

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Remoción de dureza del agua mediante resinas catiónicas para el uso industrial y consumo humano. Una revisión

Por:

Marcos Ronaldo Guillen Choque

Mary Yudith Cañazaca Mamani

Asesor:

Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, agosto de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

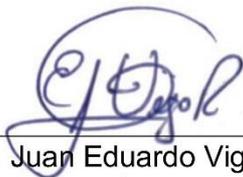
Juan Eduardo Vigo Rivera, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: “REMOCIÓN DE DUREZA DEL AGUA MEDIANTE RESINAS CATIÓNICAS PARA EL USO INDUSTRIAL Y CONSUMO HUMANO. UNA REVISIÓN” constituye la memoria que presentan los estudiantes Marcos Ronaldo Guillen Choque y Mary Yudith Cañazaca Mamani para aspirar al grado de bachiller en Ingeniería Ambiental, ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este trabajo de investigación son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 15 días del mes de septiembre del año 2020



Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Puno, Juliaca, Villa Chullungani, a 04 día(s) del mes de agosto del año 2020 siendo las 14:30 horas

se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca bajo la dirección del

presidente(a) *Msc. Rose Adelina Gallata Chura*

secretario(a) *Msc. Joel Gallo Gallo* y los demás miembros

Msc. Renato Abalinas Mena

y el/la asesor(a) *Ing. Juan Eduardo Yigo Rivera*

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de

investigación titulado *Remoción de dureza del agua mediante resinas catiónicas para el uso industrial y consumo humano. Una revisión*

de los (las) egresados (as): a) *Marcos Ronaldo Guillen Lhoque*

b) *Mary Judith Llanazaca Mamani*

conduciente a la obtención del grado académico de Bachiller en

Ingeniería Ambiental
(Determinación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando a los candidatos a hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por los candidato(a)s. Luego se produjo un cese para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): *Marcos Ronaldo Guillen Lhoque*

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<i>Aprobado</i>	<i>16</i>	<i>B</i>	<i>Buena</i>	<i>Muy Buena</i>

Candidato/a (b): *Mary Judith Llanazaca Mamani*

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<i>Aprobado</i>	<i>16</i>	<i>B</i>	<i>Buena</i>	<i>Muy Buena</i>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó a los candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

[Firma]
Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Remoción de dureza del agua mediante resinas catiónicas para el uso industrial y consumo humano. Una revisión

Removal of hardness from water using cationic resins for industrial use and human consumption. A review

Marcos Ronaldo Guillen Choque ^{a1}, Mary Yudith Cañazaca Mamani ^a, Juan Eduardo Vigo Rivera ^a

^a Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión

Resumen

Las sales como el calcio y magnesio son la principal causa de la dureza del agua; los problemas en las industrias que comúnmente ocasiona la dureza son las incrustaciones en los sistemas de agua, equipos, calderas, etc., mientras que en los hogares los problemas se presentan en la preparación de alimentos, uso de jabones, entre otros, además hay evidencias que demuestran que la dureza es causante de problemas cardiovasculares, litiasis urinaria y otras enfermedades. El objetivo del presente estudio es realizar una revisión bibliográfica sobre la remoción de la dureza del agua utilizando resinas de intercambio catiónico para el uso industrial y consumo humano. Por lo tanto, para remover estas sales se utiliza resinas sintéticas de intercambio iónico que son colocadas en sistemas ablandadores de agua, sin embargo para uso industrial que requieren aguas con calidades superiores usan varios sistemas ablandadores con diferentes tipos de resinas, en cambio para el consumo humano solo se utiliza un sistema ablandador con resinas catiónicas, esto es suficiente para que las aguas se encuentren dentro de los niveles de dureza aceptable.

Palabras clave: Resinas de intercambio catiónico; remoción de dureza; incrustaciones; sistema ablandador

Abstract

Salts like calcium and magnesium are the main cause of water hardness; The problems in industries that commonly cause hardness are incrustations in water systems, equipment, boilers, etc., while in homes the problems occur in food preparation, use of soaps, among others, there are also evidence that shows that hardness is the cause of cardiovascular problems, urinary stones and other diseases. The objective of the present study is to carry out a bibliographic review on the removal of hardness from water using cation exchange resins for industrial use and human consumption. Therefore, to remove these salts, synthetic ion exchange resins are used that are placed in water softening systems, however for industrial use that require higher quality waters they use several softening systems with different types of resins, instead for Human consumption only uses a softener system with cationic resins, this is enough for the waters to be within acceptable hardness levels.

Keywords: Cation exchange resins; hardness removal; scale; softener system

1. Introducción

La dureza se relaciona con la cantidad de cationes metálicos, excepto metales alcalinos, que están presentes en el agua y que pueden existir como carbonatos o bicarbonatos, entre estos están el calcio, magnesio, hierro, bario y estroncio (Millán *et al.*, 2003). Por lo general, la concentración de iones calcio y magnesio son mucho mayores que los demás cationes (Soto, 2010). La dureza, a pesar de su importancia, no se considera como un problema, pero para las industrias la importancia radica en el uso de aguas con calidades superiores a las normales, ya que el exceso de sales u otras sustancias insolubles producen incrustaciones, constituyendo un problema para los equipos como calderas, intercambiadores de calor, sistemas de distribución de agua, etc., asimismo, los problemas ocasionados por dureza en los hogares se encuentra en el consumo, por ejemplo: las aguas duras tienden a ser de sabor poco agradable, dificulta una buena cocción de los alimentos, impide la formación de espuma con jabones, obligando a usar mayor cantidad del producto, entre otros problemas (Millán *et al.*, 2003; Rodríguez Zamora, 2009).

