

INTERCAMBIADORES IÓNICOS DEL AGUA

ANETH MARCELA AGUILAR VAZQUEZ
Código: 1064108610

Presentado a:

ING. JULIO ISAAC MALDONADO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
DIPLOMADO EN POTABILIZACIÓN DE AGUAS
PAMPLONA, 2016

CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRAC	6
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO 1.....	9
RESEÑA HISTÓRICA DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS DEL AGUA.....	9
Aspectos importantes del agua y sus contaminantes	9
Historia de los intercambiadores iónicos como medida principal para descontaminar el agua	10
CAPÍTULO 2.....	14
ADSORCIÓN Y SUSTANCIAS DE ADSORCIÓN EN INTERCAMBIADORES IÓNICOS	14
Sustancias de adsorción en intercambiadores iónicos	15
CAPÍTULO 3.....	17
FUNDAMENTOS IMPORTANTES DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS.....	17
Funciones de los intercambiadores iónicos	20
Características de los intercambiadores iónicos	22
¿Cómo se trabaja con los intercambiadores iónicos?	23
Aplicaciones en discontinuo de resinas de intercambio	24
CAPITULO 4.....	25
ASPECTO LEGAL.....	25
CAPÍTULO 5.....	31
DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS	31
CAPÍTULO 6.....	38
PROYECCIÓN DE UN DISEÑO A ESCALA REAL DE INTERCAMBIADOR IÓNICO ..	38
Algunos principios de diseño	38
CAPÍTULO 7.....	54

IMPACTO DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS SOBRE EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA	54
Los intercambiadores iónicos ante el proceso de potabilización del agua	54
Intercambiadores iónicos ante calidad del agua	61
CAPÍTULO 8.....	65
COMERCIO DE INTERCAMBIADORES IÓNICOS EN COLOMBIA.....	65
COSTOS ASOCIADOS A LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS.....	78
CAPÍTULO 9.....	80
FUTURO PROSPECTIVO DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS.....	80
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Sustancias de adsorción en intercambiadores iónicos	16
Ilustración 2 Intercambiador iónico de agua	20
Ilustración 3 Diseño de esquema de intercambiador iónico	21
Ilustración 4 Intercambio Iónico – Electrodesionización (EDI)	33
Ilustración 5 Diseño de intercambiador iónico con resina	34
Ilustración 6 Desionización de Dos Camas	36
Ilustración 7 Desionización de Cama Mixta	36
Ilustración 8 Parámetros importante al momento de analizar el agua	39
Ilustración 9 Planos del diseño	44
Ilustración 10 Modelo de columnas	47
Ilustración 11 Esquema IXCalcTM	51
Ilustración 12 Potabilización del agua a través de intercambiadores iónicos	60
Ilustración 13 Planta en filtros	65
Ilustración 14 Planta procesadora de agua	72
Ilustración 15 Equipos de desmineralización en acero inoxidable	75
Ilustración 16 Equipo para tratamiento de agua	77
Ilustración 17 Lista de precios	79

RESUMEN

La presente monografía es de vital importancia, especialmente dentro del diplomado de potabilización de aguas, puesto que permite investigar e indagar bibliográficamente o teóricamente todo lo relacionado con los intercambiadores iónicos, teniendo en cuenta que estos son intercambios de iones entre dos electrolitos o entre una disolución de electrolitos y un complejo. En la mayoría de los casos se utiliza el término para referirse a procesos de purificación, separación, y descontaminación de disoluciones que contienen dichos iones, empleando para ello sólidos poliméricos o minerales dentro de dispositivos llamados intercambiadores de iones. La investigación, para el desarrollo y complemento de la presente monografía fue mediante el método bibliográfico, es bibliográfico porque se consultaron una serie de documentos tales como libros revistas, diccionario y otros documentos así como información de internet relacionado con el tema de investigación con el fin de sustentar la base teórica del estudio, el cual tiene como objetivo elaborar una reseña histórica de los intercambiadores iónicos del agua teniendo en cuenta el pasado, presente y futuro, así como la forma en que estos han ido avanzado de la mano con el desarrollo científico y tecnológico. Como conclusión se encontró que los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga, conocidas como iones. Estos iones están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas, y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y calefacción. Generación de vapor, y manufactura.

ABSTRAC

This monograph is of vital importance, especially in the graduate water purification, since it allows to investigate and inquire Bibliographically or theoretically everything related to ion exchangers, considering that these are ion exchange between two electrolytes or between a solution electrolyte and complex. In most cases the term is used to refer to processes of purification, separation, and decontaminating solutions containing such ions, employing solid polymeric or mineral within devices called ion exchangers. Research, development and complement this monograph was through literature method, it is bibliographic because a number of documents such as magazines, books, dictionary and other documents as well as internet information related to the topic of research in order consulted to sustain the theoretical basis of the study, which aims to develop a historical overview of ion exchangers water considering the past, present and future, and how these have been advanced hand in hand with scientific development and technology. In conclusion it was found that natural water supplies contain dissolved salts, which dissociate in water to form charged particles, known as ions. These ions are generally present in relatively low concentrations, and allow water to conduct electricity. Sometimes they are known as electrolytes. These ionic impurities can cause problems in cooling and heating systems. Steam generation and manufacturing.

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que el agua a pesar de venir de yacimientos naturales y ser de vital importancia en la vida de cualquier ser vivo: plantas, animales y humanos, esta no es pura del todo, pues dentro de sus propiedades químicas posee impurezas que de una u otra forma necesitan ser eliminadas de la misma para que se pueda convertir en un recurso básico para el consumo humano.

De las impurezas más comunes presentes en un agua se encuentran los iones o sales disueltas, las cuales son necesarias en determinadas concentraciones para el agua de consumo. Algunos dividen el agua para su estudio entre duras y blandas “Existe discrepancia de opinión de que el agua dura sea o no un riesgo para la salud, pero lo que sí es seguro es que es una molestia a causa de su tendencia a acumular minerales en las tuberías domiciliarias y su pobre rendimiento con el jabón o detergentes en comparación con agua blanda” Márquez, (2015).

Siglos atrás la humanidad no necesitaba purificar el agua, esta era extraída o tomada directamente de pozos, yacimientos, lagunas y ríos, no habían problemas de contaminación ambiental, así que las personas no se preocupaban por consumirla directamente sin perjuicios; sin embargo, con la Revolución Industrial y el desarrollo científico y tecnológico el medio ambiente empezó a sufrir cambios dramáticos, los recursos naturales, entre ellos el agua, empezaron a sufrir cambios drásticos a tal extremo que empezaron a sufrir de contaminación. A partir de estos hechos se empezó a estudiar y analizar los contaminantes del agua que empiezan a repercutir en la salud

humana. Fue así como poco a poco empezaron a surgir diversos métodos para tratar y purificar el agua, empezándose a estudiar profundamente los inconvenientes antes expuestos, obteniéndose avances en las tecnologías de tratamiento un agua sin impurezas apta para diferentes usos. De acuerdo a Márquez, (2015) “Entre los diferentes métodos existentes en la actualidad como tecnologías de tratamiento están la evaporación/destilación, ultrafiltración/osmosis inversa, precipitación química e intercambio iónico”.

El principal objetivo que orienta la presente monografía se propone “analizar la trascendencia e importancia a través de la historia de los intercambiadores iónicos del agua”, de igual forma se plantean entre objetivos específicos los siguientes:

Investigar la reseña histórica de los intercambiadores iónicos.

Describir los fundamentos importantes de los intercambiadores iónicos.

Indagar en relación al desarrollo tecnológico de los intercambiadores iónicos.

Investigar en relación al impacto de los intercambiadores iónicos sobre la calidad del agua.

Describir el impacto de los intercambiadores iónicos sobre el proceso de potabilización y calidad del agua.

CAPÍTULO 1

RESEÑA HISTÓRICA DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS DEL AGUA

Aspectos importantes del agua y sus contaminantes

El agua es un recurso natural no renovable, que a su vez es imprescindible para la vida y el consumo humano; sin embargo a lo largo de la historia de la humanidad la importancia de la calidad del agua ha tenido un lento desarrollo. En la actualidad son pocos los países que se preocupan por proteger los recursos hídricos o aquellas zonas de grandes yacimientos de agua como son los páramos e incluso los mismos ríos. En Colombia por ejemplo, hasta finales del siglo XX no se empezó a crear leyes y decretos encaminadas a la protección de los recursos naturales y protección del medio ambiente.

En la actualidad se han creado políticas estatales que van enfocadas a proteger los recursos hídricos, se le ha venido dando importancia tanto de la cantidad como de la calidad de ésta. No se puede desconocer que el agua es un elemento escaso y vulnerable, esencial para la vida y el progreso social, probablemente es el único recurso natural que compromete la vida humana en todos sus aspectos, de acuerdo a Rodríguez, (2008) "...la supervivencia de la humanidad depende en gran medida del uso prudente, armónico, eficiente y sustentable de los recursos hídricos del planeta".

En cuanto a los contaminantes del agua, son muchos los factores que pueden afectar la calidad de la misma, es frecuente que las condiciones de estos oscilen de un lugar a otro, autores como Mitchell, Stapp & Bixby (1991) recomiendan realizar mediciones

periódicas para evaluar las tendencias de calidad del agua. De acuerdo a los precitados autores, en los últimos años se viene utilizando un índice estándar llamado ICA (Índice de Calidad del Agua), el cual es el más usado de todos los índices de calidad de agua existentes. Aunque los contaminantes del agua se da por diversas razones, se debe tener en cuenta el entorno, la naturaleza, el contexto donde esta se encuentre, pues se sabe que existen aguas residuales, aguas negras, aguas lluvias, aguas de pozos, entre otras.

El agua para consumo humano es un tema que ha sido abordado por muchos autores, dado por el gran efecto vital que posee para las personas. Actualmente, la implementación de distintas tecnologías para el tratamiento, también ha sido de interés para brindar un agua que cumpla con la calidad requerida.

Historia de los intercambiadores iónicos como medida principal para descontaminar el agua

La ciencia de intercambiar un ión por otro empleando una matriz es una metodología antigua. En tiempos bíblicos, por ejemplo, Moisés emplea la corteza de un árbol para obtener agua potable a partir de agua saludable (Éxodo 15,23-25); Aristóteles en la antigua Grecia, consideraba que haciendo pasar agua de mar a través de un recipiente de cera se obtiene agua dulce (Meteorología, libro II, Parte 3).

Las propiedades como intercambiadores iónicos de algunas arcillas y minerales se conocen desde el siglo XIX y se atribuye la primera observación del fenómeno a Thompson y Way, cuyos estudios con distintas muestras de suelos agrícolas fueron

publicados en 1850. En sus experimentos pasaron una disolución de sulfato o nitrato amónico a través de diversas muestras de arcilla procedente de suelos agrícolas, observando que el filtrado obtenido contenía iones calcio en lugar de iones amonio. Esta afinidad de algunos suelos por el ión amonio frente otros cationes, en este caso el calcio, los hacía más adecuados para su uso agrícola. La importancia de estos resultados en cuanto al fenómeno de intercambio iónico, no fue comprendida en su totalidad hasta que Henneberg y Stohmann y Eichhorn, demostraron la reversibilidad del proceso en 1858.

Más adelante, en 1870, los estudios de Lemberg sobre la capacidad intercambiadora de las zeolitas ampliaron los conocimientos en estos procesos de intercambio. De hecho, las zeolitas son un ejemplo clásico de minerales con capacidad intercambiadora, y ya en 1927 se empleó la primera columna de zeolita mineral para eliminar iones calcio y magnesio que interferían en la determinación del contenido en sulfato del agua.

En 1905, Gans modificó minerales naturales denominándolos permutitas, silicatos de sodio y aluminio sintéticos, que fueron las primeras sustancias empleadas en la eliminación de la dureza del agua. No obstante estos compuestos tenían en su contra que mostraban capacidades de intercambio bajas (aunque su velocidad de regeneración era rápida) y que por debajo de pH 7 se disolvían en agua. Fueron utilizados durante cerca de catorce años y luego se abandonaron debido a sus limitaciones hasta 1950 que volvieron a utilizarse.

Una etapa intermedia en la evolución del intercambio iónico fue el reconocimiento de las propiedades intercambiadores de varios materiales orgánicos, como el carbón sulfonado. Este material presentaba un grupo funcional capaz de intercambiar cationes de modo

reversible y además operaba en un rango de pH mayor que los silicatos de aluminio, de 1 a 10, por lo que resultaba ser aplicable a un número mayor de procesos industriales. El inconveniente del carbón sulfonado era que su capacidad de intercambio era aún menor que la de los silicatos de aluminio.

La aportación más importante al desarrollo del intercambio iónico fue la síntesis de resinas orgánicas, realizada en 1935 por los químicos Basil Adams y Eric Holmes del Departamento de Investigación Científica e Industrial (Reino Unido). Desarrollaron polímeros orgánicos que imitaban a las zeolitas mediante la reacción de condensación entre el fenol y formaldehído. Sustituyendo el fenol por derivados de éste, como fenoles polihídricos o por diaminas aromáticas, se dio paso a las resinas de intercambio catiónicas o aniónicas. Posteriormente, Holmes produjo una resina catiónica fuerte a partir del ácido fenolsulfónico. Las primeras resinas Amberlita (Rohm and Hass) y Dowex (Dow Chemical Co.) se basaban en esta química.

Un paso más en el desarrollo de los intercambiadores iónicos fue la búsqueda de especificidad. En 1948, Skogseid produce la primera resina específica para un metal, potasio, y a partir de este momento los investigadores basaron sus esfuerzos en incorporar a la matriz de la resina distintos grupos funcionales que aumentasen su selectividad por un determinado compuesto, desarrollando así las resinas quelatantes.

Desde entonces se ha continuado la investigación y el desarrollo en nuevas estructuras poliméricas (macroporosas, poliacrílicas, tipo gel) dando lugar a una serie de modernas

resinas de intercambio iónico, cuyo empleo en el campo de aplicaciones industriales ha sido enorme.

