el permeado equivalentes a 2.8, 3.5, 3.8 y 2.1%, respectivamente.

El caudal de agua permeada que se generó fue equivalente al 75% del afluente total, es decir, 1 m³/h aproximadamente. Este valor fue preseleccionado de acuerdo a las especificaciones de la membrana de ósmosis inversa utilizada.

Tabla 4.2 Resultados del proceso de Osmosis Inversa

Ión	Agua Alim.		Permeado		Conc.	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Ca^{++}	30.1	1.5	0.176	0	119.8	6
Mg^{++}	4.9	0.4	0.028	0	19.4	1.6
Na^+	32.2	1.4	0.901	0	126.1	5.5
K^+	163.8	4.2	5.727	0.1	638	16.4
NH_4^+	0	0	0	0	0	0
Ba^{++}	0	0	0	0	0	0
Sr^{++}	0	0	0	0	0	0
CO_3^-	0.3	0	0.001	0	1.4	0
HCO_3^-	164.7	2.7	6.34	0.1	639.8	10.5
SO_4^-	28.8	0.6	0.154	0	114.7	2.4
Cl^-	148.9	4.2	3.188	0.1	586	16.5
F^-	0	0	0	0	0	0
NO_3^-	0	0	0	0	0	0
B^{3+}	0		0		0	
SiO_2	0		0		0	
CO_2^-	8.21		8.21		8.21	
TDS	573.7		16.5		2245.2	
pH	7.5		6.1		8.06	

Las características del agua permeada obtenidas en la simulación de ósmosis indican que el tratamiento de ósmosis inversa planteado no es completamente efectivo en la producción de agua ultrapura. Lo anterior va de acuerdo al valor de sólidos disueltos totales (16.5 mg/L) obtenido en la simulación. Por lo cual, el efluente de ósmosis inversa fue utilizado como afluente en la simulación de un sistema de tratamiento por intercambio iónico.

4.2.4 COSTOS DEL PROCESO DEL SISTEMA DE OSMOSIS INVERSA

Para realizar el cálculo de los costos de esta etapa del proceso, se estimó que el equipo sería utilizado durante una hora diaria. Es decir el equipo estaría diseñado para producir hasta 30m³ de agua al mes.

Como se muestra en el Tabla 4.3, los rubros considerados son sólo aquellos correspondientes a la operación, pues la inversión no es tomada en cuenta en este análisis. Por otra parte, si se considera el costo asociado a la adquisición de membranas que, con una duración promedio de 2 años, se ve reducido hasta 166 pesos por mes, aproximadamente. Así entonces, el costo de producir durante 1 mes agua de ósmosis inversa (30 m³) es de aproximadamente 1292.98 MXN, es decir, 43.1 MXN/m³.

Tabla 4.3 Costos de inversión y operación del sistema de Osmosis Inversa

Concepto	Costo del proceso			
	Gasto	Precio	Costo	
Inversión de Membrana	~	\$ 4000/2 años	166.66	MXN/mes
Costo del agua para instituciones publicas	39 m ³ /mes	~ 28.88 MXN/m ³	1126.32	MXN/mes
Total			1292.98	MXN

*El sistema produce 30 m³/mes de agua con calidad de ósmosis inversa

*La duración de la membrana es de 2 años

*El uso del aparato es de 1 hora diaria

4.3 SIMULACIÓN INTERCAMBIO IÓNICO

4.3.1 METODOLOGÍA PARA EL SISTEMA DE INTERCAMBIO IÓNICO

A continuación se muestran las consideraciones que se tomaron para realizar la simulación del sistema de Intercambio Iónico con el programa CADIX.

1. La composición utilizada del agua a tratarse en el equipo posee las características del efluente de la planta de ósmosis inversa (Tabla 4.4).
2. La temperatura y pH del agua de alimentación son 25 °C y 7.5, respectivamente.
3. El sistema de intercambio iónico se compone de tres elementos: una columna de intercambio catiónico, una columna de desgasificación y una columna de intercambio aniónico.

Tabla 4.4 Valores del agua de alimentación.

Agua de alimentación	
Calcio	0.0088 meq/l
Magnesio	0.0023 meq/l
Sodio	0.039 meq/l
Potasio	0.15 meq/l
Otros cationes	- meq/l
Cationes Totales	0.20 meq/l
Cloro	0.10 meq/l
Nitrato	- meq/l
Sulfato	0.0032 meq/l
Otros aniones	- meq/l
Aniones Totales	0.20 meq/l
Sílice como SiO ₂	0.02 mg/l
pH	7.50
CO ₂ libre	8.21 mg/l
Temperatura °C	25
Materia Suspendida	0.15 mg/l
Orgánicos no polares	- %

4.3.2 SISTEMA DE INTERCAMBIO IÓNICO

El sistema simulado a través del programa CADIX estuvo compuesto de dos etapas de intercambio iónico, separadas por una etapa de desgasificación (Figura 4.2).

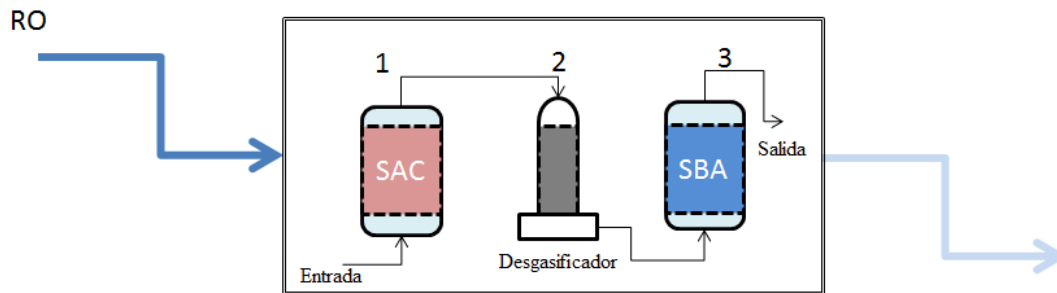


Figura 4.2 Diagrama del sistema de Intercambio Iónico.

La primera etapa de intercambio fue una columna empacada con 15 litros de la resina comercial Dowe Marathon C, que es una resina de tipo ácido fuerte. El efluente de esta columna pasa a través de una columna de desgasificación que tiene como objetivo principal, el eliminar el ácido carbónico de la solución. Por último, el agua se hace pasar a través de una columna empacada con 31 litros de la resina comercial Dowex Marathon A, una resina de base fuerte (Tabla 4.5).

