

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“Instalación y Evaluación de un Ablandador y un Filtro de
Partículas para el Laboratorio de Control de Calidad de la
Facultad de Ingeniería Química”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Condori Mamani, Alfredo

Heredia Quispe, Martha

Mamani Ramos, Luis Cleofer

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO - PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Instalación y Evaluación de un Ablandador y un Filtro de Partículas para el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química”

TESIS PRESENTADA POR:

Condori Mamani, Alfredo

Heredia Quispe, Martha

Mamani Ramos, Luis Cleofer



PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE: INGENIERO QUÍMICO

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 03 DE FEBRERO DEL 2017

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE	:	..... Dr. Gregorio Palomino Cuela
PRIMER MIEMBRO	:	..... M. Sc. Janette Rosario Ramos Pineda
SEGUNDO MIEMBRO	:	..... Mg. Higinio Alberto Zúñiga Sánchez
DIRECTOR DE TESIS	:	..... M. Sc. Moisés Pérez Capa

ÁREA: Procesos industriales

TEMA: Diseño de equipo de proceso

LÍNEA: Tecnología ambiental y recursos naturales

DEDICATORIA

*A Dios, por brindarme la
oportunidad de obtener un
logro más, y seguir en este
sendero siempre en su
compañía siendo mi fortaleza
en los momentos difíciles.*

*A mi hija por las alegrías y
satisfacciones que proporciona
su cariño, por estar a mi lado
sin importar las circunstancias,
regalándome siempre una
sonrisa que reconforta mi alma
y me alienta a seguir adelante
persiguiendo mis sueños.
Alfredo*

...Los locos, como los genios, se levantan, a menudo catastróficamente, sobre las limitaciones de su patria o de su tiempo, entrando en esa tierra de nadie, disparatada y mágica, delirante y tumultuosa, que los buenos ciudadanos contemplan con sentimientos cambiantes; desde el miedo hasta el odio, desde el aparente menosprecio hasta una especie de pavorosa admiración. Y sin embargo, esos individuos excepcionales, esos hombres fuera de la ley y de la patria conservan, a mi parecer, muchos de los atributos de la tierra en que nacieron y de los hombres que hasta ayer fueron sus semejantes aunque como deformados por un monstruoso sistema de proyección hecho con lentes torcidos y con amplificadores desafortunados. ¿Qué clase de loco podía ser el Quijote sino un loco español? Y aunque su talla descomunal y su demencia lo universalizan y de alguna manera lo hacen comprensible y admirable a todos los hombres del mundo, hay en él rasgos que únicamente podían darse en ese país a la vez brutalmente realista y mágicamente descabellado que es España

Dedico esta tesis a mi familia que tenazmente me alentó en los momentos de descreimiento. Sin ellos, nunca habría tenido fuerzas para llevarla a cabo. Y aunque habrían merecido algo mejor. Aun así, con todas sus imperfecciones, a ellos les pertenece. A Sebastián, por impulsarme a seguir caminando

Martha

Quiero dedicar esta tesis a Dios por estar conmigo en cada paso, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a todas aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante este periodo.

A mis padres F. Javier Mamani Ramos y Francisca Ramos Chacón, por el esfuerzo inmenso en mi educación superior. Por enseñarme a conseguir mis objetivos. A mi esposa Susana e hijos Taylor y Dennis, por el apoyo, la tolerancia y sobre todo el cariño, por ser el soporte que he necesita en los más difíciles momentos.

Luis

AGRADECIMIENTOS

A los docentes de la FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA por la formación profesional impartida durante el período académico.

Al *ing. Moisés Pérez Capa*, por el compromiso asumido como Director de la tesis, así mismo, a los señores miembros de los jurados conformados por: *Dr. Gregorio PALOMINO CUELA*, *Ing. M.Sc. Janette Rosario PINEDA RAMOS*, *Ing. Mg. Higinio Alberto ZUÑIGA SANCHEZ*, quienes enriquecieron este trabajo con sus aportes y orientaciones. Así mismo un especial agradecimiento al *Ing. Jorge Aruhuanca Jefe de LOP* y al *Ing. Juan Ramón Mamani Jefe del Laboratorio de Control de Calidad*, por el tiempo y la paciencia.

Y a todos y cada uno de ustedes que directa e indirectamente fueron partícipes de este proyecto, haciendo de esta etapa un agradable recuerdo.

Alfredo
Martha
Luís

ÍNDICE

RESÚMEN	14
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO I	20
CONSIDERACIONES GENERALES.....	20
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.2. OBJETIVOS.....	21
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	21
1.4. ALCANCES:.....	23
1.5. ANTECEDENTES.....	23
CAPÍTULO II	27
FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS.....	27
2.1. AGUA.....	27
2.1.1. Definición.....	27
2.1.1.1. Propiedades.....	28
2.1.1.2. Sales Minerales.....	30
2.1.2. Dureza.....	31
2.1.2.1. Formación de la Dureza en la Naturaleza.....	32
2.1.2.2. Tipos de Dureza.....	33
2.1.2.3. Modos de Expresar da Dureza.....	34
2.1.3. Ablandadores O Suavizadores de Agua.....	35
2.1.3.1. Agua Dura.....	36
2.1.3.2. Procesos de Ablandamiento.....	37
2.1.3.3. Funcionamiento del Ablandador: Tipo Sodio.....	38
2.1.3.4. Salmuera para Regeneración.....	44
2.1.3.5. Elección del Ablandador.....	45
2.1.4. Intercambio Iónico.....	46

2.1.4.1. Reacción de Intercambio Iónico	50
2.1.4.2. Aplicaciones de los Intercambiadores Iónicos	52
2.1.4.3. Las Ventajas del Proceso Iónico	53
2.1.4.4. Cinética Química.....	56
2.1.5. Resinas.....	60
2.1.6.1. Tipos de Resinas	61
2.1.6.2. Resinas Orgánicas e Inorgánicas.....	61
2.1.6.3. Resinas Intercambiadoras en Ciclo Sódico:	62
2.1.6.4. Propiedades de las Resinas.....	68
2.1.6.5. Efectos de la Contaminación de una Resina	71
2.1.6.6. Criterios Técnicos para la Selección de Resinas.....	72
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	74
CAPÍTULO III	76
MÉTODOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN	76
3.1. CAUDAL DE AGUA REQUERIDO:.....	76
3.2. VOLÚMEN DE LA RESINA CATIONICA REQUERIDO.....	76
3.3. DETERMINACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO.....	76
3.4. CAPACIDAD OPERATIVA DE INTERCAMBIO	77
3.5. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE ABLANDADOR	77
3.6. VOLÚMEN DE REGENERACIÓN DE LA RESINA CATIONICA.....	79
3.7. FLUJO DE SALMUERA	79
3.8. VELOCIDAD DE REGENERACIÓN	79
3.9. CAUDAL DE DESCOMPACTACIÓN.....	80
3.10. VELOCIDAD DE DESCOMPACTACIÓN.....	80
3.11. VOLÚMEN DE LA SOLUCIÓN REGENERANTE	80
3.12. TIEMPO DE REGENERACIÓN	80
3.13. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA	81