CAPÍTULO 2

ADSORCIÓN Y SUSTANCIAS DE ADSORCIÓN EN INTERCAMBIADORES IÓNICOS

La adsorción y el intercambio iónico son procesos de separación sólido-líquido con características muy particulares que los diferencian entre sí. Sin embargo, las técnicas utilizadas en ingeniería química para la adsorción y el intercambio iónico son tan parecidas que se estudian simultáneamente.

De acuerdo a Treybal, (1996) la adsorción es un proceso de separación, en el cual algunos de los componentes presentes en una mezcla gaseosa o líquida son selectivamente transferidos a la superficie de un sólido, donde los componentes son mantenidos reversiblemente o irreversiblemente. La sustancia en cuya superficie se produce la adsorción se llama adsorbente, y la sustancia extraída de la mezcla gaseosa o líquida se llama adsorbato.

De igual forma, Michaels, (1952) las operaciones de adsorción dependen de su reversibilidad para recuperar el adsorbente y de la recuperación de la sustancia adsorbida, pues el objetivo es la separación de la mezcla, por lo tanto, si la adsorción se va a utilizar como un proceso de separación, necesariamente estamos hablando de adsorción física, para que el proceso sea reversible. La adsorción física, o adsorción de Van der Waals resulta de las fuerzas secundarias de atracción (dipolo-dipolo y dipolos inducidos) entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida, y es similar en

naturaleza a la condensación de moléculas de vapor en un líquido de la misma composición.

Sustancias de adsorción en intercambiadores iónicos

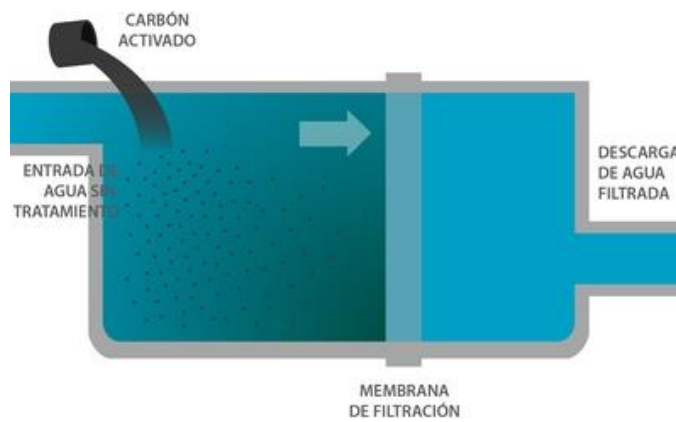
Las sustancias de adsorción tratan el agua mediante la adición de una sustancia, como carbón activado o alúmina (óxido de aluminio), a la fuente de suministro de agua. Los adsorbentes atraen a los contaminantes mediante procesos químicos y físicos que causan que éstos se ‘adhieran’ a sus superficies para su eliminación posterior.

Por un gran margen, el adsorbente de uso más frecuente es el carbón activado — una sustancia similar al carbón común pero sumamente porosa. El carbón activado en polvo a menudo se usa cuando surgen problemas temporales de calidad; éste se puede agregar sencillamente al agua y desecharlo con los fangos de desecho. El carbón granular activado a menudo se distribuye en una bandeja a través de la cual se hace pasar o percolar lentamente el agua fuente.

El tratamiento de alúmina activada se usa para atraer y eliminar contaminantes, como el arsénico y el fluoruro, que tengan iones con carga negativa. Sin embargo, esta opción puede ser costosa y quizá requiera el mantenimiento complicado del sistema. Además, el agua puede requerir el ajuste de pH antes de la columna de adsorción, y con frecuencia surge el problema de residuos de aluminio excesivos. Para la regeneración se requieren ácidos y bases.

El área, en la figura 1, representa la cantidad de soluto retenido por la masa de resina hasta el momento de alcanzar una concentración dada (C) en el efluente. La cantidad útil de la resina (Q_{ur}) viene dada por el cociente entre esta área y la masa (M) de resina utilizada. Para determinar la capacidad de intercambio total se emplea toda el área sobre la curva (C_{max}).

Ilustración 1 Sustancias de adsorción en intercambiadores iónicos



Fuente: bgefoundation (2012)

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS IMPORTANTES DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS

Según Degremont, (1979) el intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que reencuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Este proceso tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas. “Por sus propiedades como disolventes y sus utilización en diversos procesos industriales, el agua acostumbra a tener muchas impurezas y contaminantes” Degremont, (1979). Las sales mecánicas se disuelven en el agua separándose en iones cuya presencia puede ser indeseable para los usos habituales del agua.

En los últimos siglos ha surgido un creciente interés por el medio ambiente, lo cual ha venido imponiendo tratamientos eficaces que eviten el deterioro de la calidad de las aguas especialmente por el vertido de efluentes industriales altamente contaminados. Valencia, (2000) considera que “...entre todos los tratamientos posibles, el intercambio iónico es una opción a considerar. La ciencia de intercambiar un ion por otro empleando un a matriz es una metodología antigua”.

Perry, (1992) en su manual del ingeniero químico recomienda lo siguiente:

En la desmineralización del agua, este proceso se fundamenta específicamente en el intercambio iónico, proceso unitario en el que los iones de las diferentes especies en disolución desplazan los iones insolubles de un determinado material de intercambio. El uso extendido de este proceso es ablandamiento de aguas residuales

y domésticas, en el que los iones de calcio y magnesio presentes en estas aguas son reducidos, por lo tanto también reduce su dureza.

En si los intercambiadores iónicos, son un proceso que consiste en aprovechar la capacidad que tiene las resinas de intercambiar iones entre una fase sólida y una fase líquida en forma reversible, es decir que regresa a su estado original y sin cambio permanente en la estructura del sólido. Generalmente, la gran utilidad del intercambio iónico descansa en el hecho de usar una y otra vez los materiales de intercambio iónico puesto que el material intercambiador puede ser regenerado ya que el cambio que sufre en la “fase de operación” no es permanente.

Las resinas de intercambio iónico están constituidas de dos partes principales: una parte estructural (matriz polimérica) y una parte funcional, que comprende el grupo iónico activo que tiene, a su vez un ión fijo y un ión móvil (Shepard , 1992).

De acuerdo a Eskel et al., (1990) Para ser útil un material de intercambio iónico debe reunir cierto número de requerimientos básicos, mucho de los cuales están interrelacionados de tal manera que no es posible cambiar uno sin alterar el otro.

- El intercambiador debe tener una “alta capacidad total”, es decir que tenga un grado de sustitución iónica bastante elevado.
- La resina debe estar “químicamente estructurada” como para manifestar buenas características de equilibrio al manejar solutos.

- La resina debe estar diseñada para operar en un rango adecuado de pH y tener un grado suficiente de selectividad.

Considera Eskel et al., (1990) que sus propiedades cinéticas (determinado por sus grupos funcionales y por su estructura reticular) deben ser tales que la resina mantenga una alta capacidad operativa.

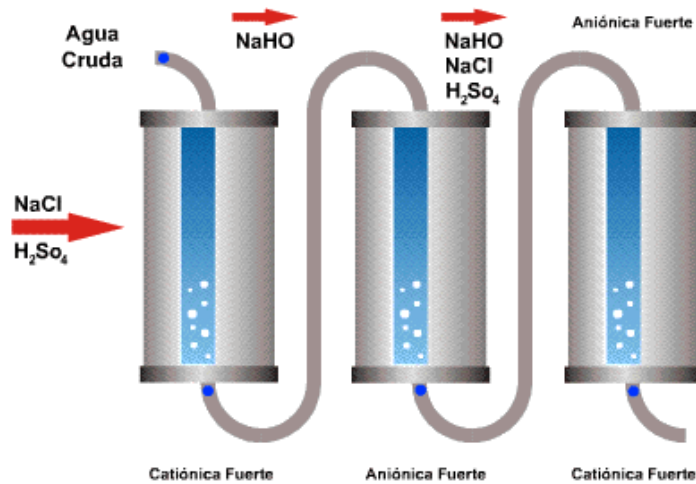
La resina debe ser extremadamente insoluble ya que de lo contrario el producto sería alterado en calidad.

- Debe tener una buena estabilidad química, esto es resistencia a los ataques de ácidos y bases, oxidación, reducción o radiación.
- Es necesario también una buena estabilidad física, las fuerzas impuestas a una resina provienen de la presión hidráulica, presión osmótica, que resulta de los cambios de volúmenes causados por los cambios electrolíticos y de la concentración de los electrolitos y fuerzas puramente mecánica.
- Es muy importante que la resina debe estar disponible a un precio tal que haga rentable el proceso.

El intercambio iónico debe tener una capacidad limitada para almacenar iones en su estructura, llamada capacidad de intercambio; en virtud de esto, llegará finalmente a saturarse con iones indeseables. Entonces se lava con una solución fuertemente

regenerante que contiene iones deseables, los mismos que sustituyen a los iones indeseables acumulados, dejando al material en condiciones útiles de operación (ver ilustración 1).

Ilustración 2 Intercambiador iónico de agua



Fuente: Tomado del bloc: Aguas Mugrosas del Polo, (2010)

En la ilustración 1 se puede observar la forma en que esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye de ordinario retrolavado regeneración, enjuagado y servicio del agua por así decirlo.

Funciones de los intercambiadores iónicos

Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) (ver ilustración 2) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ión de carga opuesta (contraión). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico. Esta reacción se puede ilustrar con la

siguiente ecuación tomando como ejemplo el intercambio entre el ión sodio, Na^+ , que se encuentra en los sitios activos de la matriz R , y el ión calcio, Ca^{2+} , presente en la disolución que contacta dicha matriz =

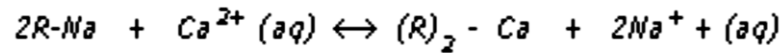
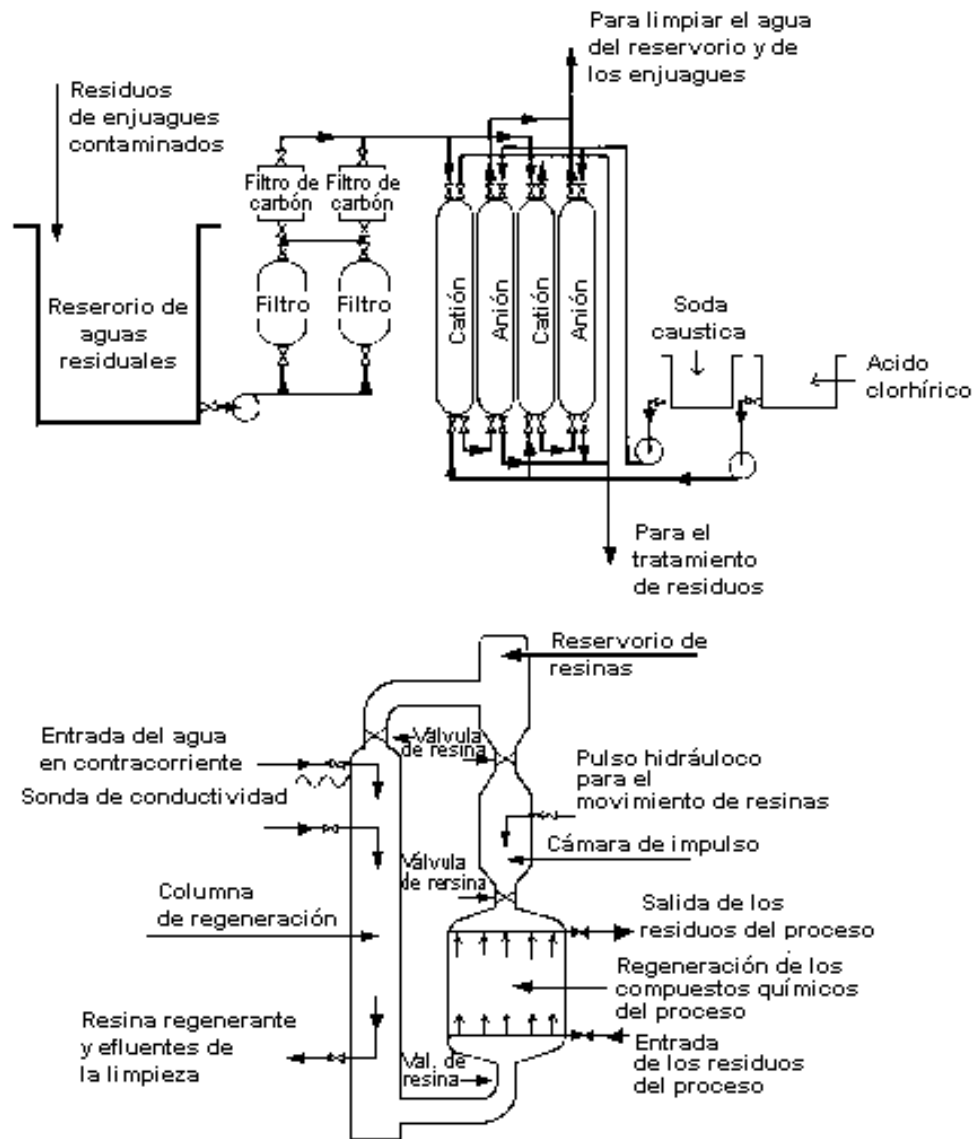


Ilustración 3 Diseño de esquema de intercambiador iónico



Fuente: Freeman H. (1995)

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ión en particular, el pH de la disolución, si el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones o la temperatura etc. Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa. “Este movimiento se conoce como proceso de difusión como se puede. La difusión de un ión está en función de su dimensión, carga electroestática, la temperatura y también está influenciada por la estructura y tamaño de poro de la matriz. El proceso de difusión tiene lugar entre zonas de distinta concentración de iones, de más concentrado a menos, hasta que tengan la misma concentración” (Gordon, 1973).