¹ Marcos Ronaldo Guillen Choque:
Km. 2 Salida Arequipa, Chullunquiiani, Juliaca
Tel.: +51-930-584022
E-mail: marcosgc58@gmail.com

Dicho esto, para el tratamiento, primero el agua debe ser caracterizada antes de ser utilizada en procesos determinados con el fin de determinar la concentración de dureza y ver si se encuentra en los niveles aceptables o no, y posteriormente decidir realizar un proceso de remoción de la dureza o ablandamiento del agua. En la actualidad existe varias alternativas para la remoción de la dureza; entre los más conocidos está el uso de materiales adsorbentes como las resinas sintéticas de intercambio iónico, el proceso consiste en que las resinas intercambian sus iones por los iones de agua, posteriormente estos iones se eliminan cuando se somete a una regeneración con productos químicos, permitiendo así la recuperación de las características iniciales de la resina (Cabezas Oruna, 2016).

Existen varias investigaciones sobre el uso de resinas de intercambio iónico para la remoción de sales minerales u otros componentes, una de estas investigaciones a destacar es el estudio realizado por Duarte Valencia & Vizcaíno Sánchez (2015), donde compararon la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza del agua. Este estudio conto con 4 fases. En la primera fase diseñaron dos unidades piloto, uno de los prototipos con zeolita natural y el otro con resina de intercambio iónico. En la segunda fase prepararon las muestras de agua a tratar con agua bruta del acueducto de Bogotá, también se impactó con sulfato de hierro para aumentar la concentración de hierro y para impartirle la dureza al agua se utilizó cloruro de calcio. En la tercera fase se procedió a pasar las muestras de agua a través de cada uno de los prototipos y al finalizar cada prueba se regeneró en contra-corriente el material intercambiador con NaCl. En la fase final realizaron los análisis correspondientes para determinar el hierro y la dureza del efluente. Los resultados que obtuvieron fueron: el parámetro de carga no presentó una influencia significativa en la remoción de los iones, la resina presentó una mayor afinidad de remoción con los iones contaminantes en comparación a la zeolita y por último, apreciaron que el tiempo de agotamiento de la zeolita es más corto que la resina, entonces, los costos de regeneración de la zeolita son mayores.

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue realizar una revisión bibliográfica sobre la remoción de la dureza del agua utilizando resinas de intercambio catiónico para el uso industrial y consumo humano.

2. Revisión

2.1 Dureza del agua

Un agua dura es la que contiene altos niveles de minerales y otros compuestos con cantidades variables, generalmente sales de calcio y magnesio, que son los causantes principales de la dureza, el grado de dureza es directamente proporcional a la concentración de estas sales, que es expresado como carbonato de calcio, CaCO_3 (Rodríguez Zamora, 2009). La dureza puede ser temporal o permanente según los aniones asociados a los cationes causantes de la dureza; la dureza temporal o dureza de carbonatos se refiere al contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio que puede ser removida por ebullición del agua o eliminación por filtración; mientras que la dureza permanente o dureza de no carbonatos se refiere a la dureza que permanece en el agua después de la ebullición, esto incluye a los cloruros, sulfatos y nitratos de calcio y magnesio (Soto, 2010). Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica el agua según su grado de dureza, con el objetivo de establecer rangos de referencia para el uso y consumo humano del agua, como se aprecia en la Tabla 1.

Tabla 1

Clasificación del agua según el grado de dureza

Concentración de CaCO_3 (mg/L)	Tipo de agua
0 - 60	Blanda
61 - 120	Moderadamente dura
121 - 180	Dura
>180	Muy dura

Fuente: (WHO, 2004).

2.2 Impactos en el consumo humano

2.2.1 Impactos de las aguas duras

Cuando las aguas son duras uno de los efectos que frecuentemente se puede evidenciar es, en el uso de jabón; cuando el jabón entra en contacto con aguas duras se forman precipitados debido a la presencia de calcio, magnesio y hierro, los iones de esta agua se unen con los iones disueltos del jabón para formar sales insolubles, este proceso gasta el jabón impidiendo la formación de espuma y produce un sólido grumoso indeseable, además, estas sales insolubles se colocan en los tejidos de la ropa, produciendo manchas difíciles de quitar, también empeora las características de las bebidas y casi siempre los consumidores reportan un sabor desagradable (Rodríguez Zamora, 2009; Soto, 2010).

Por otro lado, cuando los alimentos son preparados con aguas duras, se produce una capa en la superficie de un recipiente, el cual impide una buena cocción de los alimentos y ocasiona también que pierda gran parte de las sustancias aromáticas de los alimentos (debido a la unión con el carbonato de calcio) (Neira Gutiérrez, 2006)

Asimismo, un agua con niveles de dureza superior a los 200 mg/L puede ocasionar la aparición de incrustaciones; estas incrustaciones afectan a las redes de distribución de agua de hogares que tengan tuberías de hierro, estas incrustaciones son producidas principalmente por una descomposición térmica de los bicarbonatos de calcio y magnesio solubles en el agua, en donde se elimina el dióxido de carbono y se precipitan los carbonatos que son insolubles, que posteriormente se depositan sobre las superficies de tuberías (WHO, 2011).