El sistema simulado, es capaz de llevar a cabo el tratamiento de 0.12 m³/h de agua proveniente del sistema de ósmosis inversa. Este valor corresponde al flujo de agua normalmente observado en la línea de agua potable y decidió utilizarse como referencia.

4.3.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados obtenidos mediante simulación mostraron que el sistema de tratamiento por intercambio iónico logra disminuir la conductividad del agua de entrada hasta 0.25 µS/cm,

característica que le confiere la calidad de agua desionizada. Los resultados obtenidos se resumen en los Tabla 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5 Información físico-química y de operación las dos resinas utilizadas en el modelo.

Propiedades físicas y químicas típicas	Dowex MARATHON A			Dowex MARATHON C		
Forma física	Cuentas de color blanco a ámbar translúcido			Cuentas esféricas de ámbar translúcido		
Matriz	Styrene-DVD, gel			Styrene-DVD, gel		
Grupo funcional	Amina Cuaternaria			Ácido sulfónico		
Forma Iónica		Cl ⁻	OH ⁻		Na ⁺	H ⁺
Capacidad total de intercambio	eq/l	1.3	1	eq/l	2	1.8
	kgr/ft3 as CaCO3	28.4	21.9	kgr/ft3 as CaCO3	43.7	39.3
Capacidad de retención de agua	%	50-60	60-72	%	42-48	50-56
Tamaño medio de partícula	µm	575±50	610±50	µm	585±50	600±50
Coefficiente de uniformidad		1.1	1.1		1.1	1.1
Resina entera (sin grietas)	%	95-100	95-100	%	95-100	95-100
Hinchazón total	%	20	20	%	8	8
Densidad de partícula	g/ml	1.08	1.06	g/ml	1.28	1.28
	g/l	670	640	g/l	820	800
Peso	lbs/ft3	42	40	lbs/ft3	51	50
Condiciones de operación sugeridas						
Temperatura de operación máxima		Cl ⁻ 100°C (212°F)	OH ⁻ 60°C (140°F)	120°C (250°F)		
Rango de pH	0-14			0-14		
Profundidad de lecho	800 mm (2.6 ft)			800 mm (2.6 ft)		
Tasas de flujo						
Enjuague rápido	5-60 m/h (2-24 dpm/ft2)			5-60 m/h (2-24 dpm/ft2)		
Regeneración co-corriente	1-10 m/h (0.4-4 gpm/ft2)			1-10 m/h (0.4-4 gpm/ft2)		
Regeneración contra-corriente	5-20 m7h (2-8 gpm/ft2)			5-20 m7h (2-8 gpm/ft2)		
Necesidades totales de enjuague	1 m3 de solución por m3 de resina			1 m3 de solución por m3 de resina		
Tipo de regenerante	2-5% NaOH			1-8% H2SO4	4-8% HCl	8-12% NaCl
Temperatura del regenerante	hasta 50°C (122°F)			-		

Tabla 4.6 Valores del agua de salida del sistema de Intercambio Iónico

Calidad de agua de salida de la planta (promedio)			
		Requerido	Estimado
Conductividad	MicroS/cm	1	0.25
SiO₂	mg/l	0.01	0.010
Na⁺	mg/l	0.095	0.024
Alcalinidad	meq/l		
PH			8.1

De acuerdo a la simulación, el sistema planteado es capaz de operar de manera continua hasta 168 horas. Por lo cual, el volumen máximo de tratamiento es de 20.2 m³ de agua. Tomando en cuenta el volumen de resina utilizado, puede estimarse un que se tratan 0.404 m³ de agua por litro de resina empacada. Este valor es equivalente al intercambio de 443 meq/l.

Finalmente, una vez que las resinas pierden su capacidad de intercambio, es decir, cuando las resinas agotan su capacidad, la simulación indica que para regenerarlas se requerir á utilizar 6.49 litros de HCl (10%) para la resina catiónica y 13.2 litros de NaOH (10%) para la resina aniónica, toda esta información es calculada con el programa CADIX.

4.3.4 COSTOS DEL INTERCAMBIO IÓNICO

De acuerdo a los valores obtenidos en la simulación sobre el diseño y desempeño del sistema de intercambio iónico, se investigaron los costos de las resinas de intercambio y de los reactivos de regeneración, y en base a estos se determinó el costo de producción de agua desionizada. Los cálculos indican que el costo por metro cúbico de agua producida es de aproximadamente 850.3 MXN/m³, es decir, 0.85 MXN/L (Tabla 4.7). No obstante, es importante considerar que la estimación del costo del proceso de Intercambio Iónico no

considera es el costo de inversión, es decir, el correspondiente a la adquisición, instalación y mano de obra del equipo.

Tabla 4.7 Costos del proceso de Intercambio Iónico

Concepto	Costo			
Ácido Clorhídrico	157	MXN/L	339.643	MXN/Regeneración
Hidróxido de sodio 10%	30.6	MXN/L	403.92	MXN/Regeneración
Agua de regeneración			5.487	MXN/Regeneración
Costo de regeneración			749.051	MXN/Regeneración
Concepto	Costo			
Resina Dowex Marathon A	3790	MXN/kg	4017.4	MXN/L
Resina Dowex Marathon C	2690	MXN/kg	3443.2	MXN/L
Costo de resinas	6480	MXN/kg	7460.6	MXN/L
			Costo total	Costo total por semestre
			124539.4	MXN
			12453.94	MXN/semestre
			51648	MXN
			5164.8	MXN/semestre
			176187.4	MXN
			17618.74	MXN/semestre
				Costo total + regeneración
			18367.791	

*La vida de la resina es de 5 años

4.3.5 CONCLUSIONES PARCIALES

De acuerdo a las simulaciones realizadas con los programas HYDRONAUTICS y CADIX, los costos de producción de un m³ de agua son de 43.1 y 850 MXN, mediante ósmosis inversa e intercambio iónico, respectivamente. Sin embargo, aunque el proceso de ósmosis inversa puede ser más económico, la calidad brindada por el proceso de intercambio iónico es ampliamente superior que con el proceso de ósmosis inversa. Por lo tanto, el intercambio iónico es el proceso preferido para obtener agua de excelente calidad.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

El intercambio iónico es un proceso que consiste en el intercambio reversible de iones en solución con los contraiones lábiles de polímeros insolubles (Noguerol, 1996). Al agotar la capacidad de intercambio del material, es posible utilizar ácidos o bases según corresponda para recuperar dicha capacidad de intercambio y así poder reutilizar el material.