Características de los intercambiadores iónicos

Capacidad de intercambio: Se define como la cantidad de iones que una resina puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales. Depende del tipo de grupo activo y del grado de entrecruzamiento de la matriz y se expresa en equivalentes por litro de resina, o por gramo. (Un equivalente es el peso molecular en gramos del compuesto dividido por su carga eléctrica).

Capacidad específica teórica: Se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor suele ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución.

Selectividad: Propiedad de los intercambiadores iónicos por la que un intercambiador muestra mayor afinidad por un ión que por otro. La selectividad de una resina por un ión determinado se mide con el coeficiente de la selectividad K , depende de las interacciones electroestáticas que se establezcan entre el ión y el intercambiador y de la formación de enlaces con el grupo ionogénico.

La regla principal es que un intercambiador preferirá aquellos iones con los que forme los enlaces más fuertes. La estructura de poro y la elasticidad del intercambiador también influye en su selectividad, como ocurre con las zeolitas. Su estructura de poro rígida les permite actuar como tamices moleculares, impidiendo la entrada de ciertos iones sencillamente por su tamaño.

¿Cómo se trabaja con los intercambiadores iónicos?

Técnicas generales: El tratamiento de una disolución con un intercambiador iónico se puede llevar a cabo mediante dos configuraciones distintas, en discontinuo o en columna.

Intercambio iónico en discontinuo: En las operaciones en discontinuo, se mezcla el intercambiador y la disolución en un recipiente hasta que el intercambio de iones alcanza el equilibrio. Esta configuración no puede aplicarse para devolver el intercambiador a su forma iónica original, ya que el proceso de regeneración en discontinuo no es químicamente eficiente. Es necesario recuperar el intercambiador por decantación y transferirlo a una columna para proceder a su regeneración. Este método, a pesar de ser muy eficiente, tiene pocas aplicaciones industriales.

Aplicaciones en discontinuo de resinas de intercambio

Intercambio iónico en columna: Esta configuración es la que se emplea más a menudo en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador se coloca en el interior de una columna vertical, a través de la cual fluye la disolución a tratar. El proceso global consta de varias etapas que a continuación describiremos brevemente.

CAPITULO 4

ASPECTO LEGAL

Las siguientes normas constitucionales, leyes, decretos y resoluciones son los aspectos legales consultados y tomadas como complemento de la presente monografía.

Constitución Política de Colombia de 1991

Artículo 49. La atención de la salud y el saneamiento ambiental son servicios públicos a cargo del Estado. Se garantiza a todas las personas el acceso a los servicios de promoción, protección y recuperación de la salud.

Corresponde al Estado organizar, dirigir y reglamentar la prestación de servicios de salud a los habitantes y de saneamiento ambiental conforme a los principios de eficiencia, universalidad y solidaridad. También, establecer las políticas para la prestación de servicios de salud por entidades privadas, y ejercer su vigilancia y control. Así mismo, establecer las competencias de la Nación, las entidades territoriales y los particulares, y determinar los aportes a su cargo en los términos y condiciones señalados en la ley. Los servicios de salud se organizarán en forma descentralizada, por niveles de atención y con participación de la comunidad. La ley señalará los términos en los cuales la atención básica para todos los habitantes será gratuita y obligatoria. Toda persona tiene el deber de procurar el cuidado integral de su salud y la de su comunidad.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

Artículo 366. El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable.

Para tales efectos, en los planes y presupuestos de la Nación y de las entidades territoriales, el gasto público social tendrá prioridad sobre cualquier otra asignación.

Ley 99 de 1993 Sistema Ambiental de Colombia.

ARTÍCULO 65.- Funciones de los Municipios, de los Distritos y del Distrito Capital de Santafé de Bogotá.

Corresponde en materia ambiental a los municipios y a los distritos con régimen constitucional especial, además de las funciones que les sean delegadas por la ley o de las que se deleguen o transfieran a los alcaldes por el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE o por las Corporaciones Autónomas Regionales, las siguientes atribuciones especiales:

1. Promover y ejecutar programas y políticas nacionales, regionales y sectoriales en relación con el medio ambiente y los recursos naturales renovables; elaborar los planes, programas y proyectos ambientales municipales articulados a los planes, programas y proyectos regionales, departamentales y nacionales.

2. Dictar con sujeción a las disposiciones legales reglamentarias superiores las normas necesarias para el control, la preservación y la defensa del patrimonio ecológico del municipio.
3. Adoptar los planes, programas y proyectos de desarrollo ambiental y de los recursos naturales renovables, que hayan sido discutidos y aprobados a nivel regional, conforme a las normas de planificación ambiental de que trata la presente ley;
4. Participar en la elaboración de planes, programas y proyectos de desarrollo ambiental y de los recursos naturales renovables a nivel departamental.
5. Colaborar con las Corporaciones Autónomas Regionales en la elaboración de los planes regionales y en la ejecución de programas, proyectos y tareas necesarios para la conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
6. Ejercer, a través del alcalde como primera autoridad de policía con el apoyo de la Policía Nacional y en coordinación con las demás entidades del Sistema Nacional Ambiental -SINA-, con sujeción a la distribución legal de competencias, funciones de control y vigilancia del medio ambiente y los recursos naturales renovables, con el fin de velar por el cumplimiento de los deberes del Estado y de los particulares en materia ambiental y de proteger el derecho constitucional a un ambiente sano.
7. Coordinar y dirigir, con la asesoría de las Corporaciones Autónomas Regionales las actividades permanentes de control y vigilancia ambientales que se realicen en el territorio del municipio o distrito con el apoyo de la fuerza pública, en relación con la movilización procesamiento, uso, aprovechamiento y comercialización de los recursos naturales renovables o con actividades contaminantes y degradantes de las aguas, el aire o el suelo.

8. Dictar, dentro de los límites establecidos por la ley, los reglamentos y las disposiciones superiores, las normas de ordenamiento territorial del municipio y las regulaciones sobre usos del suelo.

9. Ejecutar obras o proyectos de descontaminación de corrientes o depósitos de agua afectados por vertimientos del municipio, así como programas de disposición, eliminación y reciclaje de residuos líquidos y sólidos y de control a las emisiones contaminantes del aire.

10. Promover, cofinanciar o ejecutar, en coordinación con los entes directores y organismos ejecutores del Sistema Nacional de Adecuación de Tierras y con las Corporaciones Autónomas Regionales, obras y proyectos de irrigación, drenaje, recuperación de tierras, defensa contra las inundaciones y regulación de cauces o corrientes de agua, para el adecuado manejo y aprovechamiento de cuencas y micro cuencas hidrográficas.

PARÁGRAFO - Las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria a Pequeños Productores -UMATAS- prestarán el servicio de asistencia técnica y harán transferencia de tecnología en lo relacionado con la defensa del medio ambiente y la protección de los recursos naturales renovables.

ARTÍCULO 66.- Competencias de Grandes Centros Urbanos. Los municipios, distritos o áreas metropolitanas cuya población urbana fuere igual o superior a un millón (1'000.000) de habitantes ejercerán dentro del perímetro urbano las mismas funciones atribuidas a las Corporaciones Autónomas Regionales, en lo que fuere aplicable al medio ambiente urbano.

Además de las licencias ambientales, concesiones, permisos y autorizaciones que les corresponda otorgar para el ejercicio de actividades o la ejecución de obras dentro del territorio de su jurisdicción las autoridades municipales, distritales o metropolitanas tendrán la responsabilidad de efectuar el control de vertimientos y emisiones contaminantes, disposición de desechos sólidos y de residuos tóxicos y peligrosos, dictar las medidas de corrección o mitigación de daños ambientales y adelantar proyectos de saneamiento y descontaminación.

Los municipios, distritos o áreas metropolitanas de que trata el presente artículo asumirán ante las Corporaciones Autónomas Regionales la obligación de transferir el 50% del recaudo de las tasas retributivas o compensatorias causadas dentro del perímetro urbano y de servicios, por el vertimiento de efluentes contaminantes conducidos por la red de servicios públicos y arrojados fuera de dicho perímetro, según el grado de materias contaminantes no eliminadas con que se haga el vertimiento.

Decreto 1594 de 1984. Uso del agua y residuos líquidos

Artículo 169: Los usuarios cuyos vertimientos estén conectados a un alcantarillado provisto de planta de tratamiento de residuos líquidos, deberán dar aviso a la entidad encargada de la operación de la planta, cuando con vertimiento ocasional o accidental puedan perjudicar su operación.

Artículo 74: parágrafo determina que las EMAR pueden exigir a los usuarios valores más restrictivos en el vertimiento cuando se produzcan concentraciones en el cuerpo receptor que excedan los criterios de calidad para el uso o usos asignados al recurso.

Resolución 3957 de 2009

La presente Resolución se aplicará a los vertimientos de aguas residuales diferentes a las de origen doméstico y a los generados por las aguas lluvias dentro del perímetro urbano de Bogotá D.C.

El registro de vertimientos. Es la facultad que tiene la entidad para llevar y sentar la información de manera ordenada sucesiva y completa referente a los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público o a fuentes superficiales para la administración del recurso hídrico.

Todo Usuario que genere vertimientos de aguas residuales, exceptuando los vertimientos de agua residual doméstica realizados al sistema de alcantarillado público está obligado a solicitar el registro de sus vertimientos ante la Secretaria Distrital de Ambiente – SDA.

Tramitar el permiso de vertimiento. Todos aquellos Usuarios que presenten por lo menos una de las siguientes condiciones deberán realizar la auto declaración, tramitar y obtener permiso de vertimientos ante la Secretaria Distrital de Ambiente.

a) Usuario generador de vertimientos de agua residual industrial que efectúe descargas liquidas a la red de alcantarillado público del Distrito Capital.

b) Usuario generador de vertimientos no domésticos que efectúe descargas liquidas al sistema de alcantarillado público del Distrito Capital y que contenga una o más sustancias de interés sanitario.

CAPÍTULO 5

DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS

El desarrollo industrial y los avances tecnológicos han experimentado un rápido crecimiento en las últimas décadas lo que la ha llevado a ser uno de los sectores más importantes en la economía. La tecnología ha ido de la mano en el área industrial de productos variados para surgir algunas necesidades de la humanidad, siendo los intercambiadores iónicos unos de los principales necesarios e indispensables en la actualidad si se desea dar un tratamiento adecuado al agua para su descontaminación y potencialización de la misma.

La tecnología de los intercambiadores iónicos se ha desarrollado a través de la elaboración o fabricación de semiconductores son materiales cuya conductividad varía con la temperatura, pudiendo comportarse como conductores o como aislantes (Fernández, 2013 p. 12). Las variaciones de la conductividad, de acuerdo a Fernández, (2013), no con la temperatura sino eléctricamente controlables por el hombre. Para conseguir esto, se introducen átomos de otros elementos en el semiconductor. Estos átomos se llaman impurezas y tras su introducción, el material semiconductor presenta una conductividad controlable eléctricamente.

La tecnología aplicada en los intercambiadores iónicos ha sido según Letterman R. (2002) “un proceso complejo y delicado en el que se emplean más de doscientos productos químicos de gran pureza y ha sido la demanda en ese sector industrial”. La tecnología se

basa en un proceso de adsorción, en flujo continuo, en columnas con material de intercambio específico. El efluente a tratar es bombeado a través de la columna donde los elementos son retenidos, al saturarse la columna se inicia el proceso de regeneración (Letterman R. 2002 p. 123). La importancia en cuanto a la tecnología de los intercambiadores iónicos, es que esta ha venido evolucionando y a la fecha ha llegado a industrializar intercambiadores avanzados, sofisticados que además de acondicionar y tratar las aguas es posible recuperar valores metálicos de la misma.

Fundación Chile, (2014) considera que la tecnología de intercambio iónico es altamente selectiva y capaz de remover la totalidad de los contaminantes del agua. La tecnología de los intercambiadores iónicos es variada, se da de acuerdo a la industria que los fabrique, la marca, la calidad y la estructura de los mismos; sin embargo todos tienen el mismo fin “remover de un agua natural, los iones indeseables, transfiriéndolos a un material sólido, llamado Intercambiador Iónico, el cual los acepta, cediendo un número equivalente de iones de una especie deseable que se encuentra almacenada en la estructura del intercambiador de iones” (Canter, 1998 p. 47).

A continuación se presenta varios tipos o marcas de intercambiadores iónicos de acuerdo a la tecnología utilizada para el diseño y fabricación del mismo:

Intercambio Iónico – Electrodesionización (EDI): Es un proceso continuo en el cual se obtiene agua ultrapura (ver ilustración 3), sin la necesidad de utilizar productos químicos. Consiste en la eliminación de iones y especies ionizadas presentes en el agua por medio de electricidad. Entre otras aplicaciones, se utiliza como afino para el agua de permeado obtenida de una ósmosis inversa, reemplazando los sistemas tradicionales de lecho mixto

y eliminando la necesidad del uso de productos químicos para la regeneración de las resinas de intercambio. De esta forma, evitamos tanto el coste elevado de estos productos, como los problemas medioambientales que pueden ocasionar (Inerco, 2000 p. 1). De acuerdo a la Inerco, (2000) una de las grandes ventajas de este intercambiador es iónico es la simplicidad, el menor espacio ocupado, la facilidad de mantenimiento y el que sea un proceso continuo son otras ventajas frente a los equipos de Intercambio Iónico con resinas.

Ilustración 4 Intercambio Iónico – Electrodesionización (EDI)

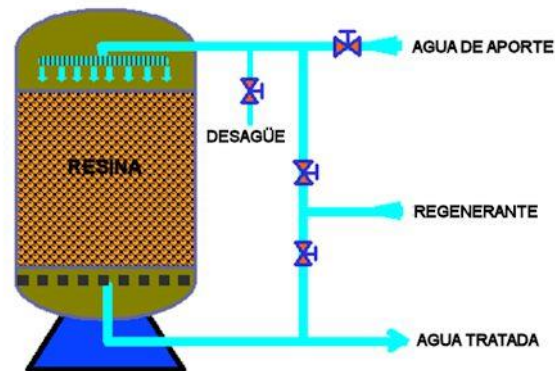


Fuente: Inerco, (2000)

Se puede decir que los intercambiadores iónicos a base de Electrodesionización (EDI) son equipos de combustión y tecnologías avanzadas de diseño propio para la optimización energética del proceso de combustión, de acuerdo a Inerco, (2000) la minimización de las emisiones medioambientales (CO₂, NO_x, CO, SO_x y partículas, entre otras) y para la mejora de la disponibilidad, flexibilidad operativa y mantenimiento de las instalaciones de combustión.