2.2.2 Impactos de las aguas blandas

Cuando las agua son blandas, cuya dureza es menor a 100 mg/L, puede tener una capacidad amortiguante inferior a lo normal, sin embargo, es más corrosiva para las tuberías, por lo que ciertos metales pesados como el cobre, zinc, plomo y cadmio pueden estar presentes en el agua potable que se distribuye (WHO, 2011).

Asimismo, para algunos consumidores, el sabor de las aguas muy blandas es desagradable, que se percibe a la de un sabor jabonoso, por eso es esencial que el agua tenga un mínimo contenido de minerales, para que el agua tenga un sabor más agradable y refrescante para el gusto del consumidor (WHO, 2004).

2.2.3 Impactos en la salud

Un gran número de estudios muestran los posibles efectos para la salud de la dureza del agua. La mayoría de ellos han sido estudios epidemiológicos ecológicos y han reportado una relación entre la dureza del agua y la mortalidad por enfermedades cardiovasculares; varios de estos estudios de caso-control muestran una asociación negativa entre la mortalidad cardiovascular y el magnesio del agua. Aunque esta asociación no demuestra necesariamente causalidad, son bien conocidos los efectos del magnesio en la función cardiovascular (WHO, 2009). A continuación se muestra algunas de las enfermedades que tienen mayor relación con la dureza del agua:

- *Enfermedades Cardiovasculares:* los estudios realizados en Finlandia sobre la mortalidad por infarto al miocardio asociado al calcio y magnesio del agua son uno de los casos más destacados en relación a este tipo de enfermedades. En estos estudios tomaron como muestra 19000 casos de fallecimiento por infarto y analizaron 12500 muestras de aguas subterráneas, y los resultados que obtuvieron fueron contundentes, ya que la distribución geográfica de la incidencia de infartos al miocardio no tuvo que ver con el estilo de vida, ni tampoco por factores genéticos, sino que por la alta correlación del calcio y magnesio ($r= 0,85$), es decir que la relación del Ca/Mg fue el indicador que mejor se asoció a la incidencia de infarto al miocardio, además concluyeron que es uno de los índices de mortalidad asociados al calcio y magnesio más altas del mundo (Kousa *et al.*, 2004, 2011). En otro estudio reciente por Leurs *et al.* (2010) en los Países Bajos no encontraron ninguna asociación entre calcio, magnesio y la dureza total del agua con el infarto agudo de miocardio o muertes por enfermedad cardiovascular. Sin embargo, se informó de una asociación inversa (beneficiosa) significativa con magnesio del agua para los hombres en el grupo de mayor exposición, y se observó el efecto contrario para las mujeres. Por lo tanto, se necesita más estudio sobre el tema.
- *Litiasis Urinaria:* Por otro lado, algunos estudios demuestran que existe una relación directa entre la dureza del agua y el desarrollo de litiasis urinaria, un ejemplo es el estudio que se realizó en el estado de Yucatán, México, donde concluyen que la prevalencia de litiasis urinaria es elevada y se incrementa en forma notable con la edad, asimismo, los antecedentes familiares y la dureza extrema (<400 ppm) del agua empleada para consumo humano son factores predisponentes para el desarrollo de la enfermedad. Sin embargo, otros estudios realizados concluyen que la dureza del agua no tiene relación con esta enfermedad, pero conviene señalar que esos estudios que reportan que la dureza del agua no contribuye al desarrollo de la litiasis urinaria se hicieron en comunidades donde la dureza total no superaba las 400 ppm (Medina-Escobedo *et al.*, 2002; Schwartz *et al.*, 2002; Vitoria Miñana, 2002).

Es cierto que hay hallazgos en diferentes países que demuestran la existencia de una relación de la dureza del agua con muchas enfermedades, pero todavía existen grandes dudas para llegar a una contundente conclusión. Para poder explicar las relaciones causales con las enfermedades, también se deberían tomar en cuenta los factores sociales, climatológicos y ambientales, etc.

2.3 Importancia en el uso industrial

Cabezas Oruna (2016), menciona que el agua es esencial en todas las operaciones industriales, pero pocas veces es posible utilizarla directamente como se extrae de un lago, río, pozo u otra fuente de agua. Si el agua no es tratada adecuadamente, las impurezas que contiene a causa de la contaminación natural o artificial pueden dañar considerablemente tanto a los equipos como a los productos. En esta situación el calcio y magnesio son las principales sales que forman incrustaciones en la mayoría de los sistemas que trabajen con agua y casi todos los métodos de tratamiento de agua tienen como principal objetivo evitar o reducir la formación de los depósitos de estas sales.