Los procedimientos para realizar dicha regeneración son por lo tanto, un aspecto muy relevante en el uso de la tecnología de intercambio iónico. No obstante, poco se ha realizado para indicar las mejores condiciones para realizar la regeneración, en específico, la mejor concentración de regenerante a utilizar. Y este es un aspecto de gran interés para los actores que buscan su utilización en la escala industrial, como el caso presentado en este documento.

Al respecto, el presente trabajo muestra una serie de experimentos encaminados a la determinación del mejor conjunto de condiciones de regeneración para las resinas en un equipo de intercambio iónico comercial.

Los resultados de los experimentos planteados conllevan a las siguientes conclusiones:

- Las mejores estrategias de regeneración para las resinas catiónicas fueron la utilización de H_2SO_4 (2.5%), que resultaron en capacidades máximas de intercambio de 30 mg SDT/g_{resina} y 36.1 mg SDT/g_{resina} para las resinas 3 y 4B, respectivamente.
- Las mejores estrategias de regeneración en el caso de las resinas aniónicas fueron la utilización de NaOH (12%), NH_4OH (12.5%) y NH_4OH (7.5%), para las resinas 1, 2 y 4A, respectivamente. Mediante esta estrategia de regeneración se alcanzaron

capacidades máximas de intercambio desde 10.6 mg SDT/g_{resina} hasta 45.6 mg SDT/g_{resina}.

- En la pruebas en columna, los resultados arrojaron que el intercambio iónico se ve favorecido a un tiempo de residencia relativamente alto, y a medida que el tiempo de residencia incrementa, la resina se agota en un tiempo menor. Sin embargo, las capacidades totales de intercambio que arrojaron las distintas columnas, cada una a distintos tiempos de residencia, se determinó que el tiempo de residencia intermedio (3 min), mostró una mayor capacidad de intercambio con un valor de 18.85 gSDT/mL_{lecho}. En los dos casos restantes, la capacidad de intercambio disminuyó a valores de 16.76 gSDT/mL_{lecho} y 15.31 gSDT/mL_{lecho} a tiempos de residencia de 5 y 1 min respectivamente.
- Para el sistema de simulación de Ósmosis Inversa desarrollado con el programa Hydranautics se determinó que las características del agua permeada obtenidas, con un valor de SDT de 16.5 mg/L, indican que el tratamiento de ósmosis inversa planteado no es completamente efectivo en la producción de agua de alta calidad. Sin embargo, la eficiencia de remoción, de este sistema, es relativamente alta para las especies Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} , con concentraciones en el permeado equivalentes a 0.6, 0.6, 0.3 y 0.5%, respectivamente. Con respecto a los costos del proceso, de membrana, y agua potable, el costo de producir 1 m³ de agua de ósmosis inversa es de aproximadamente 43.1 MXN, es decir, 0.043 MXN/L.
- En la simulación del sistema de tratamiento por Intercambio Iónico, el afluente utilizado fue el efluente de ósmosis inversa. Los resultados obtenidos mediante esta simulación mostraron que el sistema de tratamiento logra disminuir exitosamente la

conductividad del agua de entrada hasta $0.25 \mu\text{S}/\text{cm}$, valores que son considerados dentro de la calidad de agua desionizada. Este sistema se compone de dos etapas de intercambio iónico, separadas por una etapa de desgasificación. La primera etapa de intercambio es una columna empacada con 15 litros de la resina comercial Dowe Marathon C (resina de tipo ácido fuerte), una columna de desgasificación que elimina el ácido carbónico de la solución. Por último, el agua pasa a través de una columna empacada con 31 litros de la resina comercial Dowex Marathon A (una resina de base fuerte). El sistema simulado fue capaz de llevar a cabo el tratamiento de $0.12 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua y operar de manera continua hasta 168 horas (6 meses, 1 hora/día). Tomando en cuenta el volumen de resina utilizado, puede estimarse una capacidad de tratamiento de 0.404 m^3 de agua por litro de resina empacada.

- Una vez que las resinas pierden su capacidad de intercambio, la simulación indica que para regenerarlas se requerirá utilizar 6.49 litros de HCl (10%) para la resina catiónica y 13.2 litros de NaOH (10%) para la resina aniónica.
- El costo por metro cúbico de agua producida, de esta simulación, es de aproximadamente $850.3 \text{ MXN}/\text{m}^3$, es decir, $0.85 \text{ MXN}/\text{L}$. Sin embargo, hay que considerar que en la estimación del costo del proceso de Intercambio Iónico no se considera el costo de inversión, correspondiente a la adquisición, instalación y mano de obra del equipo, por lo cual se esperaría un incremento del costo del agua producida.
- Considerando las mejores estrategias de regeneración encontradas en este trabajo (NaOH 12.5% y HCl 2.5%), los costos de regeneración se verían disminuidos en aproximadamente 20%.

En base a la información obtenida en el presente trabajo, pueden otorgarse las siguientes recomendaciones:

1. La regeneración de los cartuchos de intercambio iónico puede realizarse de manera más simple si las resinas son separadas y regeneradas por separado.
2. Deben realizarse más investigaciones en torno a los cambios en la estructura química de las resinas ocurridos a consecuencia del intercambio de iones con el agua tratada y los regenerantes. Esto podría brindar elementos para dar más claridad a los comportamientos de la conductividad de las muestras.
3. En futuras investigaciones, sería más adecuado el análisis particular de cada uno de los elementos presentes en la mezcla de agua, aunque esto puede suponer un reto mayor en cuanto a trabajo experimental y un gasto mayor de recursos económicos.
4. Es importante probar mayores concentraciones de regenerante a fin de vislumbrar si este es un factor relevante para lograr incrementar los porcentajes de recuperación de la capacidad de intercambio iónico después de las regeneraciones. En este documento dicho porcentaje se encontró entre 30 y 40% de recuperación.
5. En futuros trabajos es recomendable utilizar agua proveniente de las primeras etapas del tren de tratamiento de aguas residuales industriales. En este trabajo se utilizó agua de otra fuente porque el objetivo se centró en el estudio del proceso de regeneración, pero a fin de dar mayor certeza, es necesario utilizar agua real.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alchin, D. 2008. "Ion Exchange Resins" by: David Alchin (Service Chemist, Drew New Zealand) with summary by Heather Wansbrough. Hosted online by the New Zealand Institute of Chemistry. Last Updated 2008.