3.13.	NÚMERO DE REYNOLDS PARA TUBERÍAS 1 pulg.	81
3.14	CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA PARA TUBERÍAS 1 pulg. ...	82
3.15.	PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS 1 pulg. (hf) (Mott1996):	82
3.16.	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ABLANDADOR DE AGUA.....	83
CAPÍTULO IV	.....	84
CÁLCULO DE INGENIERÍA	.....	84
4.1.	VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO	84
4.2.	CAUDAL DE AGUA REQUERIDO:	85
4.3.	VOLÚMEN DE LA RESINA CATIÓNICA REQUERIDO.....	85
4.4.	DETERMINACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO.....	86
4.5.	CAPACIDAD OPERATIVA DE INTERCAMBIO	86
4.6.	DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE ABLANDADOR.....	89
4.7.	DISEÑO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN	92
4.7.1.	Volúmen de Regeneración de la Resina Catiónica	92
4.7.2.	Velocidad de Regeneración	93
4.8.	RETROLAVADO	93
4.9.	VOLÚMEN DE LA SOLUCIÓN REGENERANTE	94
4.10.	TIEMPO DE REGENERACIÓN	95
4.11.	DIÁMETRO DE LA TUBERÍA.....	97
4.12.	NÚMERO DE REYNOLDS PARA TUBERÍAS 1pulg:	99
4.13.	CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA PARA TUBERÍAS	99
4.14.	PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS 1pulg. (hf)	99
4.15.	CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA DEBIDO A LA VELOCIDAD (h_v) PARA TUBERÍAS 1pulg.....	100
4.16.	CÁLCULO DE PERDIDA DE CARGA DEBIDO A LA VELOCIDAD	100
4.17.	ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.....	100
4.18.	EQUIPO DE RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA.....	101

4.19. SELECCIÓN EL TIPO DE ABLANDADOR.....	102
4.19.1. Altura Mínima de Lecho de Resina (h)	105
4.20. ALTURA DE LA PARED LATERAL MÍNIMA (H)	106
4.21. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERISTICAS DEL FILTRO DE SEDIMENTOS DE 100 MICAS.....	106
4.21.1. Requerimiento de la Resina de Intercambio Iónico	108
4.21.2. Selección de Tuberías.....	108
4.22. DIAGRAMA DE FLUJO CON BALANCE DE MATERIA	115
4.23. ANÁLISIS DE DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	116
4.24. COSTOS DE EQUIPO	119
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFIA	123
ANEXOS	126

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Datos Experimentales Promedio de la Obtención de Agua Blanda	.84
Cuadro 2: Especificaciones para el ablandador	.....96
Cuadro 3: Especificaciones de la Bomba	.....98
Cuadro 4: Cuadro comparativo	.....102
Cuadro 5: Análisis del Agua antes y después del Tratamiento	.....116
Cuadro 6: Resultados de los Ensayos	.....116

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Curva de la Cinética de la Reacción118
---	----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Molécula de Agua	.....27
Figura 2 Representación de una Molécula de Agua	.....29
Figura 3 Proceso de Ablandamiento	.....38
Figura 4 Iones que Elimina una Resina Catiónica	.....38
Figura 5 Posición de Servicio del Ablandador	.....40
Figura 6 Ciclo de Retrolavado	.....41
Figura 7 Ciclo de Regeneración de la Resina	.....42
Figura 8 Ciclo del Enjuague Lento	.....42
Figura 9 Ciclo del Enjuague Rápido	.....43
Figura 10 Ciclo del Llenado del Tanque de Salmuera	.....44
Figura 11 Ablandamiento por Intercambio Iónico	.....51
Figura 12 Representación de los Sitios Activos de una Resina	.....51

Figura 13 Fuga iónica en la regeneración co-corriente	56
Figura 14: Resina de Intercambio Iónico en Ciclo Sodio, en Proceso de Suavización del Agua y Durante el Paso de Regeneración de la Capacidad de Intercambio de la Resina	58
Figura 15 Proceso de Difusión de una Resina	61
Figura 16 Esquema de la reacción química en el ablandamiento	64
Figura 17 Capacidad Operativa de Intercambio	88
Figura 18 Tasa de Flujo de Retrolavado Vs Expansión del Lecho	93
Figura 19 Tanque Vertical Especial	101
Figura 20 Tanque Vertical Cerrado	102
Figura 21 Tanque Reactor	103
Figura 22 Cabezal Twin	104
Figura 23 Longitud que conforman la pared Lateral mínima	105
Figura 24 Filtro Sedimentador	106
Figura 25 Tubo sanitario PVC	110
Figura 26 Válvula de Bola	112
Figura 27 Accesorio de Polipropileno	113
Figura 28 Accesorios Pegables de PVC	113
Figura 29 Bomba Centrifug	114
Figura 30 Corrida Experimental del seguimiento cinético	117

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Ficha Técnica de la Resina Catiónica Fuerte Lewatit S 1567	127
Anexo 2 Análisis de Control de Calidad del Agua Suministrado al Laboratorio de Control de Calidad de la FIQ	129
Anexo 3 Tabla 9: Clasificación de Dureza.....	129
Anexo 4 Tabla 10: Regenerantes para el Intercambio Iónico	130
Anexo 5 Tabla 11: Propiedades Físicas de Intercambiadores Catiónicos Típicos	130
Anexo 6 Tabla 12: Densidad de Soluciones de NaCl	131
Anexo 7 Tabla 13: Valores de K para diversos accesorios	131
Anexo 8 Tabla 14: Tanque Vertical Especial.....	131
Anexo 9 Tabla 15: Características de las Tubería de PVC.....	132
Anexo 10 Tabla 16: Características Tubería de PVC	132
Anexo 11 Diagrama Modificado de Moody, para Obtener el Factor de Fricción	133
Anexo 12 Panel Fotográfico	134

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de optimizar el tratamiento de agua, por medio de un sistema de ablandador y un filtro de partículas en función de las propiedades físicas de la resina LEWATIT S 1567 de origen alemán, resina seleccionada para la remoción del calcio y magnesio cuya característica es catiónica fuertemente acida perteneciendo al grupo activo sulfonado, que usa como regenerante de NaCl al 10%.