Los problemas donde la dureza tiene mayor incidencia son:

- *Calderas*: cuando las aguas para las calderas no son tratadas, las superficies de estos sistemas se cubren con incrustaciones de carbonato y sulfato de calcio, que puede estar como depósito suave o como capas duras, en cambio las sales de magnesio, tales como el hidróxido y silicato de magnesio, por lo general forman depósitos suaves y lodo; estos depósitos interfieren gravemente con la transferencia de calor y reducen la eficiencia de los procesos. Si no se evitan o remueven apropiadamente, se producirán fallas frecuentes en la tubería (Millán *et al.*, 2003).
- *Sistemas de enfriamiento abiertos*: en estos sistemas pueden formarse incrustaciones y depósitos debido a la concentración de sólidos disueltos que se producen durante el enfriamiento por evaporación; cuando se sobrepasan los límites de solubilidad, el carbonato de calcio se precipita en la forma de depósitos o lodos, también puede depositarse sulfato de calcio en algunos sistemas abiertos de recirculación, a menos que se ajuste debidamente la purga (Neira Gutiérrez, 2006).
- *Industria petrolera*: Castro Hernandez & Gamez Mejia (2009), señalan que en la industria petrolera las incrustaciones de carbonato de calcio y sulfatos de: calcio, bario y estroncio son las que más preocupan a los productores de petróleo, ya que se depositan en los sistemas de diferentes procesos, también puede producirse corrosión, la cual está muy ligada a la presencia de dióxido de carbono (CO₂).
- *Industria textil*: es este campo que los iones de calcio y magnesio pueden precipitar ciertas anilinas, dando como resultado manchas o estrías en los artículos teñidos, o bien, pueden actuar como mordentes, originando una mayor absorción de la tintura y coloraciones más profundas (Neira Gutiérrez, 2006).

2.4 Resinas de intercambio iónico

Existen varias alternativas para la remoción de la dureza del agua, que van desde una desmineralización total, hasta la desmineralización parcial o ablandamiento, que consiste en remover sólo una parte de los iones causantes de la dureza, hoy en día, se utiliza el intercambio iónico, que se basa en remover de un agua cruda los iones indeseables transfiriéndolos a un material sólido llamado intercambiador iónico, que los acepta cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra en la matriz del intercambiador de iones, actualmente, la gran mayoría de los intercambiadores iónicos son resinas sintéticas en forma de esferas pequeñas, que están fabricados de compuestos polimerizados de poliamina, poliestireno o copolimero estireno-divinilbenceno (Dominguez Hidalgo & Guaman Pérez, 2006; Sánchez, 2015).

Las investigaciones alrededor del intercambio iónico se han centrado en encontrar resinas que intercambien iones con un catión o un anión de manera selectiva, basándose en incorporar a la composición de la resina distintos grupos funcionales que aumenten su selectividad por un determinado ion. Se han desarrollado así nuevas estructuras poliméricas macroporosas, poliácricas, tipo gel, quelantes, etc., dando lugar a una serie de modernas resinas de intercambio iónico cuyo empleo en la industria es enorme (Cabezas Oruna, 2016). La Tabla 2 se muestra las mejores alternativas de resinas catiónicas y aniónicas con sus valores típicos de capacidades de intercambio iónico. La capacidad intercambiadora de las resinas se expresa generalmente en equivalentes por unidad de masa o de volumen de resina (Sánchez, 2015).

Tabla 2

Rangos típicos de capacidad de intercambio iónico para diversos materiales intercambiadores de iones

Material Intercambiador		Capacidad (kg/m ³)	
Catiónicos	Inorgánicos	Naturales	100 - 175
		Sintéticos	420 - 565
	Orgánicos	Carbón sulfonado	175 - 250
		Sintéticos	700 - 1000
Aniónicos	Inorgánicos	Óxidos metálicos	Poco utilizados
	Orgánicos	Resinas sintéticas	350 - 770

Fuente: (Sánchez, 2015).

2.4.1 Tipos de resinas

Las resinas de intercambio iónico se dividen en cuatro categorías primarias según su grupo funcional como se aprecia en la Tabla 2, además, se detalla la selectividad de las resinas, que se define como la afinidad que tiene una resina para un ion particular con respecto a otros iones presentes en la misma solución, estas tienen un orden decreciente (de mayor a menor selectividad) (Avila Reyna, 2014).

Tabla 3

Tipos de resinas de intercambio iónico según su grupo funcional

Tipos de resinas	Grupo Funcional	Descripción	Selectividad de la resinas	Ejemplos de marcas comerciales
Catiónica de ácido fuerte	Ácido sulfónico, $-\text{SO}_3^- \text{H}^+$	En forma sódica, quitan la dureza (esencialmente calcio y magnesio) del agua y de otras soluciones. En hidrogenada, quitan todos los cationes y también se utilizan como catalizadores ácidos.	$\text{Ag}^+, \text{Pb}^{++}, \text{Hg}^{++}, \text{Ca}^{++}, \text{Cu}^{++}, \text{Ni}^{++}, \text{Cd}^{++}, \text{Zn}^{++}, \text{Fe}^{++}, \text{Mg}^{++}, \text{K}^+, \text{Na}^+, \text{H}^+$	Amberjet™ 1000 Na Dowex™ Marathon C Lewatit™ Monoplus S100
Catiónica de ácido débil	Ácido carboxílico, $-\text{COOH}$	En forma hidrogenada, quitan iones preferentemente bivalentes (calcio y magnesio) de las soluciones que presentan alcalinidad.	$\text{H}^+, \text{Cu}^{++}, \text{Ca}^{++}, \text{Mg}^{++}, \text{K}^+, \text{Na}^+$	Amberjet™ IRC86 Dowex™ MAC3 Lewatit™ CNP80
Aniónica de base fuerte	Amonio cuaternario, $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+ \text{OH}^-$	En forma oxhidrilo, quitan todos los aniones. En forma de cloruro, quitan nitratos, sulfatos y otros iones.	$\text{CO}_3^-, \text{SiO}_3^-, \text{I}^-, \text{HSO}_4^-, \text{NO}_3^-, \text{Br}^-, \text{HSO}_3^-, \text{NO}_2^-, \text{Cl}^-, \text{HCO}_3^-, \text{F}^-$	Amberjet™ 4200 Cl Dowex™ Marathon A Lewatit™ Monoplus M500
Aniónica de base débil	Aminas, $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$	Después del intercambio catiónico, quitan cloruros, sulfatos, nitratos, y otros aniones de ácidos fuertes, pero no quitan ácidos débiles (SiO_2 y CO_2).	$\text{SO}_4^-, \text{CRO}_4^-, \text{NO}_3^-, \text{I}^-, \text{Br}^-, \text{Cl}^-, \text{F}^-$	Amberjet™ IRA96 Dowex™ Marathon MWA Lewatit™ Monoplus MP64

Fuente: (Avila Reyna, 2014).