American Water Works Association. Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de suministros de agua comunitaria. Ed. Mcgrau Hill (2002).

Avilla, J.A. (1999). Lo esencial Acerca del Intercambio Iónico.

Barajas López, M.G. (2002). Eliminación biológica de nutrientes en un reactor biológico secuencial. Caracterización y estimulación de las fuentes de carbono del agua residual urbana. Tesis doctoral. Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.

Brad Buecker. 1997. Power plant water chemistry: a practical guide. Pennwell publishing company. Oklahoma, USA.

Cartwright, P. Tratamiento y reuso del agua en aplicaciones comerciales e industriales. Agua Latinoamérica, 9 (1), 20–24, 2009.

Cheremisinoff, N. 2002. Ion exchange and carbon adsorption. In: Handbook of water and wastewater treatment technologies. Pp.372-445.

Chillón, María Fernanda (2009). Reducción de Boro en aguas procedentes de la desalación. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante

Crittenden, J.C.; Trussell, R.R.; Hand, D.W.; Howe, K.J.; Tchobanoglous, G. (2005). Water Treatment: Principles and Design. Editorial John Wiley & Sons, Inc.

Dardel, F., Arden, T. 2008. Ion exchangers. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.

DOW, 2013. DOW Ion Exchange Resins - Regenerating with Sulfuric or Hydrochloric Acid. [Http://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/98/~/dow-ion-exchange-resins---regenerating-with-sulfuric-or-hydrochloric-acid](http://dowac.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/98/~/dow-ion-exchange-resins---regenerating-with-sulfuric-or-hydrochloric-acid).

Dow Chemical Company, 2014 <http://www.membranes.com/index.php>

Harland, C., 1994. Ion exchange: theory and practice. Royal Society of Chemistry

Helffferich F (1995). Ion Exchange. Mcgraw-Hill

Helffferich F. "Ion Exchange". New York, mcgraw-Hill book Co. 1962.

Hendershot, W., Lalonde, H., Duquette. 2007. Ion exchange and exchangeable cations. In Soil Sampling Analysis. Second edition. Canadian Society of Soil Science.

Henry, J. G., G. W. Heinkle. Ingeniería Ambiental. 1999. 2ª ed. Pearson.

Herrera-Calderón, M., Palomino-Downham, G. 2012. Resinas de intercambio ionico: desarrollo tecnologico aplicado para la eliminacion de olor del metanol puro. Tecnología, Ciencia, Educación, 27 24-35.

[Http://www.reactivosdemar.com.mx/docs/varios/hycel%202011.pdf](http://www.reactivosdemar.com.mx/docs/varios/hycel%202011.pdf)

[Http://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?Interface=All&term=marathon&N=0&focus=product&lang=es®ion=MX](http://www.sigmaaldrich.com/catalog/search?Interface=All&term=marathon&N=0&focus=product&lang=es®ion=MX)

International Atomic Energy Agency, 2002. Application of ion exchange processes for the treatment of radioactive waste and management of spent ion exchangers. Technical report 408. IAEA, Vienna, Italia.

Magara, Y., Kawasaki, M., Sekino, M., Yamamura, H. 2000. "Development of reverse osmosis membrane seawater desalination in Japan". *Water Science and Technology*, 41, 1-8.

Manahan S., 2007. *Introducción a la química ambiental*. Editorial Reverté. UNAM.

Margineda, J. 2004. *Estudios de procesos de adsorción/desorción de iones en resinas encapsuladas. Aplicaciones a la remineralización de tejidos dentales*. Tesis doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

Martínez de la Cuesta P. J., Rus Martínez E. (2004) *Operaciones de Separación en Ingeniería Química. Métodos de Cálculo*. Ed. Pearson Prentice Hall.

Martinola, F.B., *Vom Wasser*, 56, 205 (1981). *Chem. Abs.* 98: 40337v.

Mcneil, V.H., Cox M.E., (2000). Relationship between conductivity and analysed composition in a large set of natural surface-water samples, Queensland, Australia. *Environmental Geology*. Volumen 39, pp 1325-1333.

Metcalf & Eddy. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento vertido y reutilización*. Editorial mcgraw-Hill. 4a Edición 2003. Madrid.

Michaud, C.F. (2011). Defining Ion Exchange Capacity. *Water Conditioning & Purification*

Moreno, J., Buitrón, G. (2002) Optimización de un Biorreactor Aerobio para el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales. *Computación y Sistemas*, número especial pp. 074-082, CIC -IPN ISSN 1405-554.

Nitto Company (2014). <http://www.membranes.com/index.php?pagename=imsdesign>

Noguerol, J. 1996. Tecnologías limpias para la reducción de contaminantes y la recuperación de solutos de fuentes hidrominerales mediante resinas de intercambio iónico. Tesis Doctorado, Universitat Autònoma de Barcelona.

Oliveira, J. 2003. Estudio de la biosorción de Cobre Cu(II) por perlas de alginato de calcio. Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú.

Perry, R, Green, D. 2008. Perry's chemical engineers'. McGraw Hill.

Pouchert C.J., The Aldrich Library of Infrared Spectra, (1981). 3rd ed.. Aldrich Chemical Co, Milwaukee, 1873 pp.

Ramalho, R.S., (1996). Tratamiento de aguas residuales. Laval University. Quebec, Canadá. Ed. Reverté. S.A. Barcelona.

Ramos, J.L. (2012). Optimización del número de regeneraciones, en el área de tratamiento de agua, por medio del arreglo ideal de los suavizadores en función de las propiedades físicas de la resina. Tesis de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala.

Rohm and Haas, 2008. Ion Exchange introduction. www.lenntech.com

Sánchez Recarte*, I., Abril Requena, J. Y Casp Vanaclocha, A. (2004). Empleo de la conductividad eléctrica en la determinación de la concentración de cristales de hielo en un fluido bifásico. III Congreso Español de Ingeniería de Alimentos. Pamplona España.