Intercambiadores iónicos con resinas: Con el avance de la ciencia y la tecnología es cada vez mayor el uso de agua desprovista de ciertos iones y muchas veces desprovista de todos los iones. Una de las técnicas de eliminación de iones consiste en hacer pasar el agua a través de resinas de intercambio iónico (ver ilustración 4).

Ilustración 5 Diseño de intercambiador iónico con resina



Fuente: Aquatracta, (2014)

De acuerdo a Aquatracta, (2014) hay 2 tipos básicos de resinas- intercambio de cationes e intercambio de aniones. Resinas del intercambio de cationes emiten iones Hidrógeno (H^+) u otros iones como intercambio por cationes impuros presentes en el agua. Resina de intercambio de Aniones despedira iones de hydroxil (OH) u otros iones de cargas negativas en intercambio por los iones impuros que están presentes en el agua.

Las resinas de Intercambio de iones modernas son preparadas de polímeros sintéticos tales como styrenedivinlybenzene copolymers que han sido sulphonated para formar unos intercambios de cationes fuertemente ácidos o aminated para formar intercambios de aniones fuertemente básicos o débilmente básicos (Aquatracta, 2014).

Según Kemmer, (1989) son tres maneras en la cual la tecnología de intercambio de iones puede ser usada en el tratamiento de agua y purificación: primero, resinas de intercambio

de cation solas se pueden emplear para suavizar el agua por intercambio base; segundo, resinas de intercambio anión solas pueden ser utilizadas para escarbar o eliminar nitrato y tercero, combinaciones resinas de intercambios de cationes y aniones pueden ser utilizadas para eliminar virtualmente todas las impurezas iónicas presentes en el feedwater, un proceso conocido como desionización (p. 89).

Las dos primeras tecnologías son formas de tratamiento de agua en cualquiera de la naturaleza química de las impurezas sean cambiadas mediante un intercambio en base de suavizante o ciertas impurezas que son eliminadas selectivamente como un escarbar orgánico o eliminación de nitrato). Por contraste, la desionización es un proceso de purificación que puede producir agua de calidad excepcional (Kemmer, 1989 p. 86).

Desionización de Dos Camas: Consiste en dos recipientes- uno conteniendo una resina de intercambio de cationes en forma de hidrógeno (H^+) y la otra conteniendo una resina de aniones en forma de hidroxil (OH^-). El agua fluye a través de la columna de cationes, donde todos los cationes son intercambiados por iones de hidrógeno. Para mantener el agua eléctricamente balanceada por cada monovalente, por ejemplo, Na^+ , un ión de hidrógeno es intercambiado y por cada cation divalente, por ejemplo Ca^{2+} , ó Mg^{2+} , dos iones de hidrógeno son intercambiados (Lenntech, 2010 p. 2).

Ilustración 6 Desionización de Dos Camas



Fuente: Lenntech, (2010)

Desionización de Cama Mixta: En los desionizadores de cama mixta, las resinas del intercambio de cationes y de aniones están íntimamente mezcladas y contenidas en un solo recipiente a presión. La mezcla minuciosa de cationes intercambiadores y aniones intercambiadores en una columna sencilla hace al desionizador de cama mixta equivalente a la serie larga de plantas de dos camas. Como resultado, la calidad del agua obtenida de un desionizador de cama mixta es apreciablemente más alta que la que se produce en una planta de dos camas (Lenntech, 2010 p. 3).

Ilustración 7 Desionización de Cama Mixta



Fuente: Rotek. (2005)

El recipiente, tal como se observa en la ilustración 6 puede ser en la forma de una columna grande de acero inoxidable o de fibra de vidrio reforzada conteniendo cientos de litros de resina , o un cartucho pequeño desechable/regenerable que cuando se acaba, puede desecharse o enviado al proveedor original para regeneración. Los desionizadores grandes- ya sean de dos camas o camas mixtas- se regeneran automáticamente ellos mismos, en su lugar, cuando la calidad del agua cae por debajo de los niveles fijados anteriormente (Rotek. 2005 p. 6).

De acuerdo a los párrafos anteriores se observa el desarrollo tecnológico que poco a poco se ha venido dando en los intercambiadores iónicos, se analizar que la tecnología ha jugado un papel importante en la fabricación de estos; sin embargo todos, sin importar su tecnología tienen el mismo fin “purificar el agua”, proceso que se lleva a cabo en laboratorios y en la industria, usando intercambiadores sintéticos muy activos.

En síntesis general, independiente de la tecnología, los intercambiadores iónicos “son sustancias sólidas prácticamente insoluble en agua, estable a la temperatura de la misma. Al contacto con una solución salina (sales minerales, sólidos disueltos), sustituyen en forma reversible y algunos de sus iones, en algunos casos aniones, y en otros casos cationes, por los de la solución acuosa salina” (Kemmer, 1989 p. 90).

CAPÍTULO 6

PROYECCIÓN DE UN DISEÑO A ESCALA REAL DE INTERCAMBIADOR IÓNICO

Algunos principios de diseño

A continuación se presentan recomendaciones generales para diseñar un sistema de intercambio iónico de manera económica y obtener buenas prestaciones, y un ejemplo sencillo pero detallado.

Las compañías especializadas en tratamiento de agua tienen sus propias tecnologías y métodos de diseño.

Parámetros a tener en cuenta al momento de diseñar un intercambiador iónico:

El análisis del agua de alimentación de la planta

El caudal de producción

La duración del ciclo

La calidad deseada del agua tratada

La tecnología de regeneración

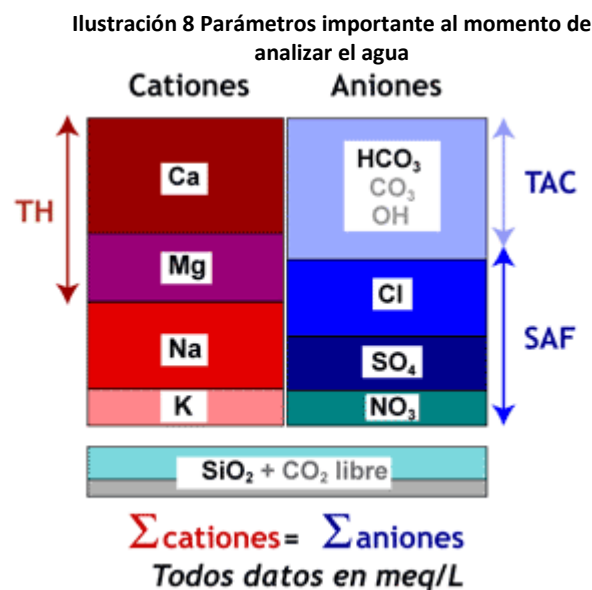
El tamaño de las columnas

La selección de las resinas

Es importante centrarse en los sistemas de desmineralización, pero la mayoría de los principios y recomendaciones se aplican a otros procesos de intercambio de iones: ablandamiento, descarbonatación, eliminación de nitratos, y otros (François, 2010).

Análisis del agua de alimentación

Todos los sistemas de intercambio de iones son diseñados para un agua de alimentación dada. Algunas variaciones de los análisis de agua de alimentación son aceptables, y deben tenerse en cuenta, pero un sistema de intercambio de iones no se puede diseñar de manera eficiente para muy diferentes tipos de agua. Por ejemplo, un sistema de desmineralización diseñado para el tratamiento de agua de pozo es completamente diferente de un sistema diseñado para el tratamiento del permeado de una ósmosis inversa.



Fuente: François, (2010)

La primera etapa es obtener un análisis correcto del agua bruta. Detalles se encuentran aquí.

Cuando el análisis de agua no es constante, debido por ejemplo a unas variaciones estacionales, no tome una "composición media" como la base de su diseño François, (2010). En su lugar, utilice el caso "más probable", haga el diseño con esta agua, y compruebe en un segundo paso lo que ocurrirá (duración del ciclo) con las aguas "mínima" y "máxima".

Todos los análisis de agua deben ser perfectamente equilibrados, tal como se ilustra en el ejemplo de la derecha.

Basado en el análisis del agua bruta se determinará la combinación más favorable de resinas, y si un degasificador se puede instalar.

Caudal de producción

Es importante saber si la planta debe funcionar con un caudal constante o variable. Algunos diseños necesitan un caudal mínimo (por ejemplo Amberpack™). Naturalmente, el sistema debe funcionar con el caudal máximo y mínimo.

En general, no es aconsejable operar de forma intermitente, es decir, detener la producción en el medio del ciclo y volver a iniciarla. La calidad del agua tratada puede verse afectada después de una parada no seguida de una regeneración.

Duración del ciclo

Un ciclo corto es deseable en la mayoría de los casos. El límite práctico es que el período de producción debe ser por lo menos tan largo como el proceso de regeneración. Como

la mayoría de los sistemas de intercambio iónico se regeneran de forma automática, la duración del ciclo de producción no tiene que ser "al menos un día", como era la regla en el momento (hace muchas décadas) cuando el turno de la mañana regeneraba la planta manualmente todos los días a las 7 de la mañana. François, (2010). Se han diseñado sistemas eficientes con tiempos de funcionamiento tan corto como 3 horas.

Los límites del tiempo de funcionamiento también están relacionados con la cinética de la resina. Al leer las hojas técnicas de las resinas, normalmente se ve que el caudal específico en el tratamiento del agua debe estar entre 5 y 50 volúmenes de lecho por hora (m^3/h por m^3 de resina, o h^{-1}). A caudales más bajos, la distribución hidráulica en el lecho de resina puede ser insuficiente, y con tasas de flujo más altas, los efectos cinéticos pueden afectar la velocidad de intercambio, resultando en ambos casos en una pérdida de calidad del agua tratada.

Así, en la práctica el tiempo de funcionamiento debe ser seleccionado como una función de los siguientes parámetros:

Caudal específico entre 5 y 50 volúmenes por hora (Vol/h o h^{-1}).

Lechos mezclados se diseñan con un caudal de 12 a 15 h^{-1} .

Diseño del sistema tan pequeño como sea posible por razones económicas (menor inversión de equipos y resinas).

Con lechos compactados, asegurarse que el lecho de resina esté compactado correctamente en el período de producción (por ejemplo AmberpackTM) como durante la regeneración (UpcoreTM y similares).

Con aguas de salinidad baja, como permeado de ósmosis inversa, el ciclo puede durar varios días. Los lechos mezclados de pulimiento detrás de una planta principal de desmineralización pueden funcionar varias semanas antes que haya que regenerarlos.

Calidad del agua tratada

En el proceso de intercambio iónico, la calidad del agua tratada es casi independiente del análisis de agua bruta. Los factores que afectan esta calidad están esencialmente relacionados con el proceso de regeneración.

No obstante, la temperatura puede afectar a la fuga de sílice residual en el agua tratada: a temperaturas mayores de aproximadamente 50 °C, la sílice casi no se elimina por resinas de intercambio aniónico fuertemente básicas (SBA).

Aparte de eso, se puede esperar que la calidad del agua tratada de un sistema de regeneración regenerado en contracorriente sea:

Conductividad: ~ 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Sílice residual: 10 a 25 $\mu\text{g}/\text{L}$

Los lechos mezclados de pulido producen generalmente una conductividad de 0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y una fuga de sílice menor de 10 $\mu\text{g}/\text{L}$. Lechos mixtos cuidadosamente diseñados y operados pueden producir una conductividad similar a la del agua pura (0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y sílice de unos $\mu\text{g}/\text{L}$ o a veces menos.