2.4.2 Características de las resinas

Las resinas sintéticas se comercializan generalmente como esferas o gránulos de determinados tamaño y distribución granulométrica, adaptados a las diferentes necesidades de aplicación específicas; para la mayoría de las aplicaciones, las resinas se presentan con una distribución normal de tamaños de partículas, que están comprendidos entre 0,04 y 1,2 mm, o también como partículas de tamaño uniforme. Al microscopio, las resinas presentan los aspectos típicos de la Figura 1.

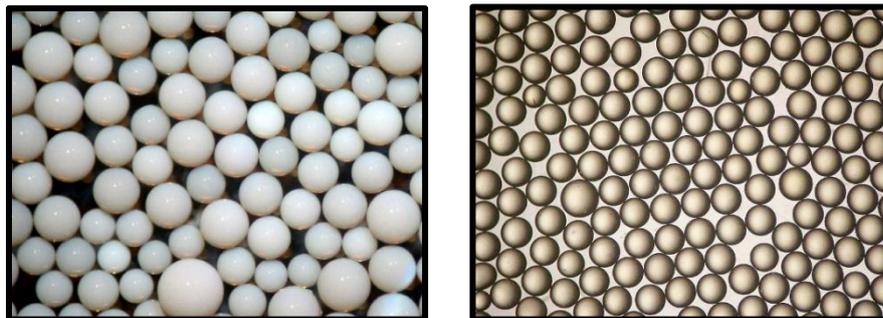


Figura 1. Aspecto microscópico de las resinas de intercambio iónico. Izquierda: resinas con distribución normal de tamaños de partículas (Amberlite 252); derecha: resinas de tamaño uniforme (Dowex Marathon C).

Fuente: (http://dardel.info/IX/resin_pictures.html)

Avila Reyna (2014), señala que los fabricantes de resinas generalmente proporcionan tres parámetros específicos relacionados con el tamaño de las resinas: el tamaño efectivo de la partícula, el rango de tamaños de partícula y el coeficiente de uniformidad; el tamaño de las partículas de resina establece varios aspectos operativos, además del rendimiento que se alcanza durante el intercambio iónico, y dos situaciones se destacan principalmente:

- Al aumentar el tamaño de las partículas de resina la tasa de intercambio iónico se reduce.
- La pérdida de carga a lo largo del lecho de resinas se incrementa al reducirse el tamaño de las partículas de resina.

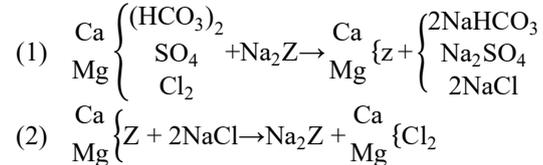
Si se llega a darse una de estas condiciones pueden provocar una ruptura. Por eso es necesario tomar en cuenta estas dos condiciones para determinar el tamaño adecuado de las partículas de resina para una columna y un sistema hidráulico dado, estos datos de tamaños y distribución granulométrica de las resinas, así como los otros parámetros característicos, tales como el índice de poros o la densidad, siempre son proporcionados por los fabricantes en las hojas de información del producto (Avila Reyna, 2014).

2.5 Aplicación de resinas para la remoción de dureza

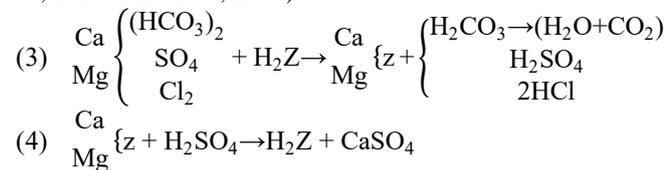
2.5.1 Procesos

Para la remoción de la dureza o ablandamiento del agua del agua existen 3 procedimientos principales, basados en la utilización de determinados tipos de resinas y compuestos regenerantes, y cuya aplicación depende principalmente del nivel al que se quiera reducir la dureza.

- a) *Ciclo del sodio*: cuando se usa una resina catiónica en forma de ciclo sodio (NaZ, "Z" representa al intercambiador), se elimina el calcio y el magnesio, así como cualquier otro catión con afinidad al sodio, cuando el agua que fluye por un lecho con este tipo de resinas se tiene como producto agua blanda, tal como se presenta en la reacción (1). Durante el proceso de ablandamiento la resina cede sodio a cambio de calcio y magnesio hasta que se agota la capacidad de intercambio, por eso se procede a realizar la regeneración empleando una solución con elevada concentración de sodio, normalmente una solución de salmuera, el cual se representa en la reacción (2) (Cabezas Oruna, 2016; Neira Gutiérrez, 2006).