SEMARNAT, 1996a. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

SEMARNAT, 1996b. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

SEMARNAT, 1996c. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

Stahlberg, J., 2005. Ion exchange: Principles. Encyclopedia of analytical science. Second edition. Elsevier.

Stumm W.S. and J.J. Morgan. "Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical equilibrium in natural Water". Ed. Wiley-Interscience, Nueva York, London, Sydney, Toronto, pp. 583, 1970.

UNEP. (2010). Sick Water? The central role of wastewater management in sustainable development. Kristiansand Area, Norway: UN Habitat.

Valdez, E.C., Vázquez Gonzales, A.B. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Fundación ICA.

Van de Bruggen, Bart, Vandecasteele, Carlo, Van Gestle, Tim, Doyen, Wim, Leysen, Roger. 2003. "A Review of Pressure-Driven Membrane Processes in Wastewater Treatment and Drinking Water Production". Environmental Progress, 22, 46-56.

Wagenet, L., Kneen, B., Lemley A. (2005). Reverse Osmosis treatment of Drinking Water. College of Human Ecology, Cornell University

Wu, J., Meng, X., Liu, X., Liu, X., Zheng, Z., Xu, D., et al. (2010). Life Cycle Assessment of a Wastewater Treatment Plant Focused on Material and Energy Flows. *Environmental Management*, 46:610–617.

Zagorodni A.A., Kotova L.D. y Selemnev F.V. (2002). Infrared spectroscopy of ion Exchange resins: chemical deterioration of the resins. *React. Funct. Pol.* 53, 157–171.

GLOSARIO

Agua cruda: agua que no ha sido sometida a ningún proceso de tratamiento para su potabilización.

Agua natural: sistema complejo y heterogéneo, formado por una fase acuosa, una gaseosa y una o varias fases sólidas, las cuales se encuentran interactuando entre si mediante equilibrios químicos regidos por leyes termodinámicas, y en cuya composición química intervienen, además, otros factores (geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, microbiológicos, climáticos y ambientales).

Agua residual: aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen. Están constituidas por todas aquellas aguas que son conducidas por el alcantarillado e incluyen, a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno.

Agua Residual Industrial: En concreto, las aguas residuales industriales son las que proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua, incluyéndose los líquidos residuales, aguas de proceso y aguas de drenaje.

Agua Tratada: agua residual que proviene de algún tipo de tratamiento ya sea físico, químico y biológico, o una combinación de estos, que tuvo como fin eliminar los contaminantes presentes en esta agua para hacerla apta para su uso pero no para consumo humano.

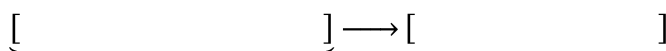
Agua ultrapura: Por definición el agua ultrapura sólo contiene H₂O y iones H⁺ y OH⁻ en equilibrio. Por lo que la conductividad de la misma es aproximadamente de 0,054 uS/cm a 25°C, o de 18,3 MOhm expresada en términos de resistencia.

Numero de ciclo: espacio experimental comprendido entre el inicio del Intercambio Iónico y el alcance del equilibrio.

ANEXO 1

Método para la determinación de dureza total en muestras de aguas

Fundamentos. El ácido dietilenamino tetra-acético y su sal disódica forman un complejo quelado soluble cuando se adicionan a una solución de ciertos cationes metálicos. Si se adiciona una pequeña cantidad del indicador negro de eriocromo T a una solución que contiene los iones calcio y magnesio en un pH de 10, la solución toma un color púrpura. Si se adiciona EDTA como titulante los iones calcio y magnesio serán acomplexados paulatinamente hasta que la solución adquiera un color azul, lo que indica el final de la titulación. Las reacciones que se llevan a cabo son:



Material utilizado

2 matraces volumétricos de 1000 ml

2 matraces volumétricos de 100 ml

1 capsula de porcelana

1 soporte con pinzas para bureta

2 matraces Erlenmeyer de 25 ml

1 pipeta de 10 ml

2 frascos goteros de 100 ml

Reactivos

Solución buffer pH 10

Disolución de 6.56 gr. de NH_4Cl y 57 ml. de NH_4OH en agua destilada y aforado a 100 ml.

Indicador negro de Eritocromo T

Disolución de 0.5 g. de negro de Eritocromo T y 4.5 gr.de clorohidrato de hidroxilamina en 100 ml de etanol.

Solución de EDTA (Sal disodica)

Disolución de 2 gr. de EDTA más 0.05 gr. de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ en agua destilada y aforado a 1000 ml.

Solución de $CaCl_2$ 0.02N

Disolución de 0.5 gr. de $CaCO_3$, previamente secado a $110^\circ C$ durante 2 horas, para después disolverlo en 10 ml de HCl 3N y aforarlo a 1000 ml con agua destilada.

Estandarización

La estandarización del EDTA se hizo de la siguiente manera: se colocó 5 ml de solución de $CaCl_2$ en un matraz Erlenmayer de 125 ml, para añadir 5 gotas de solución buffer de pH 10 y 3 gotas de indicador negro Ericromo T, esto propicia la aparición de un color purpura en presencia de iones de calcio y magnesio. Por último, se procede a titular con la solución de EDTA cuya normalidad se desea conocer, se termina hasta la aparición de un color azul.