Costos asociados

1. Considerando: Caudal: 544 (L/s) y una Concentración inicial de 30 mg/L Inversión:

\$26.956,234

Costo de Tratamiento: 1037 \$/m³

2. Considerando: Caudal: 10 (L/s) y una Concentración inicial de 2 mg/L.

Inversión: \$ 2.263,138

Costo de Tratamiento: 100 \$/m³

3. Volumen de tonelada de resina \$2,370,936.00 y \$5,334,606.00

Volumen en litros de resina \$2,570

4. Para Tratar un caudal: 60 (m³/h) se necesita un lecho de 17,3 m³ x 2570

Cada lecho de intercambio iónico \$40,750,462

Un intercambiador iónico doble \$81,500,925

Función de estimación de costo

Costo Inversión (miles \$) con Caudal de tratamiento Q (L/s)

$$\text{Inv} = 7\text{E-}05 \cdot Q^3 - 0,0691 \cdot Q^2 + 33,063 \cdot Q + 464,29$$

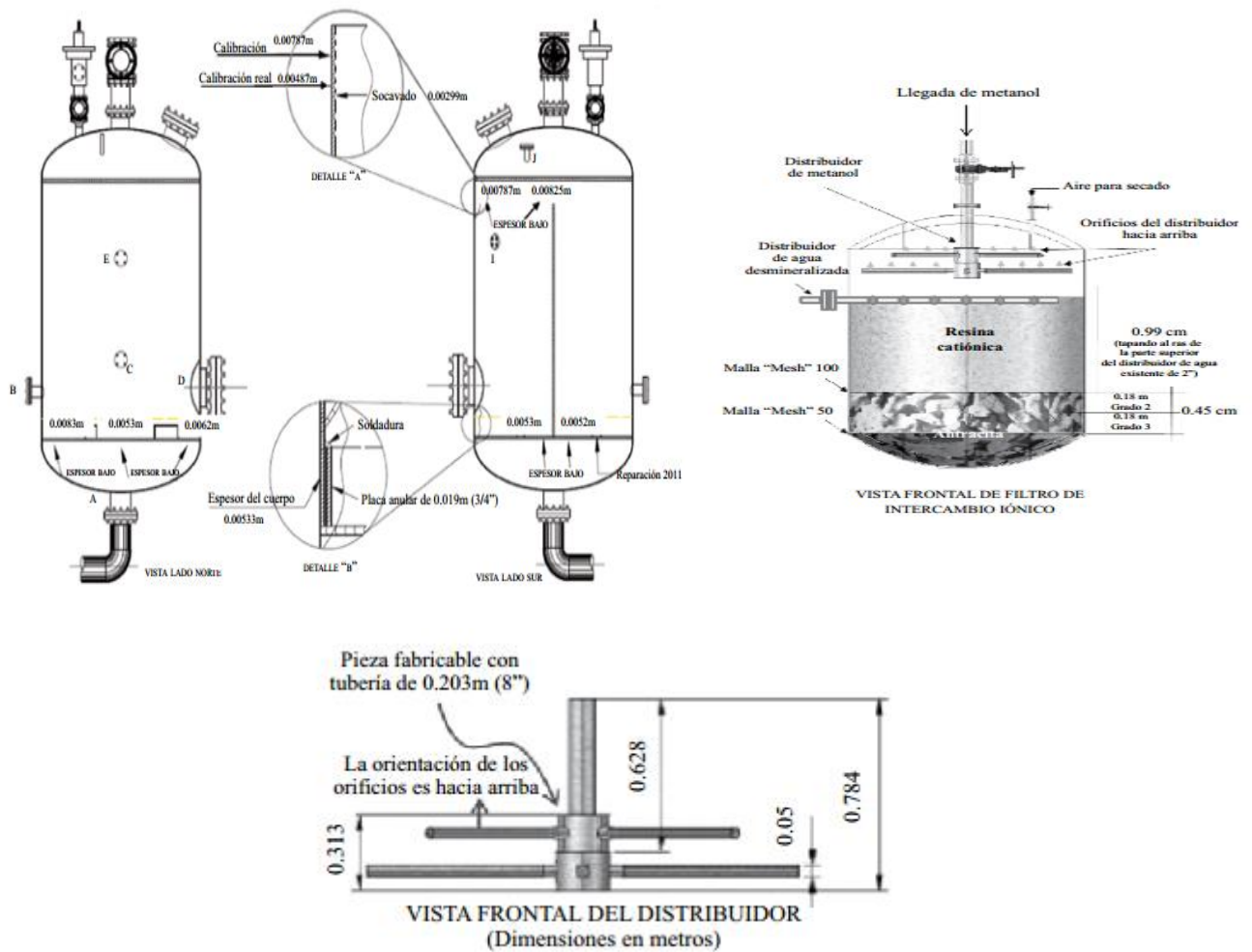
$$R^2 = 0,9978$$

Costo Tratamiento (\$/m³) con Concentración de parámetro

$$q \text{ (mg/L)} \quad C = 0,0106 \cdot q + 0,0116$$

$$R^2 = 0,9819$$

Ilustración 9 Planos del diseño



Fuente: Diagrama constructivo del equipo FD-301 para contener la resina catiónica

Tecnol. (2012) Ciencia Ed. (IMIQ) vol. 27 núm. 1,

La inversión necesaria para esta adecuación, se consideró en \$ 45,338.340.

Ventajas:

- Elimina los iones disueltos, hasta un 99,9 %
- Solución de purificación de agua rentable
- Posee elevada innovación
- Es una tecnología altamente costo eficiente

- Es de operación simple
- Utiliza espacios pequeños
- La posibilidad de regeneración del material de intercambio aumenta su vida útil.
- Emplea reactivos comunes para la regeneración del material.
- No genera lodos y produce bajos volúmenes de eluídos.
- Entrega soluciones integrales por su flexibilidad en aplicación y por su facilidad para complementarse con otras tecnologías a costos razonables.

Restricciones

- No elimina las bacterias pirógenas de forma efectiva
- Capacidad finita
- Posee costos operacionales mensuales por consumo de reactivos químicos.
- Requiere uso de insumos constantes.
- Requiere el uso de regenerantes.
- Genera eluídos que deben ser dispuestos o tratados.
- Requiere pre-tratamiento en efluentes con alta carga de SST

Tecnología de regeneración

Detalles de los métodos de regeneración se encuentran en una página separada. Otra página (en inglés) ilustra los varios diseños de columnas correspondientes.

Salvo las unidades de intercambio iónico muy pequeñas (las de desalcalinización con una resina WAC solamente), las plantas deben siempre estar diseñadas usando la regeneración en contracorriente. Columnas de lecho compacto son particularmente

útiles, ya que ofrecen un diseño compacto y económico, y muy buena la calidad del agua tratada. Normalmente se dimensionan con ciclos relativamente cortos.

Sin embargo hay que prestar atención a los puntos siguientes:

Columnas Amberpack™ y tipos similares de lechos flotantes.

Estas funcionan de abajo hacia arriba y se regeneran de arriba hacia abajo. El caudal de producción debe ser suficiente para mantener el lecho de resina compactado hacia la placa de boquillas superior de la columna. Con resinas fuertemente ácidas (SAC), las que tienen la mayor densidad, la velocidad de producción tiene que ser más de 25 m/h (a 20 °C). Otras resinas tienen una densidad menor y la velocidad mínima es de 16 m/h.

Columnas Upcore™ y similares

Con producción de arriba hacia abajo y regeneración de abajo hacia arriba, la velocidad de regeneración tiene que ser suficiente para mantener el lecho compacto.

Esto se consigue con las medidas siguientes:

Un paso inicial de compactación se realiza durante unos minutos a la velocidad de 30 m/h antes de inyectar el regenerante.

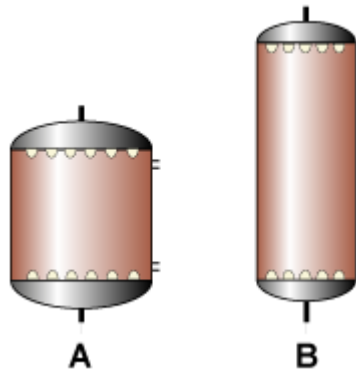
La solución de regeneración debe a veces ser reducida de manera que el ácido se pueda inyectar a más de 7 m/h y la sosa a más de 5 m/h en la columna de intercambio aniónico.

A menudo, el tiempo de contacto del regenerante se debe bajar.

Tiempos de contacto cortos y concentraciones bajas de las soluciones de regeneración pueden afectar, sin embargo, la eficiencia de la regeneración.

Tamaño de las columnas

Ilustración 10 Modelo de columnas



Fuente: François, (2010)

Para un volumen dado de resina, es generalmente más barato construir una columna estrecha y alta en lugar de una columna ancha y baja: en la ilustración, las dos columnas contienen el mismo volumen de resina. La columna B es más barata, ya que los principales componentes de los costos de la columna son los fondos cóncavos y las placas de boquillas.

No hay límite en altura, excepto que la pérdida de carga a caudal máximo no debe ser más de 100 a 150 kPa (1 a 1,5 bar) a caudal máximo con resinas limpias.

Cuando se selecciona el diámetro de las columnas, los límites de la sección anterior (tecnología de regeneración) también deben ser considerados.

Selección de las resinas

Habrá que consultar al fabricante de resina. Sin embargo, se pueden hacer algunas recomendaciones generales:

Resinas macroporosas normalmente no se requieren para la desmineralización o ablandamiento.

Una excepción: todas las resinas débilmente básicas (WBA) de estireno son macroporosas.

Se requieren tamaños de partículas especiales dependiendo de la tecnología de diseño: resinas uniformes o semi-uniformes son necesarias para lechos compactados calidades especiales se requieren para lechos estratificados (por ejemplo Stratated™ o Stratapack™) calidades especiales son también necesarias para lechos mezclados con aguas de alto contenido de materia orgánica, se recomiendan resinas aniónicas acrílicas.

Cálculo manual aproximado

Podemos hacer un cálculo manual sin usar programas ni ordenadores, ni siquiera los datos de diseño de los productores de resina. El resultado será solo aproximado pero

muy útil para una estimación básica de la planta. Es también un buen ejercicio para entender y practicar los principios enunciados arriba.

Este cálculo se puede hacer para ablandadores o plantas sencillas de desmineralización que incluyen una columna de resina catiónica fuerte, una torre de desgasificación opcional y una columna de resina aniónica fuerte.

He aquí el proceso de cálculo de una planta de desmineralización sencilla:

Examinar el análisis del agua bruta

Calcular la concentración de cationes C_c [meq/L]

¿Se necesita una torre o no?

Si la concentración de bicarbonato es de 0.6 a 1.0 meq/L o más, se justifica una torre de desgasificación

Calcular la concentración de aniones C_a [meq/L]: con

Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , SiO_2 , HCO_3^- o CO_2 residual detrás de la torre si existe aquella

Seleccionar una duración de ciclo razonable t entre regeneraciones (en horas).

Con el caudal f en m^3/h calcular la producción neta Q [m^3]:

$$Q = f \cdot t \text{ [m}^3\text{]}$$

Calcular la carga iónica de un ciclo en eq (concentración en meq/L multiplicada por el volumen producido en m^3):

$$\text{Carga catiónica [eq]} = C_c \cdot Q$$

$$\text{Carga aniónica [eq]} = C_a \cdot Q$$

Tomaremos unos valores de capacidad útil aproximados:

$$\text{SAC: } \text{capc} = 1.0 \text{ eq/L con regeneración de HCl o}$$

$$\text{SAC: } \text{capc} = 0.8 \text{ eq/L con regeneración de H}_2\text{SO}_4$$

$$\text{SBA: } \text{capa} = 0.5 \text{ eq/L}$$

El volumen V de resina (en litros) es igual a la carga iónica [eq] dividida por la capacidad útil [eq/L]:

$$\text{SAC: } V_c = C_c \cdot Q / \text{capc [L]}$$

$$\text{SBA: } V_a = C_a \cdot Q / \text{capa [L]}$$

Antes de terminar el cálculo, se tiene que averiguar que la carga volúmica de ambas columnas de resina sea compatible con los valores recomendados por los productores de resina. Esta carga volúmica en h^{-1} es igual al caudal dividido por el volumen de resina. El rango usual es 5 a 50 h^{-1} . Para diseñar una planta con costo mínimo de inversión, utilice una carga volúmica de 30 a 35 h^{-1} .

Si las cargas volúmicas calculadas con los volúmenes V_c y V_a son demasiado altas, aumente la duración del ciclo t , y si son bajas redúzcala.

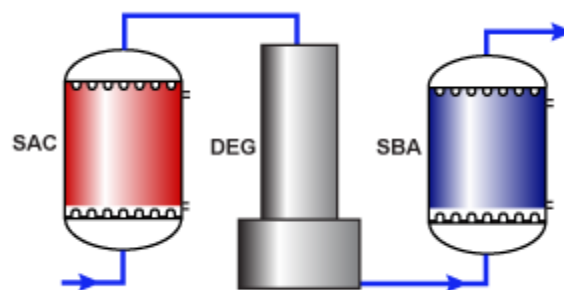
Está claro: este cálculo es muy aproximado, por que tomamos en el punto 8 una capacidad estimada que no toma en cuenta varios parámetros que afectan la capacidad: nivel de regenerantes, composición precisa del agua, temperatura, valor de fuga al fin del ciclo, etc.

Además, tampoco se calculó aquí la carga iónica adicional procurada por las aguas de servicio necesitadas para la dilución de los regenerantes y las etapas de lavado. Según la salinidad del agua bruta, las aguas de servicio pueden aumentar la carga iónica de 2 a 10 %.

El cálculo de parejas de resinas débiles y fuertes (WAC/SAC o WBA/SBA) no se puede hacer manualmente porque necesita iteraciones para optimizar el "overrun". Cálculos exactos se pueden hacer con programas especializados tales como el IXCalcTM para resinas producidas por Dow.

Ejemplo

Ilustración 11 Esquema IXCalcTM



Fuente: François, (2010)

Utilizando el esquema de 10 puntos de arriba.

- Análisis de agua [meq/L]

Cationes		Aniones	
Ca	3.2	Cl	1.1
Mg	0.7	SO4	0.6
Na	0.9	NO3	0.2

	HCO ₃	2.9
Σ Cationes 4.8	Σ Aniones 4.8	
	SiO ₂	0.4

- $C_c = 4.8 \text{ meq/L}$
- $\text{HCO}_3 = 2.9 \text{ meq/L}$ — utilizar una torre
CO₂ residual detrás torre = 0.25 meq/L
- $C_a = 1.1 + 0.6 + 0.2 + 0.25 = 2.15 \text{ meq/L}$
- Tiempo de operación $t = 12 \text{ h}$
- Caudal 60 m³/h
- Volumen producido $60 \cdot 12 = 720 \text{ m}^3$
- Carga iónica
- Catiónica [eq] = $4.8 \cdot 720 = 3456 \text{ eq}$
- Aniónica [eq] = $2.15 \cdot 720 = 1548 \text{ eq}$
- Capacidad útil estimada
- Regeneración con HCl: $\text{capc} = 1.0 \text{ eq/L}$
- Regeneración con NaOH: $\text{capa} = 0.5 \text{ eq/L}$
- Volúmenes de resina SAC: $V_c = 3456 / 1.0 = 3456 \text{ L}$
SBA: $V_a = 1548 / 0.5 = 3096 \text{ L}$
- Carga volúmica SAC: $60 / 3.456 = 16.9 \text{ h}^{-1}$
SBA: $60 / 3.096 = 19.4 \text{ h}^{-1}$

Las cargas volúmicas son totalmente aceptables, pero se podría reducir el ciclo hasta digamos 8 horas para una planta más pequeña. Los nuevos datos serían:

Volumen producido $60 \cdot 8 = 480 \text{ m}^3$

- Carga catiónica [eq] = $4.8 \cdot 480 = 2304$
- Carga aniónica [eq] = $2.15 \cdot 480 = 1032$ eq
- Volumen de SAC: $V_c = 2304 / 1.0 = 2304$ L
- Volumen de SBA: $V_a = 1032 / 0.5 = 2064$ L
- Carga volúmica SAC: $60 / 2.304 = 26.0$ h⁻¹
- Carga volúmica SBA: $60/2.064 = 29.1$ h⁻¹

En la mayoría de los casos la planta de desmineralización tiene dos cadenas de servicio alternativo con regeneración automática, de manera que un ciclo más corto es una ventaja.