El sistema de intercambio catiónico demanda un volumen de resina de dos pies cúbicos y una altura de lecho de 60%, el cual requirió una altura de la columna de 1,21 metros. La cantidad de agua de servicio que se debe tratar es de un caudal promedio de 8 GPM la cual demanda un tiempo de trabajo de 3 horas por día. Para descompactar el lecho de resina se requiere un caudal de retrolavado de 10 minutos, cuyo flujo va en co corriente. Con pruebas de carga efectuadas por medio de una bomba centrífuga de $\frac{1}{2}$ HP, se obtuvo eliminar la dureza de 478,11 mg/L a 2,48 mg/L representando un rendimiento del 99,48%, el pH se mantiene constante en 8,50.

En cuanto a La cinética o velocidad con que se efectúa la reacción de intercambio se ha observado que es sumamente rápida y ocurre en segundos, en este caso 15 segundos de trabajo de inicio del ablandador se observa una constante en la lectura de la dureza, 2,48 mg/L donde la adsorción de la concentración de la dureza es de 475,63 mg/L (ver cuadro 7), lo que implica que el trabajo del tanque de ablandamiento junto con la resina LEWATIT tiene una capacidad óptima, esto debido a que el catión tienen contacto con el grupo

funcional de la resina, esta alta velocidad de reacción se debe a que no es necesario romper enlaces químicos para que proceda la reacción. La velocidad de intercambio está en función de la movilidad del ión o su facilidad a difundirse en la estructura de la resina, determinando la eficiencia de la resina en su capacidad de intercambiar iones con el agua en su contacto

PALABRA CLAVE: Difusión, Remoción, Ablandamiento, Dureza, Intercambio Iónico, Resina Catiónica.

ABSTRACT

The present work was carried out with the aim of optimizing the water treatment by means of a softener system and a particulate filter according to the physical properties of the German resin LEWATIT S 1567, resin selected for the removal of calcium and magnesium whose characteristic is strongly acidic cation belonging to the sulfonated active group, which uses as a regenerator of NaCl 10%.

The cation exchange system requires a resin volume of two cubic feet and a bed height of 60%, which required a column height of 1,21 meters. The quantity of service water that must be treated is of an average flow of 8 GPM which demands a working time of 3 hours per day. To unzip the resin bed a backwash flow rate of 10 minutes is required, the flow of which is in co-current. With load tests carried out by means of a centrifugal pump of $\frac{1}{2}$ HP, the hardness was obtained to eliminate the hardness of 478,11 mg/L to 2,48 mg/L representing a yield of 99,48%, the pH is maintained constant in 8,50.

As for the kinetics or speed with which the exchange reaction is carried out, it has been observed that it is extremely fast and occurs in seconds, in this case 15 seconds of softener start work a constant is observed in the hardness reading, 2,48 mg/L where the adsorption of the hardness concentration is 475,63 mg/L (see Table 7), which implies that the work of the softening tank together with the LEWATIT resin has an optimum capacity, due to To which the cation has contact with the functional group of the resin, this high reaction rate is due to the fact that it is not necessary to break chemical bonds for the

reaction to proceed. The rate of exchange depends on the mobility of the ion or its ease of diffusion in the structure of the resin, determining the efficiency of the resin in its ability to exchange ions with the water in its contact

KEYWORD: Diffusion, Removal, Softening, Hardness, Ionic Exchange, Cationic Resin.

INTRODUCCIÓN

El ablandamiento de agua, es un proceso que 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 el 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. Para la reducción de los sólidos totales disueltos, es necesario utilizar tantas resinas de intercambio catiónico

Los pretratamiento varían de acuerdo al tipo de agua y al destino final que tendrá la misma, el mejoramiento de la calidad de agua que abastece al Laboratorio de Control de Calidad de la FIQ; cuyas características físico – químicas tiene un alto contenido de dureza (478,11 ppm) como carbonato de calcio, es por ello que proponemos una alternativa técnica, tratar esta agua mediante un ablandador con filtro de partículas para la remoción de la dureza, proceso que permitirá tratar el agua cruda y poder obtener agua blanda.

Los intercambiadores de iones suelen ser del tipo columna con flujo descendente. El agua entra por la parte superior de la columna sometida a una cierta presión, circula en sentido descendente a través del lecho de resina, y se extrae por la parte inferior. Cuando se agota la capacidad de la resina, la columna se somete a un ciclo de lavado a contracorriente para eliminar los sólidos atrapados y proceder a una posterior regeneración. La resina de intercambio catiónico se regenera con cloruro de sodio

El presente trabajo tiene como fin instalar y evaluar el ablandador catiónico, para la remoción de la dureza y así mismo permitir alargar la vida útil de los equipos manteniéndolos en vigencia sin ningún tipo de interrupciones ni averías realizando la prestación de servicios a la comunidad. Las tuberías se obstruyen en un tiempo más corto de lo normal, debido a la formación de depósitos de sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio principalmente. En ocasiones esta oclusión es tan persistente que es más conveniente cambiar toda la tubería que limpiar ésta, con el consiguiente gasto que involucra dicha situación. Debido a que la conductividad térmica de los depósitos de calcio y magnesio es sumamente baja, para calentar el agua se requiere de cantidades excesivas de calor, el metal se sobrecalienta y se desgasta prematuramente por fatiga mecánica.

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua natural por su formación geológica del subsuelo tiene alta dureza como carbonato de calcio (478,11 mg/L), problema tecnológico en el que el agua dura requiere un tratamiento químico, la evolución tecnológica nos permite tratar el agua para adecuar para su propio uso. Contar con un ablandador de agua puede prevenir efectos negativos causando un alto riesgo de depósitos de cal en los sistemas de agua. Debido a la deposición de la cal las tuberías se bloquean y la eficiencia de los equipos a los cuales abastece se reduce, esto incrementa costos en el calentamiento del agua sobre un 15 a un 20%.

El agua suministrada al Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la UNA-PUNO es muy dura, se tiene una dureza de 478,11 mg/L, donde las tuberías de los equipos se obstruyen, debido a la formación de depósitos de sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio principalmente. En ocasiones esta oclusión es tan persistente que es más conveniente cambiar toda la tubería que limpiar ésta, lo que lleva a un gasto;

por ello el desarrollo del presente trabajo de investigación tecnológica de instalación del equipo de ablandamiento sea considerado una vía técnica para solucionar el problema del alto contenido de dureza y este sea apto para su uso en laboratorio.