- b) *Ciclo del hidrogeno*: en el ciclo del hidrogeno, los cationes causantes de la dureza son reemplazados por iones de hidrógeno, convirtiendo todas las sales en ácidos, es decir que los bicarbonatos, sulfatos y cloruros se transforman en ácido carbónico, sulfúrico y clorhídrico respectivamente, el cual se representa en la reacción (3). Para la regeneración se utiliza compuestos ácidos, como el ácido sulfúrico, y se representa en la reacción (4), por lo que sistema intercambiador, tuberías y válvulas deben ser protegidos o estar compuestos de materiales que sean resistentes a la corrosión (Neira Gutiérrez, 2006; Torre Sifuentes, 2004).



- c) *Desmineralización*: para la desmineralización se requiere del uso de resinas catiónicas y aniónicas colocadas en columnas en serie o en una sola columna de lecho mixto. Inicialmente, los iones causantes de la dureza del agua son removidos por un intercambiador de ciclo del sodio o de hidrógeno y posteriormente los aniones asociados a ellos son removidos por resinas aniónicas, obteniendo aguas ultrapuras con calidades superiores requeridas por las industrias (Sánchez, 2015).

2.5.2 Uso industrial

La aplicación de resinas de intercambio iónico para la remoción de la dureza del agua en las los procesos industriales mayormente se da para la obtención de aguas que deben estar exenta de iones. Algunas industrias que disponen de agua de río, pozo o alguna fuente de agua que típicamente tienen gran concentración de sales. Dicho esto Cabezas Oruna (2016), recomienda usar sistemas ablandadores con dos columnas de intercambio iónico, contenidas con una resina catiónica fuerte y otra con resina aniónica fuerte, esta se aplica para instalaciones de baja inversión, el cual es suficiente para los procesos de las industrias. Pero si el agua tiene alta alcalinidad y dureza se recomienda instalar una columna con resina catiónica débil antes de la resina catiónica fuerte. Según sea la composición del agua o necesidades de las industrias pueden emplearse las cuatro resinas, en columnas independientes o dobles. Pero cuando las industrias requieran calidades superiores de agua se utiliza un lecho mixto donde las resinas aniónicas y catiónicas, ambas resinas, van mezcladas en una columna, actuando como pulido final.

2.5.3 Consumo humano

Para el consumo humano recomiendan usar columnas de intercambio iónico con resinas catiónica fuertemente acida, ya que es suficiente para poder remover los iones calcio y magnesio, que son los principales causantes de la dureza del agua y sus problemas que conlleva; aunque la OMS no propone ningún valor de referencia basado en la salud para la dureza en el agua como bebida, es necesario seguir las recomendaciones de ingesta y objetivos nutricionales de un especialista en nutrición, ya que el calcio y magnesio no solo se encuentra en el agua sino también en otros alimentos como los lácteos, el exceso de ingesta de estas sales podría ser una predisposición para una enfermedad (Martínez-Ferrer *et al.*, 2008; Neira Gutiérrez, 2006).

2.6 Diseño de un sistema ablandador de agua

Los sistemas de intercambio iónico se diseñan generalmente bajo la configuración de lecho, fijo o móvil, contenido en un depósito adecuadamente acondicionado para ayudar la circulación del agua en su interior. Estos sistemas intercambiadores tienen una o varias columnas cilíndricas cerradas, en cuyo interior la resina entra en contacto con el agua a tratar y la solución regenerante (Sánchez, 2015).

Normalmente, la columna no se rellena en su totalidad con la resina, sino que se deja suficiente espacio libre sobre el lecho para permitir su expansión, dependiendo del tipo de resina, esta puede variar entre el 30% y 100% del volumen del lecho compactado. Cuando el agua de alimentación y las soluciones regenerantes ingresan por la parte superior de la columna, esta se distribuye uniformemente dentro del lecho en toda la sección de la columna, luego el agua tratada se recoge por la parte inferior mediante un sistema de drenaje, además, este sistema dispone de los circuitos, válvulas y bombas adecuados para el correcto funcionamiento del ciclo de operación-regeneración de la resina (Degremont, 2002). La Figura 2 muestra el esquema simplificado de una columna de intercambio iónico.

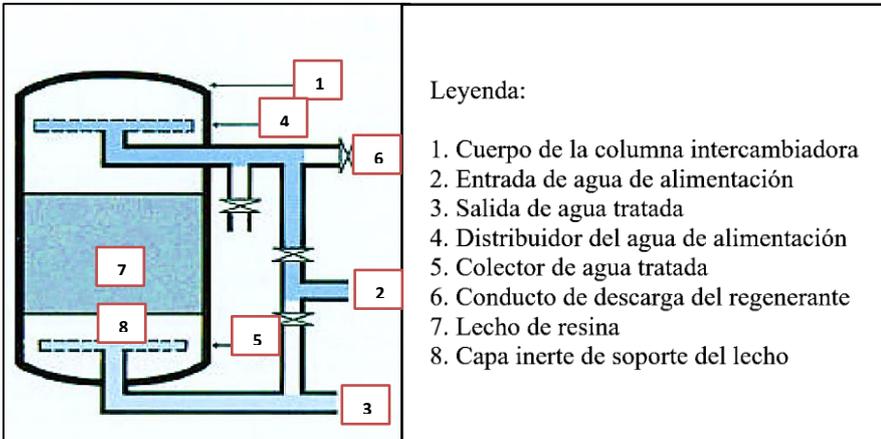


Figura 2. Esquema general de una columna de intercambio iónico con lecho fijo.