Lo anterior corresponde a un ejemplo de las columnas de resina, donde se puede observar que son de tipo Amberpack, lo que resulta en una calidad excelente del agua tratada, con una conductividad típica de 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o menos y una fuga de sílice de 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ o menos.

CAPÍTULO 7

IMPACTO DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS SOBRE EL PROCESO DE POTABILIZACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA

Los intercambiadores iónicos ante el proceso de potabilización del agua

El agua que es usada para la producción de agua potable contiene moléculas de sustancias perjudiciales para la salud. Una de las propiedades esenciales del agua es que puede disolver fácilmente ciertas sustancias. Por ejemplo, las aguas lluvias al precipitarse sobre la tierra a medida que van cayendo se disuelven una gran cantidad de componentes químicos a través de partículas y gases como el oxígeno. Por lo general el agua, por muy natural que esta sea trae consigo contaminantes presentes en el aire se disuelven en la misma. De igual forma el agua que se filtra en el suelo y forma las aguas subterráneas generalmente tienen una gran cantidad de minerales disueltos, como resultado del contacto con el suelo y las rocas. Las actividades humanas, como son la agricultura y la industria generan gran cantidad de contaminantes que luego se descargan a las aguas residuales. Todo esto es para hacernos a una idea en cuanto la importancia de potabilizar el agua antes de pasar al consumo humano, evitando enfermedades que pueden ser drásticas para la salud. En este aspecto se observa que la potabilización del agua puede llegar a prevenir cualquier riesgo al momento de su consumo.

De acuerdo a Jáuregui, (2004) “La potabilización del agua, tiene por objeto provocar los cambios físicos, químicos y biológicos que conviertan al agua, de estado natural a

condiciones potables” (p. 123), es decir que a través del proceso de potabilización el agua queda en condiciones de uso y consumo humano. Se puede entender el tratamiento del agua, desde un punto de vista potabilizador, como aquel proceso de naturaleza físico-química y biológica, mediante el cual se eliminan una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para la salud. “Todo sistema de abastecimiento de agua que no esté provisto de medios de potabilización, no merece el calificativo sanitario de abastecimiento de agua segura” (Jáuregui, 2004 p. 126).

Existen procesos naturales donde los contaminantes son eliminados del agua mediante procesos biológicos. Cuando el agua sedimenta en la tierra o las capas subterráneas se producen la filtración natural del agua (Di Bernardo, 1993 p. 12); sin embargo la capacidad de auto depuración del agua no es suficiente para producir agua apta para consumo humano. “Además existen gran cantidad de contaminantes introducidos en las aguas debido a las actividades agrícolas o industriales” (Di Bernardo, 1993 p. 13). Por tal motivo es importante implementar medidas acordes a las necesidades en relación a los contaminantes del agua, pues esta por lo general necesita tratarse para poder ser agua apta para consumo humano, y cumplir con las exigencias legales que regulan la materia, desde el punto de vista de estándares físicos, bacteriológicos y químicos. “Para nadie es desconocido que el agua para el consumo no debe contener olores o sabores, y debe de ser agua clara y químicamente estable (ej. sin compuestos corrosivos)” (Di Bernardo, 1993 p. 16).

Autores como Greene & Mortonsimons, (1988) consideran que la eliminación de materias que deterioran las características físico- químicas y organolépticas del agua, así como la

eliminación de bacterias y otros microorganismos que pueden alterar gravemente nuestra salud son los objetivos perseguidos y conseguidos en las estaciones de tratamiento a lo largo de todo un proceso que al final logra suministrar un agua transparente y de una calidad sanitaria garantizada. De igual forma Mc Mahon, (1989) considera que en la potabilización del agua se debe recurrir a métodos adecuados a la calidad del agua de origen a tratar. Esto teniendo en cuenta que

...el mejoramiento de la calidad del agua en las plantas de potabilización generalmente integra una serie de procesos u operaciones que gradualmente permiten convertir un agua cruda de un río, lago, mar o pozo de agua subterránea en agua que cumpla ciertos parámetros de calidad de agua establecidos en las normas de algún país. En las plantas que utilizan coagulación química y filtración rápida se considera que el agua clarificada es aquella que ha sido sometida a procesos de coagulación, floculación y sedimentación (Cruz, 2014 p. 2).

Existen varias formas o procesos químicos que se dan a través de intercambiadores iónicos ante la potabilización del agua. A continuación se presenta lo descrito por Vargas, (2004) en su libro "Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I. Tomo I".

Transferencia de iones

La transferencia de iones se efectúa mediante procesos de coagulación, precipitación química, absorción e intercambio iónico.

Coagulación química

La coagulación química consiste en adicionar al agua una sustancia que tiene propiedades coagulantes, la cual transfiere sus iones a la sustancia que se desea

remover, lo que neutraliza la carga eléctrica de los coloides para favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y peso.

Los coagulantes más efectivos son las sales trivalentes de aluminio y fierro. Las condiciones de pH y alcalinidad del agua influyen en la eficiencia de la coagulación. Este proceso se utiliza principalmente para remover la turbiedad y el color.

Precipitación química

La precipitación química consiste en adicionar al agua una sustancia química soluble cuyos iones reaccionan con los de la sustancia que se desea remover, formando un precipitado. Tal es el caso de la remoción de hierro y de dureza carbonatada (ablandamiento), mediante la adición de cal.

Intercambio iónico

Como su nombre lo indica, este proceso consiste en un intercambio de iones entre la sustancia que desea remover y un medio sólido a través del cual se hace pasar el flujo de agua. Este es el caso del ablandamiento del agua mediante resinas, en el cual se realiza un intercambio de iones de cal y magnesio por iones de sodio, al pasar el agua a través de un medio poroso. Procesos unitarios y plantas de tratamiento constituido por zeolitas de sodio. Cuando la resina se satura de iones de calcio y magnesio, se regenera introduciéndola en un recipiente con una solución saturada de sal.

Adsorción

La adsorción consiste en la remoción de iones y moléculas presentes en la solución, concentrándolos en la superficie de un medio adsorbente, mediante la acción de las fuerzas de interfaz. Este proceso se aplica en la remoción de olores y sabores, mediante la aplicación de carbón activado en polvo.

A lo largo de los párrafos anteriores se puede observar la importancia de la potabilización del agua, de igual forma cada autor citado relaciona la potabilización con procesos químicos. En cuanto a los procesos químicos juegan un papel importante los intercambiadores iónicos, puesto que es a través de estos que se puede potabilizar este recurso hídrico. Al respecto Etienne, (2009) considera lo siguiente “La potabilización incluye el detectar cualquier posible contaminante microbiológico o químico y aplicar las metodologías para que no se continúe la contaminación” (p. 4).

Los intercambiadores iónicos cumplen un papel importante en el tratamiento de potabilización del agua, tal como se describe a continuación:

- Se adapta a las necesidades de las aguas en que las concentraciones de las impurezas iónicas son relativamente bajas.
- Las resinas actuales tienen altas capacidades de intercambio que permiten conseguir procesos compactos requiriendo inversiones moderadas.

- Las resinas son estables químicamente, de larga duración y fácil regeneración.
- Las instalaciones pueden ser automáticas o manuales para adaptarse a las condiciones específicas. La capacidad teórica de intercambio de una resina es la cantidad de grupos ionogénicos por unidad de peso o de volumen (Hidalgo & Guaman, 2006 p. 45).

En cuanto a los intercambiadores iónicos y la importancia en la potabilización del agua cabe citar lo mencionado por Concepción, (2015) “En el campo del tratamiento de aguas, los usos más habituales del intercambio iónico son los siguientes:

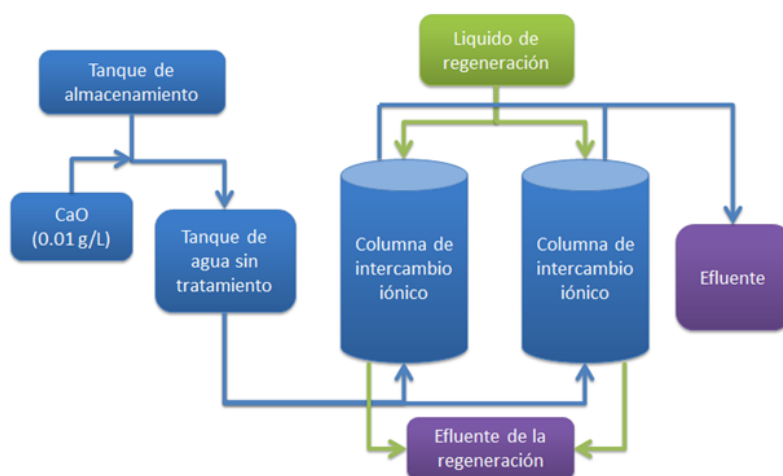
- Ablandamiento de aguas
- Desmineralización de aguas
- Eliminación de alcalinidad
- Eliminación de cationes de metales pesados disueltos en aguas de proceso
- Eliminación de aniones de ácidos fuertes tales como nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-})
- Eliminación de amonio a bajas temperaturas (p. 4).

Concepción, (2015) señala que el intercambio iónico entre las operaciones de tratamiento y depuración de aguas permite la eliminación de componentes químicos disueltos en un efluente antes de su vertido final o de su utilización, es decir que el agua a través de

este proceso químico de ionización se convierte en un agua potabilizada apta para el consumo humano, asegurando la calidad requerida al agua. Además, plantea el precitado autor que los aniones inorgánicos y cationes metálicos, también son susceptibles de ser eliminados mediante intercambio iónico las formas ionizadas de numerosas moléculas orgánicas, entre las que se encuentran los colorantes solubles en agua (Concepción, 2015 p. 4).

En síntesis general, se puede decir que los intercambiadores iónicos juegan un papel importante en la potabilización del agua, ya que estos son un método que se basa en la remoción de impurezas del agua mediante la utilización de resinas sintéticas que tienen afinidad por las sales disueltas ionizadas. “Es un proceso que emplea el principio de intercambio iónico y las resinas empleadas pueden ser de intercambio catiónico, aniónico o mixtas. El sistema de purificación de agua por intercambio iónico puede consistir en dos, múltiples o una combinación de lechos desmineralizadores” (Hidalgo & Guaman, 2006 p. 79).

Ilustración 12 Potabilización del agua a través de intercambiadores iónicos



Fuente: De la Cruz, (2015)

Intercambiadores iónicos ante calidad del agua

Es importante el poder reconocer que la calidad del agua potable es uno de los aspectos más sensibles en la prestación de los servicios de salubridad. Eskel, (1979) considera que “ una mala calidad del agua puede tener efectos perjudiciales sobre la salud de la población, razón por la cual es necesario realizar constantes monitoreos a fin de prevenir cualquier problema” (p. 111). Pedraza, (2003) considera que el agua destinada al consumo humano debe ser limpiado y purificado haciéndole pasar por un complejo y eficiente sistema de tratamiento.

Baird, (2001) describe la importancia de aplicar el sistema de intercambio iónico en el proceso de purificación del agua a fin de mejorar la calidad de la misma. De acuerdo al autor éste sistema utiliza una resina de la cual ciertos iones indeseables son absorbidos y reemplazados por diferentes iones. “La reacción usual de intercambio iónico intercambia iones de calcio y magnesio por iones sodio, lo cual reduce la dureza” (Baird, 2001 p. 23).

La importancia de optimizar el sistema de potabilización del agua a través del intercambio iónico consiste en mejorar la calidad la misma ante las impurezas que no la deja ser apta para el consumo. Solo a través de este proceso químico se puede brindar a la comunidad en general de cualquier parte del mundo un agua de calidad, permitiendo que las personas puedan disfrutar de la misma en forma segura, “libre de bacterias y agentes fisicoquímicos que puedan afectar la salud de sus habitantes, evitando cualquier tipo de enfermedades endémicas y gastrointestinales” (Baird, 2001 p. 37).

“Con el avance de la ciencia y de la técnica es cada vez mayor el uso de agua desprovista de ciertos iones y muchas veces desprovista de todos los iones. Una de las técnicas de eliminación de iones consiste en hacer pasar el agua a través de resinas de intercambio iónico” (Agamez, 2014 p. 34).

Se puede decir en relación a los anteriores párrafos, la calidad de agua depende del proceso de ionización a través de los intercambiadores y la tecnología que se utilice, solo de esta forma se puede determinar la calidad del agua. De acuerdo a Arboleda, (1981) a través del uso de los intercambiadores iónicos las sustancias no deseadas contenidas en el agua se separan o se transforman en sustancias aceptables purificándola e influyendo en la calidad del recurso hídrico.

Debido a lo anterior es importante realizar la utilización de los intercambiadores iónicos al momento de dar una excelente calidad del agua. Para esto, es importante tener en cuenta lo dicho por Arboleda, (1981) quien recomienda ensayos de recipientes que permitan mediante mediciones de las características físico-químicas del agua, optimizar las variables químicas de los diferentes procesos unitarios para asegurar la calidad final (p. 185).