1.2. OBJETIVOS

Instalar, evaluar los parámetros de operación de un ablandador y un filtro de partículas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ❖ Instalar el ablandador y el filtro de partículas para la producción de agua blanda.
- ❖ Determinar los parámetros de operación del ablandador y el filtro de partículas durante la producción de agua blanda.
- ❖ Determinar los parámetros químicos en el proceso de producción de agua blanda.
- ❖ Determinar la cinética de adsorción durante el proceso de ablandamiento del agua.

1.3. JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

El laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química, cuenta con equipos tales como el de análisis de proteínas (sistema kjeldahl), rota vapor y otros, cuya fuente de captación de agua se realiza desde un pozo, cuyo flujo másico contiene un alto contenido de dureza total (478,11 mg/L de CaCO_3), requiriendo un tratamiento químico. Utilizando el ablandador y filtro de partículas se logrará la remoción de la dureza, equipo que

recepcionará el agua cruda y suministrar agua blanda a los respectivos equipos con las que cuenta la Facultad, la cual favorecerá las prácticas que permitirán al estudiantado conocer el funcionamiento de diferentes equipos estimulándolo a investigar, generando nuevas propuestas tecnológicas mejoradas, con el fin de ser competentes en el campo de la ingeniería aplicando los conceptos sobre el diseño, funcionamiento y operación del ablandador y el filtro, en las diferentes etapas del proceso de obtención de agua blanda para diferentes aplicaciones. De esta manera lograr un mejor desenvolvimiento en el manejo y operación de equipos.

JUSTIFICACIÓN TECNOLÓGICA

El presente proyecto nos brinda una visión de la evolución de la tecnología, la misma que es posible adaptar a nuestro medio y contribuir con el desarrollo de nuevas tecnologías, contar con equipos como el ablandador y filtro de partículas cuya función es disminuir la dureza (478,11 mg/L) y aumentar la vida útil de los equipos existentes en el Laboratorio facilitando la realización de nuevos estudios tecnológicos en el área de tratamiento de aguas.

JUSTIFICACIÓN SOCIAL

El ablandador y el filtro de partículas serán instalados e implementados en el Laboratorio, además, considerando que el ablandamiento del agua es un proceso importante en el tratamiento de agua y necesario dentro del laboratorio, es fundamental contar con un equipo de este tipo que aportará en la formación profesional de los estudiantes del área y carreras afines los cuales

podrán realizar diversas investigaciones en el proceso de tratamiento de este líquido de vital importancia.

1.4. ALCANCES:

Con la implementación de un ablandador y un filtro de partículas se podrá obtener agua blanda para diversos usos dentro del laboratorio de Control de Calidad de la FIQ, contribuyendo con los siguientes alcances

BENEFICIARIOS

Estudiantes y profesionales de la Facultad de Ingeniería Química y Escuelas afines a la tecnología de aguas.

FINES

- ❖ De investigación: para desarrollar trabajos de investigación en el área de tecnología de aguas.
- ❖ Evitar el deterioro de los equipos con que cuenta el laboratorio de Control de Calidad.

PROPÓSITO

La remoción de iones de calcio y magnesio, principales causantes de la dureza en el agua.

1.5. ANTECEDENTES

Vargas *et al.* (2011), describe los resultados obtenidos en la **evaluación de reactores filtro de arena verde a presión para remoción de hierro y manganeso; y de un ablandador catiónico de zeolitas para remoción de dureza de agua**, proveniente del pozo tubular ubicado en la FIQ - UNA – Puno, que enmarca las siguientes consideraciones: el porqué de la realización del presente trabajo está basado en que, la calidad del agua proveniente del pozo

tubular no es apto para su consumo ya que sus valores de dureza total (439,56 mg/L), Fe (0,12 mg/L) y Mn (0,36 mg/L) no se encuentran dentro del margen de la Norma Técnica Nacional de calidad de agua ECA-002-2008. Se propusieron los objetivos de implementar equipos reactores automáticos para la remoción de hierro, manganeso y dureza total con el fin de poder evaluar el nivel de tratamiento físico químico del agua.

Como resultado de los análisis del agua del pozo tubular de la FIQ - UNA, el hierro, manganeso y dureza, se logró reducir los niveles de hierro con una eficiencia del 87,5 por ciento, manganeso en 91,67 por ciento y la dureza total 96,32 por ciento, evaluado con una velocidad de flujo de 18,92 L/min.

Valdez *et al.* (2012), tuvo como principal objetivo instalar, poner en funcionamiento y evaluar al demostrar las características y bondades de un sistema de tratamiento de agua en un tanque reactor de flujo ascendente con agitación mecánica. El módulo cuenta con un tanque reactor con un volúmen de 1 m³ de capacidad, es de tipo continuo, cuenta con un sistema de aireación, el caudal de alimentación es de 1000 L/h cuyo tiempo de residencia del agua a tratar es de 40 min; a medida que ingresa el agua las bombas dosificadoras de floculante y desinfectante, así como el corrector empiezan a dosificar automáticamente.

La agitación debe ser lenta pero turbulenta que permita un buen contacto entre las partículas sólidas disueltas para favorecer a la floculación y la sedimentación, para la clarificación se dispone de un colector para su acumulación en un tanque recolector. La dosificación correcta es:

- ❖ Dosificación de corrector; a un caudal operativo de 4,17 L/h, a una concentración de 4,5 mg/L y a una presión constante 10 psi.
- ❖ Dosificación de floculante; a un caudal operativo de 2,9 L/h y una concentración de 5 mg/L y a una presión de 14 psi.
- ❖ Todas estas operaciones a temperatura constante de 15 °C y un pH de 7,8 obteniendo a estas condiciones un rendimiento del módulo de 98 %.

Ticona (2004), en su trabajo de investigación, presenta la metodología requerida para la adsorción de contaminantes químicos del agua mediante la piedra puzolana, determinando su capacidad de adsorción y cualidad de intercambio iónico de cationes alcalinos térreos determinando la capacidad de intercambio iónico hacia cationes alcalinos y alcalinos térreos.