Fuente: (Degremont, 2002).

2.7 Criterios de diseño

El objetivo del diseño de un sistema de intercambio iónico es el de asegurar producción de agua en calidad y cantidad, con los menores costos de inversión y el menor consumo posible de reactivos regenerantes. Un diseño óptimo del sistema depende de la elección adecuada de múltiples parámetros, que se describen a continuación, donde Agamez Salvador (2014) desarrolló un procedimiento para diseñar un equipo de intercambio iónico, como se muestra en la Figura 3.

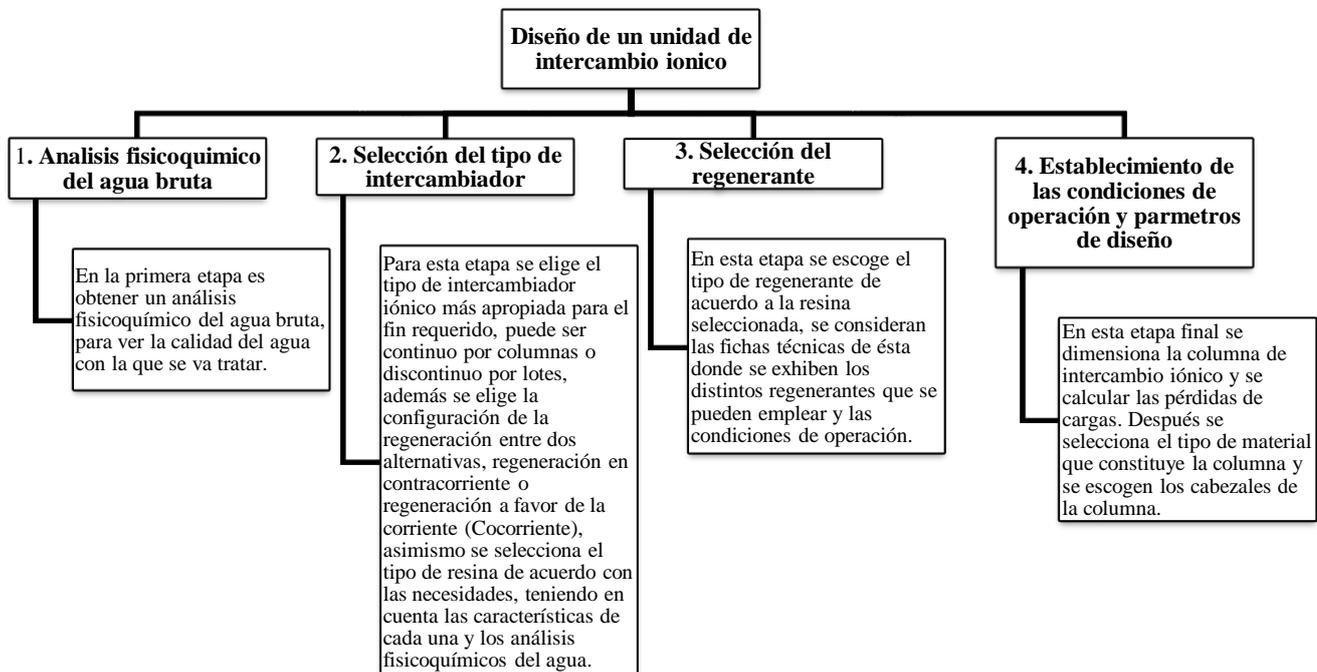


Figura 3. Procedimiento para montar y diseñar un equipo de intercambio iónico.

Fuente: (Agamez Salvador, 2014).

2.8 Mercado actual de las resinas

El mercado de las resinas de intercambio estaba dominado durante muchos años por Rhom and Hass, prácticamente desde la aparición de este material, dando paso a que muchas empresas se sumaran a la fabricación de resinas con mayor variedad de aplicaciones según los requisitos y necesidades que se tengan; actualmente la compañía DOW Chemical y sus marcas Amberjet, Amberlite, Amberlyst, Amberchrom, Amberzyme y Dowex es uno de los principales fabricantes de resinas que lideran el mercado de muchos países del mundo, otro de los fabricantes es Lanxess y sus marcas Duolite, Imac y Lewatit, y finalmente está la compañía de Lenntech que se ha centrado principalmente en la diseños estándares y personalizados de sistemas de tratamiento de aguas tanto para los procesos industriales y uso doméstico (Avila Reyna, 2014). En la Figura 3 se aprecia diseños de sistemas de ablandamiento de agua, para uso industrial y doméstico.



Figura 3. Sistemas de ablandamiento de agua. Izquierda: ablandador doméstico (LT compact series); derecha: ablandador para uso industrial (LT twin series – Fleck 9000).

Fuente: (<https://www.lenntech.com/processes/softening/softeners/softeners.htm>).

3. Conclusiones

Por tanto se concluye que para la remoción de dureza del agua, actualmente el uso de sistemas ablandadores con resinas sintéticas de intercambio iónico es la mejor alternativa, ya que los estudios demuestran que tiene gran capacidad de remoción de dureza y tiene bajo costo de inversión. Para los procesos industriales que requieren calidades superiores a las normales se recomienda utilizar varios sistemas ablandadores contenidas de resinas catiónicas y resinas aniónicas, en cambio para el consumo humano es recomendable usar solo un sistema ablandador contenidas de resinas catiónicas, siendo esto suficiente para remover los iones causantes de la dureza y esté dentro de los niveles de dureza aceptable.