La Normalidad del EDTA se calcula de la siguiente manera:

Dónde:

N_2 = normalidad del EDTA

V_1 = ml de solución de $CaCl_2$

N_1 = normalidad de la solución de $CaCl_2$

V_2 = ml gastados de EDTA

Procedimiento

- Se colocó 5 ml de la muestra de agua en un matraz Erlenmayer de 125 ml
- Se agregó 5 gotas de buffer pH 10
- Se adiciono 3 gotas de negro eritocromo T
- Se titulo con EDTA 0.01N hasta el viraje de purpura a azul

Cálculos

Para la determinación de la dureza total de la muestra:

Anexo 2

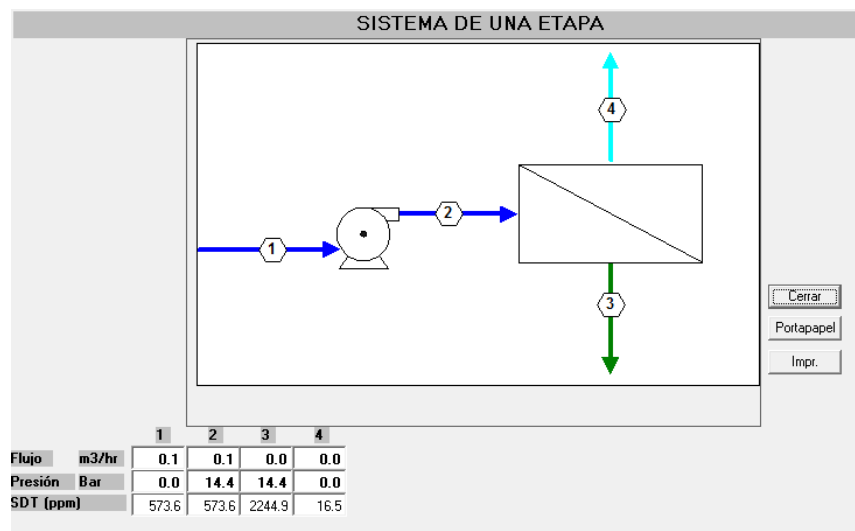
Programa Hydranautics- [Diseño OI]



Valores de entrada

Parámetros del agua	Valores en el agua de la red
Ca ⁺⁺ (me/l)	1.5
Mg ⁺⁺ (me/l)	0.39032
Na ⁺ (me/l)	1.42631
CO ₃ ⁼ (me/l)	0
HCO ₃ ⁼ (me/l)	2.743064
Cl ⁻ (me/l)	0.62972
SO ₄ ⁼ (me/l)	0.609
NO ₃ -N (mg/l)	-
K ⁺ (mg/l)	4.21
Ph	7.51
C.E (dS/m)	0.395
TDS	200
SAR (me/l)	1.4671

Diagrama de flujo



Hoja de diseño

Programa de diseño de sistemas con membranas HidraNautica2012

10/08/2014

DISEÑO BASICO

Programa O.J. licenciado a:

Cálculo creado por:

Proyecto: RO 1

Caudal bomba alta pres:

0.1 m3/hr

Caudal de Permeado:

1.00 m3/d

Presión Alim.:

14.4 bar

Caudal agua cruda:

1.3 m3/d

Temp. Agua Alim.:

25.0 C(77F)

Recuperación:

75.0 %

pH Agua Alim.:

7.50

Edad de las Membranas:

2.0 años

Dosis Químico, ppm (100%):

0.0 H2SO4

Disminución flux %/año:

7.0

Factor de Ensuciamiento

1.00

Incremento paso sales,

10.0

%/año:

Flux promedio:

16.0 lm2hr

Tipo de Alimentación:

Agua Pozo

Etapa	Perm. Flujo m3/hr	Caudal/tubo Alim. m3/hr	Conc. m3/hr	Flux l/m2-hr	Beta	Conc.&Contra. Presiones bar	Elemento Tipo	Elem. N?	Arreglo
1-1	0.0	0.1	0.0	16.0	2.97	14.4 0.0	SWC-2540	1	1x1

Ión	Agua cruda		Agua Alim.		Permeado		Conc.	
	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l
Ca	30.1	1.5	30.1	1.5	0.176	0.0	119.8	6.0
Mg	4.9	0.4	4.9	0.4	0.028	0.0	19.4	1.6
Na	32.2	1.4	32.2	1.4	0.901	0.0	126.1	5.5
K	163.8	4.2	163.8	4.2	5.728	0.1	638.0	16.4
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
Ba	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
Sr	0.000	0.0	0.000	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
CO3	0.3	0.0	0.3	0.0	0.001	0.0	1.2	0.0
HCO3	164.7	2.7	164.7	2.7	6.341	0.1	639.8	10.5
SO4	28.8	0.6	28.8	0.6	0.154	0.0	114.7	2.4
Cl	148.9	4.2	148.9	4.2	3.189	0.1	586.0	16.5
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
NO3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0
B	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21	8.21
TDS	573.6	573.6	573.6	573.6	16.5	16.5	2244.9	2244.9
pH	7.50	7.50	7.50	7.50	6.10	6.10	8.06	8.06

	Agua cruda	Agua Alim.	Conc.
CaSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	2%
SrSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
BaSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
Sat. SiO2:	0%	0%	0%
Indice Sat. de Langelier	-0.39	-0.39	1.31
Indice Sat. de Stiff & Davis	-0.33	-0.33	1.31
Fuerza iónica	0.01	0.01	0.03
Presión osmótica	0.3 bar	0.3 bar	1.3 bar

Programa Cadix



Valores de entrada

Cadix Feed is one source Feed is a mixture of **2** sources

Concentration units

0 meq/l **2** German degree **4** ppm as CaCO₃
1 French degree **3** ppm as ion **5** Gr. as CaCO₃/US gal

Feed water origin Unknown

Calcium	<input type="text"/>	meq/l	0.0088	Chloride	<input type="text"/>	meq/l	0.090
Magnesium	<input type="text"/>		0.0023	Nitrate	<input type="text"/>		
Total Hardness	<input type="text"/>		0.011	Sulfate	<input type="text"/>		0.0032
Sodium	<input type="text"/>		0.039	Other	<input type="text"/>		
Potassium	<input type="text"/>		0.15	FMA	<input type="text"/>		0.093
Other	<input type="text"/>			p-Alkalinity	<input type="text"/>		0.10
Total cations	<input type="text"/>		0.20	m-Alkalinity	<input type="text"/>		
				Total anions	<input type="text"/>		0.19

One source 100 %

Input "Other" as monovalent cations Input Alk values as CO₃ and HCO₃

F1

Cadix

Concentration units

0 meq/l **2** German degree **4** ppm as CaCO₃
1 French degree **3** ppm as ion **5** Gr. as CaCO₃/US gal