El trabajo consiste en determinar la posibilidad de utilizar la piedra puzolánica como adsorbente para eliminar contaminantes químicos del agua. Con esta finalidad se realizaron pruebas de laboratorio para determinar la extensión y velocidad de adsorción de cada uno de los iones elegidos como prueba Cu, Pb, Cd, Fe, Hg y las pruebas de ablandamiento de las aguas duras con puzolana tratada térmicamente a 300 °C y activada con HCl 6N.

León (2008), el objetivo del presente estudio es determinar si la dureza del agua afecta la salud de los pobladores de las irrigaciones de la parte baja del río Chili. Durante los meses de marzo y abril del 2008, un número representativo de residentes de las irrigaciones de La Joya - El Ramal, La Joya, Valle de Vítor, San Camilo, San Isidro y La Cano fueron encuestados acerca de la ocurrencia de cálculos renales (litiasis); como la estadística de morbilidad urogenital por sub-categoría por grupo etéreo y sexo, proporcionado por la

Dirección de Salud/Arequipa Sur. Al mismo tiempo, muestras de agua de cada irrigación, destinado al consumo, fueron tomados y analizados para determinar su dureza total del mismo. De un total de 260 personas encuestadas de las cinco irrigaciones, 49 de ellos (18,85%) dijeron haber padecido de litiasis. La dureza del agua (≥ 300 mg/L de CaCO_3) estuvo asociado a una alta prevalencia de litiasis ($p=0,044$). La morbilidad más alta por litiasis de cálculo al riñón y de uréter es de 28% que corresponde a las irrigaciones de San Isidro-San Camilo, debido a que las aguas de consumo humano no cuentan con ningún tipo de tratamiento potable; y en el valle de Vitor es elevado la incidencia por la enfermedad, debido a utilizan aguas de retorno al igual que en la Irrigación La Cano. Se concluye que el consumo prolongado de aguas que presentan concentraciones mayores a 120 mg/L de CaCO_3 presenta un factor de riesgo en la formación de cálculos en las vías urinarias en los pobladores de la parte baja del río Chili – Arequipa.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS

2.1. AGUA

2.1.1. Definición

Degrémont (1979), define que “es un recurso natural el cual depende de toda la actividad humana. Es una sustancia única y esta radica en su naturaleza, composición química y comportamiento. El agua de la naturaleza no se encuentra en estado puro, contiene en mayor o menor cantidad de sales, sustancias terrosas o metálicas, gases y otros minerales vegetales y animales que combinándose en suspensión dan al líquido distintas propiedades como dureza, turbiedad, color, alcalinidad”.

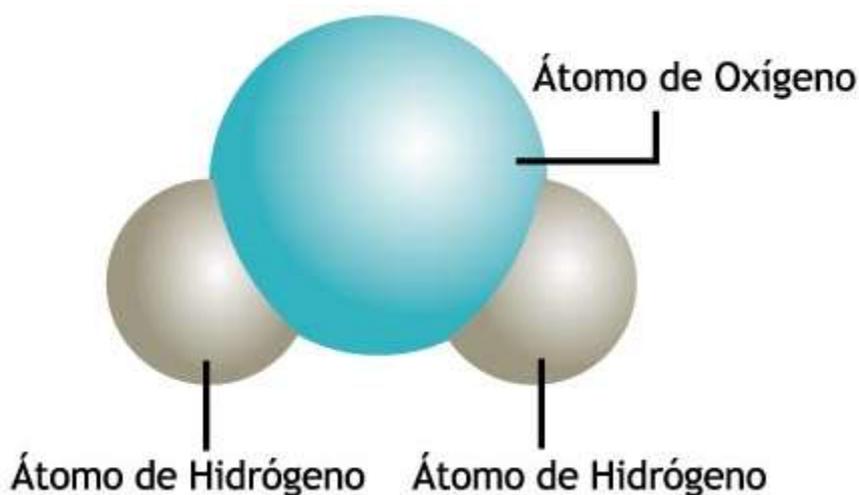


Figura 1 Molécula de Agua

Hidalgo *et al.* (2006), reporta que, agua, nombre común que se aplica al estado líquido del compuesto de hidrógeno y oxígeno H_2O . Los antiguos filósofos consideraban el agua como un elemento básico que representaba a todas las sustancias líquidas. Los científicos no descartaron esta idea hasta la última mitad del siglo XVIII. El agua es usada ampliamente en la vida diaria, se puede decir que es el recurso natural máspreciado y el más indispensable de nuestro planeta; donde la encontramos en sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso.

La experiencia ha establecido con bastante precisión especificaciones definitivas para satisfacer los requisitos de agua en la mayoría de las industrias; pero por razones técnicas se debe utilizar aguas naturales que contienen siempre impurezas

El agua es un líquido incoloro e inodoro, su fórmula química es H_2O (HOH) y está compuesta de un volúmen de oxígeno y dos de hidrógeno como se muestra en la Figura 1 el agua químicamente pura es difícil de encontrar debido a que es un solvente universal, porque muchas sustancias se disuelven en ella.

A causa de esta propiedad el agua se contamina frecuentemente con las sustancias con las que entra en contacto.

2.1.1.1. Propiedades

Hidalgo *et al.* (2006), plantea que, el agua pura es un líquido inodoro e insípido. Tiene un matiz azul, que sólo puede detectarse en capas de gran profundidad. A la presión atmosférica (760 mmHg), el punto de congelación del agua es de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y su punto de ebullición de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

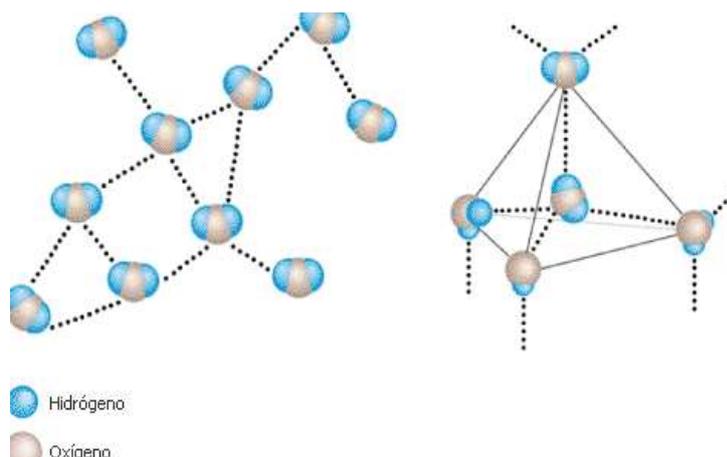


Figura 2 Representación de una Molécula de Agua

El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4 °C y se expande al congelarse. Como muchos otros líquidos, el agua puede existir en estado sobre enfriado, es decir, que puede permanecer en estado líquido, aunque su temperatura esté por debajo de su punto de congelación; se puede enfriar fácilmente a unos menos 25 °C sin que se congele.