El proceso de ionización a través de intercambiadores iónicos por sí solo no es suficiente para conseguir el resultado esperado con la potabilización el agua, puesto que es importante tener en cuenta lo recomendado por Arboleda, (1981) “de esta forma se observa la gran utilidad del intercambio iónico ante el proceso para mejorar la calidad del

agua”. Así mismo se debe tener en cuenta lo dicho por Hidalgo & Guaman, (2006) según estos autores los intercambiadores iónicos, para poder dar excelentes resultados en cuanto a la calidad del agua deben cumplir con las siguientes características:

- El intercambiador debe tener una “alta capacidad total”, es decir que tenga un grado de sustitución iónica bastante elevado.
- La resina debe estar “químicamente estructurada” como para manifestar buenas características de equilibrio al manejar solutos.
- La resina debe estar diseñada para operar en un rango adecuado de pH y tener un grado suficiente de selectividad.
- Sus propiedades cinéticas (determinado por sus grupos funcionales y por su estructura reticular) deben ser tales que la resina mantenga una alta capacidad operativa.
- La resina debe ser extremadamente insoluble ya que de lo contrario el producto sería alterado en calidad.
- Debe tener una buena estabilidad química, esto es resistencia a los ataques de ácidos y bases, oxidación, reducción o radiación.

- Es necesario también una buena estabilidad física, las fuerzas impuestas a una resina provienen de la presión hidráulica, presión osmótica, que resulta de los cambios de volúmenes causados por los cambios electrolíticos y de la concentración de los electrolitos y fuerzas puramente mecánica.

CAPÍTULO 8

COMERCIO DE INTERCAMBIADORES IÓNICOS EN COLOMBIA

Nova Química de Colombia S.A. Es una empresa ubicada en Medellín – Antioquia, cuyo propósito es diseñar e implementar soluciones integrales a las diferentes necesidades en tratamiento del agua que surjan en la industria, el comercio, entes oficiales y pequeñas poblaciones. La empresa diseña soluciones a medida basados en estudios personalizados de cada caso, partiendo de pilotajes y pruebas de tratabilidad las cuales les permite diseñar con fundamentos claros y poder dar la confianza a los clientes que la solución que le ofrecen será la más ajustada a su necesidad.

Ilustración 13 Planta en filtros



Fuente: Nova Química de Colombia S.A.

Los productos que ofrece la empresa son:

- Plantas de Tratamiento Prefabricadas. (Materiales de Fabricación PRFV o Acero Inoxidable).

- Abiertas: Modulares o compactas, de acuerdo al área disponible, caudal y calidad del agua a tratar.
- Cerradas o en Filtros Presurizados: Fabricados en PRFV o acero inoxidable, permiten mantener la presión a la salida del sistema y abastecer tanques elevados, el número de filtros a utilizar esta en función del caudal, y calidad del agua a tratar y a entregar.
- Procesos Unitarios para Plantas de Tratamiento abiertas (modulares y compactas)
- Clarificación por Manto de Lodo: Este clarificador incluye en su estructura los procesos de coagulación, floculación y sedimentación de tasa acelerada, y mediante un mecanismo interno generar un vórtice en el agua que disminuye en la medida que esta asciende por el tanque y gracias a su estructura interna troncocónica se fomenta el proceso de floculación permitiendo la generación partículas de lodo en un estado de equilibrio dinámico denominado manto de lodos.
- Filtración en Filtros Rápidos Tipo Multicapa: El agua clarificada se distribuye equitativamente en una serie de filtros de flujo descendente y lavado mutuo, compuestos por un lecho estratificado de antracita, arena y gravas de soporte.

- Sistema de Retro Lavado con Agua Filtrada: Es un tanque multifuncional que permite almacenar temporalmente el agua producida por los filtros y conducirla hacia el filtro que se requiera retro lavar, además de incorporar el mecanismo de control hidráulico de paro de la planta.

Planta de tratamiento prefabricada en PRFV tipo modular abierta

- Modelos de plantas: Modulares para caudales desde 2.5 L/s hasta 40 L/s. Compactas desde 1,5 L/s hasta 4 L/s. Presión mínima de trabajo 7 m de columna de agua o 10 psi. Dimensiones: varía según caudal.

Plantas de Tratamiento Cerradas o en Filtros Presurizados.

La configuración de este tipo de plantas está en función de la calidad del agua cruda y tratada, el caudal, condiciones hidráulicas del sitio de instalación y área disponible.

Materiales de fabricación: PRFV - Acero inoxidable o

Acero revestido.

Presión máxima para tanques de PRFV: 50 y 125 psi.

Presión mínima de trabajo: 35psi

Maniobra manual o automática.

Procesos unitarios para Plantas de Tratamiento en tanques presurizados.

Pre filtros o Clarificadores en Lecho Poroso:

Tanque cilíndrico vertical, con material gradado, de maniobra manual o automática. Su configuración interna permite la formación de coloides.

Filtros Mixtos Tipo Multimedia de Arena Fina- Carbón Activado:

Tanque cilíndrico vertical, con material gradado, arena silícea, carbón activado, de maniobra manual o automática. Permiten eliminar sólidos suspendidos y coloides que producen turbiedad y color en el agua.

Filtros de Oxidación "BIRM":

Tanque cilíndrico vertical, con material gradado y resina catalizadora "Birm, de maniobra manual o automática. El Birm es una resina sintética cubierta con dióxido de manganeso, que es capaz de actuar como oxidante catalítico; esto hace reaccionar el oxígeno disuelto del agua con el hierro y manganeso presentes, solamente requiere retro lavado periódico, es un material insoluble que no se consume durante la operación.

Filtros de Intercambio Iónico

Suavización: Reducción de la dureza del agua (aportada principalmente por iones de Calcio y Magnesio disueltos en el agua) estos causan incrustación en tuberías, interfiere en procesos industriales, precipita detergentes y colorantes, ocasiona depósitos en

griferías y manchas en equipos sanitarios, reducen la eficiencia en transferencia de calor en calderas y sistemas de refrigeración entre otros problemas.

La dureza es eliminada mediante el uso de resinas de intercambio iónico, que son regeneradas con una solución concentrada de cloruro de sodio (salmuera), dichas resinas se disponen en tanques cilíndricos verticales (Suavizadores) fabricados en PRFV, acero inoxidable o revestido, con sistema de maniobra manual o automática.

Desmineralización: Eliminación de sales disueltas en el agua por medio de resinas de intercambio iónico, catiónicas y aniónicas, con el fin obtener aguas de baja conductividad especiales para procesos industriales.

Sistemas de intercambio iónico de maniobra manual, semi automática o automática por válvula de cabezal, o válvulas con actuadores eléctricos o neumáticos.

Amtec Andina es una empresa colombiana especializada en la prestación de asesorías ambientales al sector industrial, comercial e institucional, esto incluye:

i) Diseño y/o construcción de infraestructura para el control de la contaminación

ii) manejo de vertimientos y emisiones.

iii) elaboración y seguimiento de Estudios de impacto ambiental, planes de manejo ambiental, planes de manejo de residuos, planes de seguridad industrial y salud ocupacional.

iv) asesoría para el montaje y operación de DGAs

v) asesoría para la cumplimentación del registro único Ambiental – RUA, entre otros.

Estamos en capacidad de brindar soluciones ambientales en justo equilibrio con las variables rentabilidad, productividad y desempeño de su empresa.

Tratamiento Aguas

- Coagulantes
- Coagulantes orgánicos
- Coagulantes inorgánicos

Floculantes

- Polímeros no iónicos en solución o en polvo.
- Polímeros aniónicos en solución o en polvo.
- Polímeros catiónicos en solución o en polvo.
- Lechos filtrantes y medios porosos
- Arenas filtrantes en diferentes tipos granulometrías.
- Grava soporte en diferentes tipos y granulometrías.
- Antracita de diferentes granulometrías.
- Carbón activado granular y en polvo.
- Carbón coque para relleno en torres de aireación.
- Resinas de intercambio iónico

- Resinas aniónicas y catiónicas para suavizadores, desalcalinizadores y desmineralizadores.

- Resina acrílica base fuerte grado industrial.

Proceso de aguas

- Secuestrantes de Oxígeno orgánico e inorgánico e Inhibidores de incrustación y depositación para sistemas de generación de vapor.

- Inhibidores de corrosión, dispersantes e inhibidores de incrustación para Sistemas de Enfriamiento.

- Biocidas oxidantes y no Oxidantes para el control microbiológico en sistemas de enfriamiento.

- Control de Emisiones Atmosféricas Para Control de Emisiones Atmosféricas

Prefiltros

- Filtros para partículas gruesas

- Filtros ULPA y HEPA

Materiales adsorbentes y absorbentes

- Carbón altamente activado.- Silica Gel.

- Alúmina activada.
- Zeolitas.

Diseño, construcción y venta de equipos individuales a medida para tratamiento de agua:

- Floculadores/sedimentadores de alta tasa.
- Filtros de carbón activado para Absorción o remoción de sustancias orgánicas, colores y sabores residuales.
- Filtros de arena a alta velocidad para remoción de sólidos finos, flog en suspensión y la mayoría de microorganismos patógenos.
- Bombas dosificadoras para adición de químicos.
- Columnas de intercambio iónico.

Ilustración 14 Planta procesadora de agua



Fuente: Amtec Andi

La empresa diseña y construye de sistemas de control para sistemas de extracción de contaminantes en sitios de trabajo o para equipos destinados a la generación de servicios industriales o proceso (calderas, hornos, plantas de generación), cumpliendo la normatividad ambiental nacional vigente (Dec. 948 de 1995, Res. 909 de 2008 y complementarios) y la USEPA (United States Environmental Protection Agency).

DISIN S.A. Diseños y Construcciones Industriales. Es una empresa establecida en Colombia desde el año 1979 Con más de 36 años de experiencia esta especializada en el diseño, construcción, montaje, puesta en operación y mantenimiento de plantas, equipos y sistemas integrales para tratamiento de agua potable e industrial, aguas residuales domesticas e industriales, suavizadores o ablandadores, desmineralizadores, desaireadores térmicos para calderas, entre otros. Cuenta con un equipo de ingenieros altamente calificado y una planta de producción propia que permite diseñar, construir y fabricar equipos manuales o automáticos, con altos estándares de calidad.

La empresa es especialista en la desmineralización, también llamada deionización, es la eliminación de iones y minerales que contiene el agua, la cual se efectúa a través de resinas de intercambio de iones atrayendo las sales ionizadas disueltas. Estas resinas se dividen en dos clasificaciones: resinas catiónicas, que remueven los iones positivos y resinas aniónicas que remueven los iones negativos.

DISIN S.A. es líder en el mercado internacional siendo especialistas en el diseño, fabricación e implementación de equipos, bancos de desmineralización de doble columna

o lecho mixto y sistemas integrales complementarios, los cuales trabajan en sentido co-corriente.

Contamos con el respaldo tecnológico para la implementación de sistemas que aportan tecnologías de última generación, teniendo como aliados comerciales a las mejores casas fabricantes del mundo en válvulas y controles electrónicos tales como PENTAIR INC, AQUAMATIC, GENERAL ELECTRIC Y CLACK CORPORATION, entre otros.

Nuestros equipos son suministrados con resinas de intercambio iónico – catiónico de DOW CHEMICAL producidas en los Estados Unidos y BAYER (LANXESS) producidas en Alemania.

Nuestros diseños permiten obtener ciclos de servicio, retro – lavado, regeneración y enjuague en forma secuencial, tanto en la columna catiónica como en la columna aniónica de forma automática, y la inyección de químicos regenerantes se realiza a través de eyectores de vacío sin necesidad de emplear costosos sistemas de bombeo adicionales para esta operación.

DISIN S.A. construye los equipos de desmineralización en acero inoxidable apto para soportar ataques químicos tales como ácido clorhídrico y soda cáustica, en donde según su aplicación y características definidas en un proyecto puntual, se elaboran a partir de poliéster reforzado de fibra de vidrio (PRFV).

Ilustración 15 Equipos de desmineralización en acero inoxidable



Fuente: DISIN S.A.

HidroTecnik. Es una empresa que brinda servicios integrales en el área medio-ambiental. Se especialista en el servicio técnico de mantenimiento preventivo de plantas de producción de agua, que utilizan tecnologías de: Filtración, Microfiltración, Nanofiltración, Ultrafiltración, Ósmosis Reversa y Resinas de Intercambio Iónico.

EQUIPOS

- Filtros multimedia manuales o automáticos.
- Filtros de carbón activado manuales o automáticos.
- Ablandadores o suavizadores de aguas.

- Filtros para remoción de hierro y manganeso.
- Equipos de desmineralización por intercambio iónico.
- Equipos de ultrafiltración para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales.
- Equipos de osmosis reversa para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales.
- Sistemas de esterilización de agua por luz ultravioleta.
- Carcasas para filtros de cartucho.
- Tiendas de agua.

REPUESTOS Y CONSUMIBLES

- Medios filtrantes: Gravas, arenas, antracitas.
- Carbones activados en diferentes tamaños de partícula.
- Resinas de intercambio iónico: Cationicas, Anionicas, Lechos Mixtos, Resinas Especiales.
- Tanques de filtración y suavización en fibra de vidrio.

- Válvulas automáticas para filtración y suavización.
- Filtros de talegas, cartuchos de microfiltración.
- Membranas de osmosis reversa de diferentes marcas.
- Químicos para mantenimiento preventivo: Antiincrustantes, sanitizantes, secuestrantes de cloro, biocidas.
- Químicos para limpieza química de membranas.

Ilustración 16 Equipo para tratamiento de agua



Fuente: HidroTecnik

Como se puede observar en Colombia existen empresas especializadas en vender productos relacionados con el tratamiento y potabilización del agua. Dentro de los productos que ofrecen estas empresas se encuentran los intercambiadores iónicos, observándose de esta forma que la purificación del agua a tomado gran importancia en nuestro país, cada empresa maneja tecnologías diferentes acorde a sus productos. Aunque los precios no fueron fácil de consultar, pues se requiere contactar la empresa a

través de medios electrónicos y esperar entre dos o tres semanas para la respuesta. Virtualmente se hizo una visita a cada empresa aquí consultada para analizar los productos que ofrece junto con los servicios, se aprecia que las empresas buscan brindar calidad y garantía en cada producto que ofrece.

Lo anterior indica que Colombia no ha sido ajena a los avances científicos y tecnológicos en relación a los productos químicos e intercambiadores iónicos para la purificación y tratamiento del agua industrial, potable o cualquiera que sea su destino.