Referencias

- Agamez Salvador, C. I. (2014). *Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Malagana (Bolívar) (Tesis de grado)*. Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Avila Reyna, B. (2014). *El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico*. Instituto Politécnico Nacional.
- Cabezas Oruna, J. (2016). Obtención de agua ultrapura en la industria mediante intercambio iónico. *Paradigmas*, 4(1), 59–70. <https://doi.org/10.31381/paradigmas.v4i1.553>
- Castro Hernandez, H. F., & Gamez Mejía, C. J. (2009). *Evaluación de la depositación de incrustaciones en sistemas de bombeo electrosumergible del campo Cantagallo* [Universidad Industrial de Santander]. <https://doi.org/10.1128/AAC.03728-14>
- Degremont. (2002). *Memento Technique De L'eau*. Tec et Doc Lavoisier.
- Dominguez Hidalgo, F., & Guaman Pérez, M. V. (2006). *Diseño y construcción de un desmineralizador de lecho múltiple (Tesis de grado)* [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/746/1/976.pdf>
- Duarte Valencia, E. A., & Vizcaíno Sánchez, C. M. (2015). *Estudio comparativo entre la implementación de la zeolita y la resina de intercambio iónico en la remoción de hierro y dureza en un agua sintética que simula el agua para uso industrial (Tesis de grado)*. Universidad de La Salle.
- Kousa, A., Loukola-Ruskeeniemi, K., Nikkarinen, M., Havulinna, A. S., Karvonen, M., Moltchanova, E., Sorvari, J., Lehtinen, H., Rossi, E., Ruskeeniemi, T., Backman, B., Mäkelä-Kurtto, R., Kantola, M., Hatakka, T., & Savolainen, H. (2011). Evaluation of the relationship between the natural geological environment and certain chronic diseases in Finland. *Geoscience for Society*, 2011, 247–262.
- Kousa, A., Moltchanova, E., Viik-Kajander, M., Rytönen, M., Tuomilehto, J., Tarvainen, T., & Karvonen, M. (2004). Geochemistry of ground water and the incidence of acute myocardial infarction in Finland. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 58(2), 136–139. <https://doi.org/10.1136/jech.58.2.136>
- Leurs, L. J., Schouten, L. J., Mons, M. N., Goldbohm, R. A., & Van Den Brandt, P. A. (2010). Relationship between tap water hardness, magnesium, and calcium concentration and mortality due to ischemic heart disease or stroke in the Netherlands.

- Environmental Health Perspectives*, 118(3), 414–420. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900782>
- Martínez-Ferrer, Á., Peris, P., Reyes, R., & Guañabens, N. (2008). Aporte de calcio, magnesio y sodio a través del agua embotellada y de las aguas de consumo público: implicaciones para la salud. *Medicina Clínica*, 131(17), 641–646. <https://doi.org/10.1157/13128721>
- Medina-Escobedo, M., Zaidi, M., Real-de León, E., & Orozco-Rivadeneira, S. (2002). Prevalencia y factores de riesgo en Yucatán, México, para litiasis urinaria. *Salud Pública de México*, 44(6), 541–545. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342002000600006>
- Millán, F., Mathison, J., Alvares, M., & Jarbough, W. (2003). Estudio comparativo de la dureza del agua en el estado Mérida y algunas localidades del centro y occidente de Venezuela. *Ciencia e Ingeniería*, 24(1), 39–46. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/366/376>
- Neira Gutiérrez, M. A. (2006). *Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile (Tesis de grado)*. Universidad de Chile.
- Rodríguez Zamora, J. (2009). Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre. *Pensamiento Actual*, 9(12), 125–134.
- Sánchez, C. (2015). *Intercambio iónico (FT-TER-006)* (p. 30). <https://www.wateractionplan.com/documents/186210/200858/FT-TER-006-INTERCAMBIO+IONICO+A201515.pdf/7ad263b8-d51c-44b3-a366-9598794c596e>
- Schwartz, B. F., Schenkman, N. S., Bruce, J. E., Leslie, S. W., & Stoller, M. L. (2002). Calcium nephrolithiasis: effect of water hardness on urinary electrolytes. *Urology*, 60(1), 23–27. [https://doi.org/10.1016/S0090-4295\(02\)01631-X](https://doi.org/10.1016/S0090-4295(02)01631-X)
- Soto, J. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XI, 167–177. https://www.ecured.cu/Agua_dura
- Torre Sifuentes, G. G. (2004). *Solución de problemas en la producción de agua desmineralizada por intercambio iónico (Tesis de grado)*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Vitoria Miñana, I. (2002). Calcio en el agua de bebida en la Infancia ¿molesto o necesario? *Acta Pediatr. Esp*, 3, 99–109.
- WHO. (2004). Guidelines for Drinking-water Quality. In *World Health Organization* (3rd ed., Vol. 1).
- WHO. (2009). Calcium and magnesium in drinking-water : public health significance. In *World Health Organization*. http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43836/9789241563550_eng.pdf;jsessionid=D351ABBE791C3A84AAF8C2BD7DD12C2D?sequence=1
- WHO. (2011). Hardness in drinking-water. Background document for preparation of WHO Guidelines for drinking-water quality. In *World Health Organization*. (WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1).