Sus propiedades físicas se utilizan como patrones para definir, por ejemplo, escalas de temperatura.

El agua es uno de los agentes ionizantes más conocidos. Puesto que todas las sustancias son de alguna manera solubles en agua, se le conoce frecuentemente como el disolvente universal. El agua combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de los metales formando ácido y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas importantes.

Los enlaces de hidrógeno son enlaces químicos que se forman entre moléculas que contienen un átomo de hidrógeno unido a un átomo muy electronegativo (un átomo que atrae electrones). Debido a que el átomo electronegativo atrae el par de electrones del enlace, la molécula se polariza.

Los enlaces de hidrógeno se forman debido a que los extremos o polos negativos de las moléculas son atraídos por los polos positivos de otras, y viceversa como se muestra en la Figura 2. Estos enlaces son los responsables de los altos puntos de congelación y ebullición del agua.

2.1.1.2. Sales Minerales

Blanco (1994), menciona que, son moléculas inorgánicas de fácil ionización en contacto con el agua y se encuentran en la naturaleza, aunque también es posible hallarlas dentro de los seres vivos. Cuando las sales se disuelven en el agua, revelan la presencia de cargas positivas o negativas; es decir se evidencia la presencia de cationes y aniones.

Cervantes (2015), existen varias formas de clasificar las sales, según su constitución presentan diferentes tendencias por lo que se puede distinguir dos grandes grupos cuando se encuentran disueltas:

Grupo A: Sales INCRUSTANTES. Constituidas por:

Bicarbonato cálcico	$\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$
Bicarbonato Magnésico	$\text{Mg}(\text{CO}_3\text{H})_2$
Sulfato cálcico	CaSO_4
Sulfato magnésico	MgSO_4
Cloruro cálcico	CaCl_2

Grupo B: Sales NO INCRUSTANTES, constituidas por:

Carbonato sódico	Na_2CO_3
Sulfato sódico	Na_2SO_4
Cloruro Sódico	NaCl

Como se puede observarse, toda la sal incrustante contiene calcio y magnesio y el contenido total de los mismos constituyen la denominada DUREZA TOTAL.

2.1.2. Dureza

Cárdenas (2005), indica que, la dureza es una propiedad que refleja la presencia de metales alcalinotérreos en el agua. De estos elementos, el calcio y el manganeso constituyen los principales alcalinotérreos en aguas continentales, mientras que el bario y el estroncio se presentan, adicionalmente a los anteriores, en cuerpos de agua con algún tipo de asociación marina.

La dureza en el agua es el resultado de la disolución y el lavado de los minerales que componen el suelo y las rocas. Así, por ejemplo, el calcio, que representa el 3,5 % de la corteza terrestre, se encuentra en la naturaleza bajo la forma de mármol, yeso, dolomita y apatita, A su vez, el magnesio, que representa el 2,2% de la corteza terrestre, se encuentra en la naturaleza bajo la forma de magnesita, asbesto y dolomita.

Aunque los carbonatos de calcio y magnesio son frecuentes en la corteza terrestre, su solubilidad es muy baja, tal como puede deducirse a partir de sus constantes de solubilidad.

Aunque la dureza en el agua es una de las principales características de las aguas subterráneas (mayor grado de mineralización) y/o de la afectación de aguas continentales por aguas marinas, esta también puede estar asociada a los vertimientos de aguas residuales, por ejemplo, a las aguas residuales

agrícolas. Con respecto a la dureza, las aguas pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 1 (Ver Anexo 3)

En relación con la salud, la dureza en el agua no suele ser un problema ni para el consumo humano ni para el de las muchas otras especies. Sin embargo, tiene efectos adversos para fines industriales, como, por ejemplo, para el uso de aguas en calderas, debido a que las incrustaciones que ocasionan pueden provocar la explosión de las mismas.

2.1.2.1. Formación de la Dureza en la Naturaleza

Kirchmer (2008), menciona que, de los dos iones causantes de la dureza, el calcio casi siempre ocurre en mayor concentración que el magnesio, pero para nuestros fines de ablandamiento podemos decir, que la dureza del agua se debe a cuatro compuestos:

1. Carbonato de calcio (solución de piedra caliza, CaCO_3 , en aguas que contiene anhídrido carbónico, CO_2).
2. Carbonato de magnesio (solución de magnesita, MgCO_3 , en aguas que contienen anhídrido carbónico, CO_2).
3. Sulfato de calcio (en la forma $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, conocida como yesol).
4. Sulfato de magnesio (en la forma $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, conocida como sal de Epsom).

Otro punto importante es que la dureza del agua generalmente es mayor en aguas subterráneas que en aguas superficiales, esto se debe principalmente a que el agua subterránea sufre un mayor contacto con los minerales. Por lo tanto, en la mayoría de las plantas de ablandamiento, el agua

tratada es de pozo. El ablandamiento de agua superficial es generalmente más complicado porque además se necesita remover la turbiedad.

2.1.2.2. Tipos de Dureza

Araujo (2015), menciona que, existen dos tipos de dureza:

Temporal, dureza de carbonatos (CO_3^{2-}) o cálcica: constituida por carbonato ácido de calcio o magnesio. Estos bicarbonatos precipitan cuando se calienta el agua transformándose en carbonatos insolubles.

Permanente o Magnésica: sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-) y cloruros de calcio ($CaCl_2$) y magnesio ($MgCl_2$). Esas sales no precipitan por ebullición

La dureza se presenta siempre en términos de carbonato de calcio ($CaCO_3$) como alcalinidad.

La dureza del carbonato se determina por los resultados de la alcalinidad. Tal como:

Si la alcalinidad producida por bicarbonatos y carbonatos normales, expresada en términos de $CaCO_3$, es mayor que la dureza total, quiere decir que hay sales de sodio. Tales compuestos no producen dureza y, en ese caso, la dureza de carbonato será igual a la dureza total.

- ❖ Si la suma de la alcalinidad producida por bicarbonatos y carbonatos normales es igual a la dureza total, la dureza de los carbonatos también será igual a la dureza total.