Feed water origin Unknown

Calcium	<input type="text"/>	meq/l	0.0088	Chloride	<input type="text"/>	meq/l	0.100
Magnesium	<input type="text"/>		0.0023	Nitrate	<input type="text"/>		
Total Hardness	<input type="text"/>		0.011	Sulfate	<input type="text"/>		0.0032
Sodium	<input type="text"/>		0.039	Other	<input type="text"/>		
Potassium	<input type="text"/>		0.15	FMA	<input type="text"/>		0.10
Other	<input type="text"/>			p-Alkalinity	<input type="text"/>		0.10
Total cations	<input type="text"/>		0.20	m-Alkalinity	<input type="text"/>		
				Total anions	<input type="text"/>		0.20

One source 100 %

Input "Other" as monovalent cations Input Alk values as CO₃ and HCO₃

F1



Feed water origin Unknown
One source 100 %

Check the box if the water origin is a RO or NF or UF permeate

Silica as SiO2 mg/l

pH

Free CO2 mg/l

Temperature °C °F

Organics as KMnO4 mg/l

Organics as O2 mg/l % non polar


Suspended material (average) mg/l

Cost of filtered & pretreated water feed to IX plant USD/m3

You may enter your own value for Free CO2 or have the program calculate the value by clicking **Evaluate free CO2**

F1

Especificaciones de la planta



Organic Scavenger

None
 In front of DI line
 Behind WAC

Polishing stage

Cation Exchanger Stage

Regeneration system
UPCORE
Packed Bed
Air Block

Inert resin top layer
IF-62
IF-59

Cation vessel
None
[WAC]
[SAC]
[WAC] - [SAC]
[WAC SAC]
[WAC | SAC]

Anion Exchanger Stage

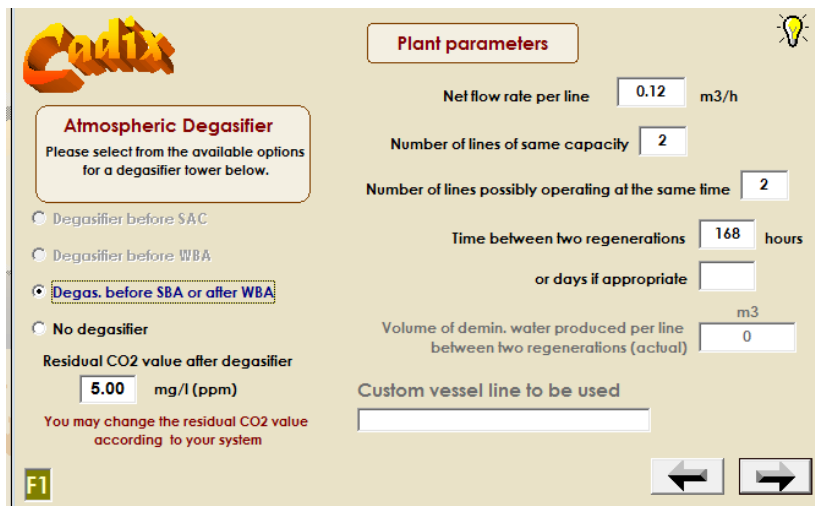
Regeneration system
UPCORE
Packed Bed
Air Block

Inert resin top layer
IF-62
IF-59

Anion vessel
None
[WBA]
[SBA]
[WBA] - [SBA]
[WBA SBA]
[WBA | SBA]

F1 Display picture on vessel selection **Unlock**

Capacidad de la planta



CADIX

Plant parameters

Net flow rate per line m³/h

Number of lines of same capacity

Number of lines possibly operating at the same time

Time between two regenerations hours
or days if appropriate

Volume of demin. water produced per line between two regenerations (actual) m³

Custom vessel line to be used

Atmospheric Degasifier
Please select from the available options for a degasifier tower below.

Degasifier before SAC

Degasifier before WBA

Degas. before SBA or after WBA

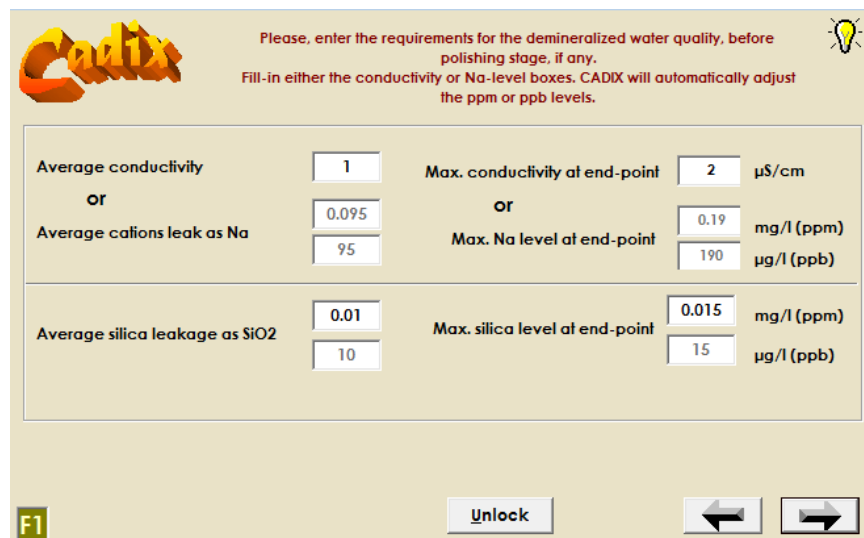
No degasifier

Residual CO₂ value after degasifier mg/l (ppm)

You may change the residual CO₂ value according to your system

F1

Requerimientos de calidad del agua de salida



CADIX

Please, enter the requirements for the demineralized water quality, before polishing stage, if any.
Fill-in either the conductivity or Na-level boxes. CADIX will automatically adjust the ppm or ppb levels.