COSTOS ASOCIADOS A LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS

Identificación de costos: Con el fin de establecer los costos generados para la implementación de los intercambiadores iónicos, se referencian los siguientes costos; estos costos se determinaron con los precios del mercado durante el año 2016.

En este caso se tienen en cuenta los costos de inversión correspondientes a los costos de la construcción de las unidades piloto (prototipos) y los equipos necesarios para su funcionamiento.

Tabla 1 Costo equipo de intercambiador iónico

DESCRIPCIÓN	COSTO	CANTIDAD	SUBTOTAL
Equipo de intercambio catiónico	211'816,000	1	240'700,000
Válvula de bola 1 ½"	60,000	10	600,000
Total Presupuesto estimado			241'300,000

Fuente: Autora

Cloruro de Sodio (Kg) \$16.292.57

Medio intercambiador 1.15 Kg \$ 9.004,5

Costos de Energía eléctrica: Los equipos eléctricos requieren una energía de alimentación para poder funcionar. El consumo de estos equipos se especifican en las fichas técnicas proporcionadas por el proveedor.

Costo de Energía Intercambiador de iones con resina catiónica / Cantidad:

De acuerdo a lo consultado el costo de la energía en Colombia por Kw esta en \$150. De acuerdo a consulta realizada en cuanto a la energía que consume por hora un intercambiador iónico industrial es de KW/hora 1.92; es decir que en 24 horas consume un promedio de 46,08 KW al día durante un mes consume 1.382,4 KW/ x mes para un promedio en pesos mensuales en cuanto al costo de energía de \$207.360.

Costos de Mantenimiento

Los costos de mantenimiento se generan por el mantenimiento preventivo anual para los equipos 120.000 siempre y cuando no se tenga que invertir en piezas desgastadas.

Resina Intercambio Ionico Cationico Resintech Mbd-10 X Litro COSTO \$ 77000

Ilustración 17 Lista de precios



CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PRECIO MN
601158	Resina Aniónica PFA-300, pie³	15,130.00
601159	Resina Aniónica PFA-400, pie³	12,520.00
601150	Resina Cationica C-100E, pie³	3,970.00
601179	Resina Cationica C120ELT, pie³	3,105.00
601170	Resina Cationica SST-60, pie³	8,605.00
601160	Resina Cationica C-100, pie³	4,755.00
601173	Resina Cationica C-100H, pie³	4,315.00
601172	Resina Lecho Mixto NRW-37, pie³	12,545.00
601193	Resina Cationica Pentair, pie³	2,950.00
601194	Resina Cationica Alamo Brand A-4000, pie³	2,950.00

Fuente: NOVEM sistemas de agua, 2016

CAPÍTULO 9

FUTURO PROSPECTIVO DE LOS INTERCAMBIADORES IÓNICOS

El creciente interés por los intercambiadores iónicos a nivel industrial y los avances tecnológicos que se han dado alrededor de la historia en estos potabilizadores de agua apta para el consumo, claramente se debe a la utilidad de estos como disolventes, catalizadores y co-catalizadores en reacciones iónicas y en otros procesos en los cuales impliquen el uso de este tipo de medios ante el proceso de purificación del agua.

Se observa una excelente prospectiva de estos productos en el país, ya que en Colombia existe capacidad científica, tecnológica y de innovación aplicable a la adopción o desarrollo de tecnología que puede ser empleada en el sector industrial y químico básico. Como se manifestara anteriormente, el sector es relativamente rígido en cuanto a la aplicación de verdaderas innovaciones de proceso o desarrollo de nuevos e innovadores intercambiadores iónicos. Esto teniendo en cuenta los intercambiadores iónicos han sido denotados como "solventes de diseño" debido a que tienen el potencial de ser sintetizados de acuerdo a las propiedades que se desee en una aplicación en especial, lo cual se logra mediante una selección adecuada y sistemática del tipo de catión y anión que posteriormente conformarán el líquido iónico.

Esto origina la posibilidad de realizar un diseño personalizado del solvente para cumplir con los requisitos específicos para un tipo de reacción en particular en el área de la química de reacciones, lo cual no se puede lograr con el uso de solventes orgánicos

volátiles. Sin embargo, existe algunas barreras para el uso de los líquidos iónicos debido a la variedad desconcertante de cationes y aniones disponibles y la falta de un manual de estos nuevos solventes, lo cual se manifiesta en un trabajo laborioso en la etapa de investigación para obtener un líquido iónico que genere un impacto eficiente en un proceso específico.

Todo lo anterior teniendo en cuenta que el mercado mundial del intercambio iónico, que fue estimado en US\$ 1,54 billones en 2014, se proyecta que será de US\$ 2,46 billones hacia el año 2022, esto representa una tasa de crecimiento anual compuesta de aproximadamente un 6% en ese período, según información aportada por Statistics MRC, una empresa de investigación de mercado con sede en Maryland. Sus analistas ven que una creciente demanda de la energía nuclear y del aumento de la rigurosidad de las normas ambientales le darán impulso al mercado, que continúa en crecimiento. Esto se ve particularmente en los mercados de la generación de energía eléctrica y del tratamiento de aguas residuales, y también en la región del Asia – Pacífico. La industria necesita encontrar nuevas aplicaciones para la tecnología, para poder seguir experimentando un continuo crecimiento.

La primera investigación enfocada en la utilización de líquidos iónicos se desarrolló a mediados del año 2007 por Fan Hong-Fu. Posteriormente en el año 2009, Fan realizaron la aplicación de un líquido iónico. Otra de las ventajas que poseen estos fluidos es que podrían ser re-utilizados ocasionando una reducción en los costos del proceso, pero se requiere de la ejecución de estudios que indiquen este hecho. Por otro lado, la planeación y ejecución de nuevos estudios futuros enfocados en las áreas de sostenibilidad,

factibilidad económica y de impacto ambiental, permitirán conocer si esta tecnología tendrá los pergaminos necesarios para surgir como una nueva alternativa de mejoramiento parcial de crudo pesado y extrapesado.

En síntesis general, el desarrollo de los intercambiadores iónicos han generado un nuevo campo de aplicación para futuras investigaciones en diferentes procesos que implique el uso de solventes, catalizadores, co-catalizadores, tales como: separación, extracción, síntesis orgánica, catálisis de metales de transición, reacciones químicas bioquímicas y otros procesos en los cuales posiblemente puedan promover un beneficio.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Lo anterior permite analizar la importancia que se le ha venido dando a los intercambiadores iónicos, no solo en el área industrial, sino en el tratamiento de aguas sean residuales, lluvias o de yacimientos acuíferos. Se aprecia a lo largo del estudio la importancia de ionizar el agua a fin de quitar las impurezas que pueden ser perjudicial para la salud, así mismo se observa que existen varias formas de ionizarla a través de los intercambiadores iónicos. En cuanto a la tecnología esta se da en razón de quienes las fabriquen o las marcas que se representan a nivel mundial.

La historia de los intercambiadores iónicos es algo que llama la atención puesto que permite viajar a través del tiempo y observar como desde tiempos bíblicos ya la humanidad se preocupada por purificar el agua. El proceso histórico señala cada etapa en la historia de la humanidad donde el ser humano empieza a tomar interés por consumir un agua apta sin impurezas perjudiciales para la salud.

De igual forma se logró analizar que existen iones comunes que se encuentran en la mayoría de las agua incluyen los cationes de carga positiva; calcio magnesio cationes que generan dureza, los cuales hacen que el agua sea “dura” y sodio. Los aniones de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfato, cloruro, y silicio. Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de estas impurezas por varias razones: las resinas poseen una alta capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y se regeneran fácilmente, los efectos

de las temperaturas son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto para las grandes como las pequeñas industrias.

La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo está presente un agente flotador para mantener.

En síntesis general, se puede decir que los intercambiadores iónicos son la base de la potabilización del agua, analizando la importancia que se le ha venido dando y la utilidad que estos tienen no solo en el tratamiento de aguas, también en las diferentes industrias si realmente queremos obtener procesos que generen un mínimo de impacto al medio ambiente necesariamente tenemos que realizar grandes inversiones de capital en nuevas tecnologías y estudios de investigación, así se presente cierta disminución en la rentabilidad económica del proceso.

El desarrollo de estas nuevas tecnologías ha generado un nuevo campo de aplicación para futuras investigaciones en diferentes procesos en los cuales posiblemente puedan promover un beneficio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agamez C. (2014) Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de malagana (bolívar). Universidad De San Buenaventura Seccional Cartagena. Disponible en <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:E84BqQfVRegJ:biototecadigital.usbcali.edu.co/jspui/handle/10819/2797+&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=co>

Aquatracta, (2014) intercambiadores iónicos con resina. Disponible en <http://www.aquatracta.com/Industria.IO.html>

Arboleda T. (1981) Teoría y diseño y control de los procesos de clarificación del agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Cepis Ediciones. Edición impresa.

Baird C. (2001) Química Ambiental. Editorial Reverte S.A España.

Canter L. (1998) Manual de Evaluación de impacto Ambiental: Técnicas para la elaboración de los Estudios de Impacto. Editorial Mc.Graw Hill. España.

Concepción R. (2015) Intercambio iónico. Serie: tratamientos terciarios. España. Disponible en <https://www.wateractionplan.com/documents/186210/200858/FT-TER-006-INTERCAMBIO+IONICO+A201515.pdf/7ad263b8-d51c-44b3-a366-9598794c596e>

Cruz C. (2014) Curso de Sistemas de Potabilización con Clarificadores de Contacto. Universidad del Valle Facultad de Ingeniería Área de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Disponible en https://campusvirtual.univalle.edu.co/moodle/pluginfile.php/655406/mod_resource/content/4/introduccion%20%20los%20clarificadores.pdf

De la Cruz R. (2015) Tratamiento terciario por resina de intercambio iónico. Disponible en <http://www.monografias.com/trabajos104/tratamiento-terciario-resina-intercambio-ionico/tratamiento-terciario-resina-intercambio-ionico.shtml>

Degremont, (1979) Manual técnico de agua. Ediciones S.A. Urmo.

Di Bernardo L. (1993) Métodos e técnicas de tratamiento de agua. Volumen II. Editorial Novos Diálogos. Río de Janeiro, Brasil.

Eskel N. (1979) Tratamiento de Aguas para Industria y otros Usos. CIA Editorial Continental S.A. México.

Eskel N. et al.(1990) Tratamiento de Agua para la Industria. 2ª edición; Editorial Continental.

Etienne G. (2009) Potabilización y tratamiento de agua Diseños con Excel. 1ª edición electrónica. Usa. Disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/potabytrat.pdf>

Fernández J. (2013) Aplicación de la tecnología de cambio iónico en la purificación de ácido fluorhídrico. Universidad de Cantabria, Departamento de ingeniería química y química inorgánica. España. Disponible en <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/3054/TesisJLFH.pdf?sequence=1>

Freeman H. (1995) Pollution Prevention in Electroplating Industries. Editorial McGraw-Hill. New York.

Fundación Chile, (2014) Tecnologías de intercambio iónico para acondicionamiento y tratamiento de aguas. Disponible en http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_18.pdf

Gordon M. (1973) Purificación de aguas, tratamiento y remoción de aguas residuales. Editorial: Limusa 1ra edición México.

Greene B. & Mortonsimons H. (1988) Educación para la Salud. Editorial Interamericana. México.

Hidalgo F. & Guaman M. (2006) Diseño y construcción de un desmineralizador de lecho múltiple. Universidad de Guayaquil. Ecuador. Disponible en <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/746/1/976.pdf>

Inerco, (2000) Planta purificadora de agua. Disponible en <http://www.inerco.com/es/inerco-corporacion/tecnologia/tratamiento-de-aguas/intercambio-ionico>

Jáuregui S. (2004) Promoción de la Salud y Prevención de la Enfermedad. 2ª edición. Editorial Panamericana. Bogotá.

Kemmer N. (1989) Manual de la Nalco Chemical Company. Editorial Mc Graw Hill – México. Tomo III. Disponible en <http://biblos.uamerica.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=25403>

Lennerch, (2010) Pruficación del agua. Disponible en <http://www.lenntech.es/aplicaciones/proceso/desmineralizada/agua-desionizada-desmineralizada.htm>
www.chemitechno.com/Suavizacion.html

Letterman R. (2002) Calidad y tratamiento del Agua Manual de Suministros de aguas comunitaria. Editorial Mc Graw Hill – España.

Márquez E. (2015) Tratamiento del agua mediante resinas de intercambio iónico. Conceptos básicos. Disponible en <http://es.slideshare.net/FondoVerde/tratamiento-del-agua-mediante-resinas-de-intercambio-inico-conceptos-bsicos>

Mc Mahon R. (1989) Administración de la Atención Primaria de Salud. Editorial Pax. México.

Mitchell M., Stapp W & Bixby K. (1991) Manual de campo de Proyecto del Río: una guía para monitorear la calidad del agua en el Río Bravo. Segunda edición. New Mexico, USA.

Pedraza N. (2003) Plan de Acción para Formadores Ambientales. Editorial Magisterio. Colombia.

Perry H. (1992) Manual del Ingeniero Químico. 6ta edición, Tomo IV sección 14 McGraw-Hill. México.

Rodríguez R. (2008) Gestión y Tratamiento de Agua .Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. Disponible en http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/Aguasubt_polo_petr.pdf

Rotek. (2005) Lecho mixto desionizador. Disponible en <http://www.waterpurificationsystem.com.tw/es/mixed-bed-deionizer.html>

Shepard T. (1992) Manual de Agua para usos Industriales. Editorial Limusa, SA. México.

Valencia J. (2000) Teoría y práctica de la purificación del agua. 3ª Ed. MCGRAW-HILL / Interamericana de Colombia. Bogotá.

Vargas L. (2004) Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I. Organización Panorámica de la Salud. Disponible en http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomol/ma1_tomo1_indice.pdf