Si la suma de la alcalinidad, producida por bicarbonatos y carbonatos normales, es menor que la dureza total, esta suma es igual a la dureza de

carbonatos (temporal), y la diferencia entre la dureza total y dicha suma es la dureza de no carbonatos (permanente).

$$\text{DUREZA TOTAL} = \text{DUREZA CÁLCICA} + \text{DUREZA MAGNÉSICA}$$

2.1.2.3. Modos de Expresar da Dureza

Kirchmer (2008), indica que, la forma más común de expresar la dureza es en mg/L como CaCO_3 . Esta se calcula multiplicando los miliequivalentes por litro de dureza por 50, el peso equivalente de CaCO_3 . Igualmente, es común expresar la dureza cálcica en mg/L como Ca y el magnesio en mg/L como Mg. otros modos de expresar la dureza, como gramos por galón y grado francés, son poco utilizados hoy en día. No son fáciles de interpretar.

Partes por Millón (ppm) como Miligramos por Litro (mg/L)

Owens (1995), menciona, partes por millón o miligramos por litro son términos intercambiables, el aspecto interesante de presentar un análisis en ppm o mg/L es que se tiene el peso real para cada ión en un millón de partes de agua. El peso molecular de sodio es diferente al del calcio por lo cual se debe encontrar una forma de hacerlos equivalentes, esto se logra dividiendo el peso del ión para su cara.

$$\text{peso equivalente} = \frac{\text{peso molecular}}{\text{valencia}} \quad \text{Ec. . 1}$$

Partes por Millón (ppm) de CaCO_3 (ppm)

Cervantes (2015), nos dice que, la manera de expresar el análisis de agua es la más utilizada en cálculos para determinar la capacidad de los iones;

CaCO_3 es una combinación de (Ca^{2+}) y (Mg^{2+}) , el peso equivalente se obtiene dividiendo el peso molecular $100,08/2 = 50,04$, su fórmula es:

$$\text{ppm de CaCO}_3 = \text{ppm de ión} * \frac{50}{\text{peso equivalente del ión}} \quad \text{Ec. .2}$$

Granos/Galón de CaCO_3

Cervantes (2015), indica, es conveniente tener los valores de dureza en esta unidad para poder realizar el cálculo de las capacidades de la resina debido a que este último dato por lo general se obtiene del fabricante y lo expresa en unidades inglesas (grain/gal) lo cual indica el número de galones de agua que puede ser tratado por un pie cúbico (pie^3) de resina.

Para convertir ppm de CaCO_3 a granos/gal de CaCO_3 se usa un factor el cual se obtiene de la siguiente relación:

1 grano de $\text{CaCO}_3 = 1/7000$ granos/libra = 0,0001428 libras

1 galón pesa 8,33 libras entonces:

$$1 \frac{\text{grano}}{\text{galón}} = \frac{0,0001428 * 1000000}{8,33} = 17,1 \text{ de CaCO}_3 \quad \text{Ec. 3}$$

2.1.3. Ablandadores O Suavizadores de Agua

Ramos (2012), menciona que, los equipos diseñados para remover calcio, magnesio y otros minerales del agua, evitando así muchos de los problemas del agua dura que se reflejan en ahorro significativo de energía, agua, vida de las tuberías y maquinaria.

El equipo de ablandamiento de agua utiliza el proceso de intercambio iónico, el cual es un proceso para intercambiar alguno de los cationes transportados por las corrientes de agua, actualmente en este proceso se

utiliza intercambiadores de resina sintéticas muy activas que en general son sustancias sólidas, prácticamente insolubles en el agua; al entrar en contacto con una solución (NaCl), estas sustituyen o se regeneran en forma reversible alguno de los cationes atrapados de la solución acuosa libre y a tal proceso se le llama regeneración de la resina.

2.1.3.1. Agua Dura

Aranda (2010), se refiere al contenido de dureza por parte de los carbonatos de calcio y de magnesio en el agua. Tanto el calcio como el magnesio son sólidos disueltos presentes generalmente en mayor concentración que otros sólidos disueltos. Son minerales que fácilmente se incrustan en las tuberías dejando sarro y tapándola.

Calcio y Magnesio.

Agamez (2014), indica, debido a que el carbonato de calcio es mucho menos soluble que el carbonato de magnesio, y estos dos es mucho menos soluble que el carbonato de sodio; es conveniente visualizar la alcalinidad como primeramente unida al calcio, en segundo lugar, al magnesio y tercero al sodio. Ya que al calentar el agua que contenga estas tres sales, el primero en depositarse es el carbonato de calcio, en seguida el carbonato de magnesio, mientras que el carbonato de sodio, debido a su extrema solubilidad no se separa en forma sólida a menos de que la solución se concentre fuertemente por evaporación.

Características físicas del agua cruda.

Agamez (2014), dice que, una de las características físicas del agua que más se estudia para su potabilización es la turbidez; esta es una medida del

grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión; mide la claridad del agua. La turbidez se mide en Unidades Nefelométricas de turbidez, o Nephelometric Turbidity Unit (NTU). El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

Cualquier impureza insoluble finamente dividida, cualquiera que sea su naturaleza, que pueda ser suspendida en el agua y disminuir su calidad, se le conoce colectivamente como turbidez.

Estas impurezas suspendidas pueden ser de origen inorgánico; arcillas, limos, carbonatos de calcio, sílice, hidróxido férrico, azufre, etc., o pueden ser de naturaleza orgánica; materia vegetal finalmente dividida, aceites, grasas, microorganismos, etc. Mientras más sucia parecerá que ésta, más alta será la turbidez. Por otro lado, el material que debido a su tamaño se asiente rápidamente se le llama sedimento.

2.1.3.2. Procesos de Ablandamiento

Kirchmer (2008), menciona que, hay dos métodos principales para el ablandamiento de agua; cal o cal – soda e intercambio de cationes. La selección entre los dos métodos depende de los factores tales como; calidad de agua cruda y costo de los productos químicos utilizados en el ablandamiento.