Average conductivity Max. conductivity at end-point $\mu\text{S}/\text{cm}$

or Average cations leak as Na or Max. Na level at end-point mg/l (ppm)

$\mu\text{g}/\text{l}$ (ppb)

Average silica leakage as SiO₂ Max. silica level at end-point mg/l (ppm)

$\mu\text{g}/\text{l}$ (ppb)

Unlock

F1

Parámetros de regeneración

Cadix

Concentration of chemicals for regeneration

HCl 10 H2SO4 10 NaCl 10 NaOH 10 % w/w

Acid regeneration

- Hydrochloric acid
- H2SO4 constant %
- H2SO4 stepwise %

Caustic regeneration

- Cold NaOH (min. 15°C)
- Warm NaOH (35°C)
- Hot NaOH (50°C)

Effluent neutralization

- Effluent neutralization required
- Effluent neutralization not required

Regeneration mode

- Simultaneous cation/anion regeneration
- Separate cation/anion regeneration

Water for bed compaction

Cation exchange resins

- Filtered raw
- Demineralized
- Decalcionized

Anion exchange resins

- Decalcionized
- Demineralized

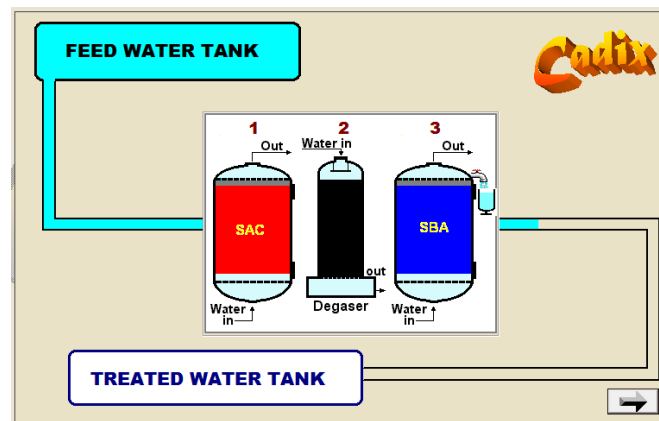
Rinse mode

- Rinse to waste
- Rinse recycling

F1

Navigation arrows: left and right.

Diagrama de la planta



Información del sistema

Columna SAC			Columna SBA		
Resina Dowex	MARATHON C		Resina Dowex	MARATHON B	
Volumen de resina	litros	15	Volumen de resina	litros	31
Diámetro de la columna	mm	150	Diámetro de la columna	mm	250
Altura de la resina	mm	990	Altura de la resina	mm	689
Sistema de regeneración	Lecho empacado		Sistema de regeneración	Lecho empacado	

Desgasificador atmosférico		
Entrada de dióxido	14	mg/l
Salida de dióxido	5	

Calidad promedio del agua de salida de la planta

		Required	Estimated
Outlet Water Conductivity	MicroS/cm	1.00	0.25
Outlet Water SiO2	mg/l	0.010	0.010
Outlet water Na	mg/l	0.095	0.024
Outlet Water Alkalinity	meq/l		
Outlet Water pH			8.0
Outlet organics as KMnO4	mg/l		

Resultados del diseño de funcionamiento

Resinas DOWEXS		Columna 1	Columna 3
Parámetros	Unidades	Dowex Marathon C	Dowex Marathon A
Volumen entregado	litros	15	37
Tasa de flujo neto	m ³ /h	0.12	0.12
Rendimiento neto	m ³	20.2	20.2
Caudal bruto	m ³ /h	0.12	0.12
Rendimiento bruto	m ³	20.4	20.4
Tiempo entre dos regeneraciones	horas	168	168
Capacidad de operación	meq/l	297	144
Carga iónica	eq	4.07	4.42
Forma iónica de entrega		Hidrogeno	Hidrogeno
Carga orgánica KMnO ₄	g/l		
Carga de Sílice como SiO ₂	g/l		0.011
Regenerante químico		HCl	NaOH
Dosis de regenerante	g/l	50	50
Cantidad química	kg	0.69	1.53
Relación de regenerante sobre estequiometría	%	461	867
Sistema de regeneración		Lecho empacado	Lecho empacado

Resultados del diseño mecánico

Resinas DOWEXS		Columna 1	Columna 3
Parámetros	Unidades	Dowex Marathon C	Dowex Marathon A
Volumen entregado	litros	15	37
Diámetro de la columna	mm	150	250
Área interna de la columna	m ²	0.015	0.044
Altura de la resina como fue entregada	mm	990	827
Altura de la resina regenerada	mm	990	827
Altura de la resina agotada	mm	940	785
Capa superior de resina inerte		IF-59	IF-59
Altura de resina inerte	mm	150	150
Volumen de resina inerte	litros	2.24	6.67
Altura de la columna cilíndrica	mm	1200	1050
Altura libre (forma hinchada de la resina)	mm	60	73
Velocidad lineal	m/h	8.1	2.72
Caída de presión a 25°C	kPa	5.02	1.65
Carga de material filtrado	Kg/m ²	0.2	

Hoja de flujo de regeneración

Hoja de flujo de regeneración						
Parámetros		m ³ /h	m/h	minutos	Agua	m ³
Inyección de HCl	3.71%	0.075	5	14.8	Desmineralizada	0.018
Desplazamiento ácido	2.50 Bv	0.047	3.17	43.3	Desmineralizada	0.034
Inyección de NaOH a 25°C	2.50%	0.18	4	20.7	Desmineralizada	0.061
Desplazamiento de NaOH	2.50 Bv	0.14	3.1	33.4	Desmineralizada	0.077

Resumen de la regeneración y balance de H/OH

Tiempo de regeneración	Unidades		Agua de servicio	Unidades	
Tiempo de regeneración Catiónico	mn	58.1	Agua desmineralizada	m ³	0.19
Tiempo de regeneración Aniónico	mn	54.1	Agua sin cationes	m ³	
Recirculación de la solución de enjuague	mn	30	Agua cruda filtrada	m ³	
Tiempo de regeneración total	horas	1.5	Total de agua	m ³	0.19
Intercambiadores Catiónicos			Intercambiadores Aniónicos		
Salinidad	eq	4.07	Salinidad aniónica	eq	4.41
Cantidad de ácido usado	eq	18.8	Cantidad de NaOH usada	eq	38.3
Exceso de iones H ⁺	eq	14.7	Alcalinidad de exceso	eq	35.1
Consumo de HCl al 10%	litros	6.59	Consumo de NaOH al 10%	litros	13.8
Cantidad de HCl a neutro	litros 10 %	7.09	Cantidad de NaOH para la neutralidad	litros 10%	

Calidad de salida del agua residual

Composición estimada del agua residual	
	Unidades
Volumen bajo	0.2 m ³
Calcio	19 mg/l
Magnesio	3 mg/l
Sodio	4.734 mg/l
Potasio	627 mg/l
Cloro	3889 mg/l
Nitrato	0 mg/l
Sulfato	16 mg/l
Ácido libre (H)	0 meq/l
Alcalinidad libre (+)	107.4 meq/l