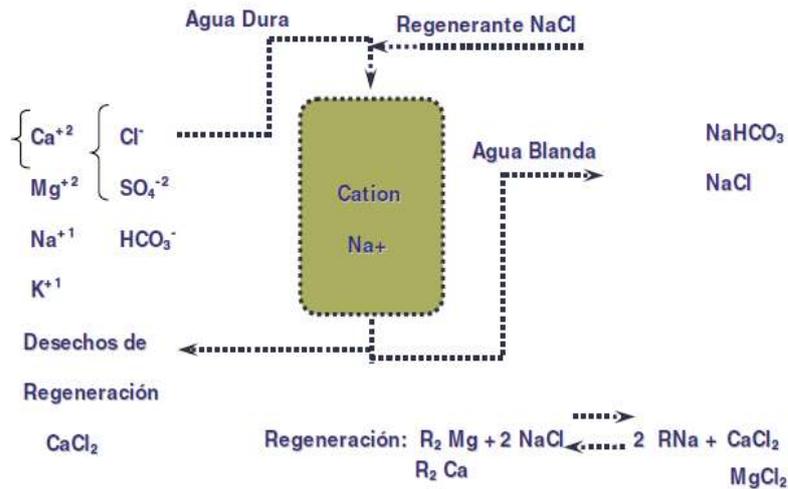


Figura 3 Proceso de Ablandamiento

2.1.3.3. Funcionamiento del Ablandador: Tipo Sodio

Los ablandadores de agua cumplen la función de remover la dureza del agua mediante un proceso que se conoce como intercambio iónico. Por medio del cual se realiza el intercambio iónico, la cual son granos de poliestireno con carga negativa, además esta resina es cargada con iones de sodio o potasio.

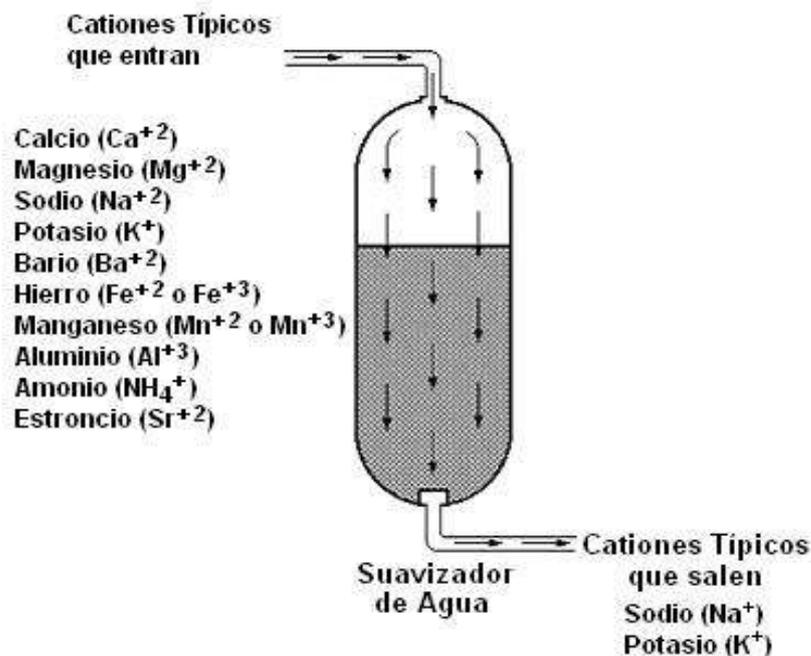


Figura 4 Iones que Elimina una Resina Catiónica

Los ablandadores de agua cumplen la función de remover la dureza del agua mediante un proceso que se conoce como intercambio iónico. Por medio del cual se realiza el intercambio iónico, la cual son granos de poliestireno con carga negativa, además esta resina es cargada con iones de sodio o potasio.

Cuando la dureza (Mg^{+2} y Ca^{+2}), entran en contacto con la resina los iones son capturados por las cargas negativas de la resina, liberando a los iones de Sodio "Na⁺" o potasio "K⁺".

En la Figura 4 adjunta se muestra los cationes típicos en el agua de alimentación y cuáles de estos iones son capturados por la resina catiónica.

Para que un ablandador de agua opere adecuadamente se requiere que el mismo realice los siguientes ciclos:

1. Ciclo de servicio.
2. Ciclo de retrolavado.
- 3. Ciclo de regeneración.**
4. Ciclo de lavado lento.
5. Ciclo de lavado rápido.
6. Ciclo de llenado del tanque de salmuera.

a) Ciclo de Servicio

Durante este ciclo el ablandador está en su operación normal, el agua pasa a través de la válvula instalada en la parte superior del tanque, el agua pasa a través de la resina desde la parte superior de la resina hacia el colector localizado en la parte inferior del tanque.

En este ciclo es cuando la resina retiene la dureza del agua.

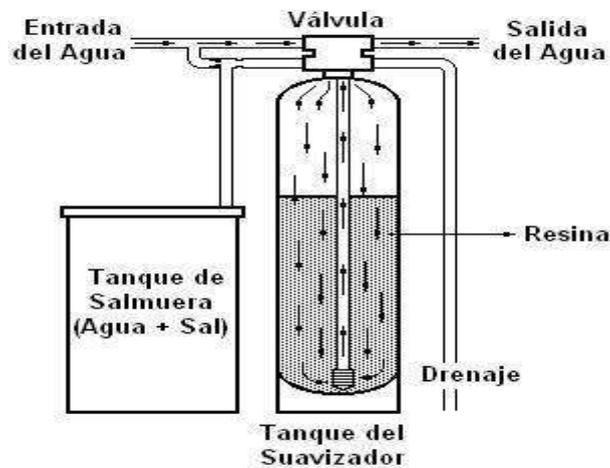
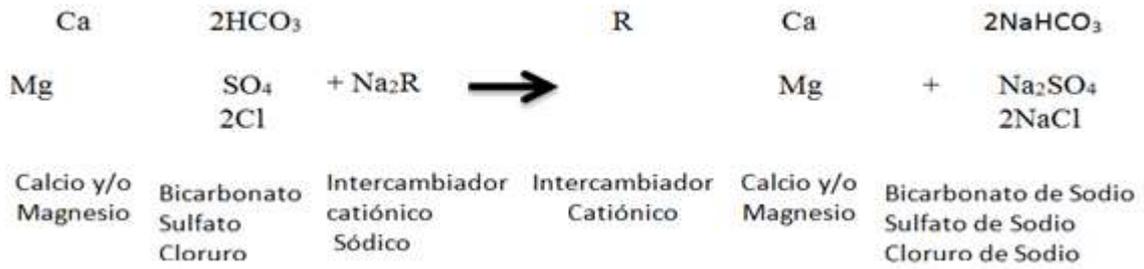


Figura 5 Posición de Servicio del Ablandador

b) Ciclo para Retrolavado

El ciclo de retrolavado es el primer paso para que se realice el proceso de regeneración de la resina. El agua pasa por la válvula y es encausada a fluir por el tubo central de aspiración de arriba hacia abajo, lo que provoca una expansión de la resina.

El flujo de agua ascendente a través del tanque del suavizador, elimina la turbidez y otros sedimentos que se acumulan durante el ciclo de servicio y los elimina del sistema por el drenaje.

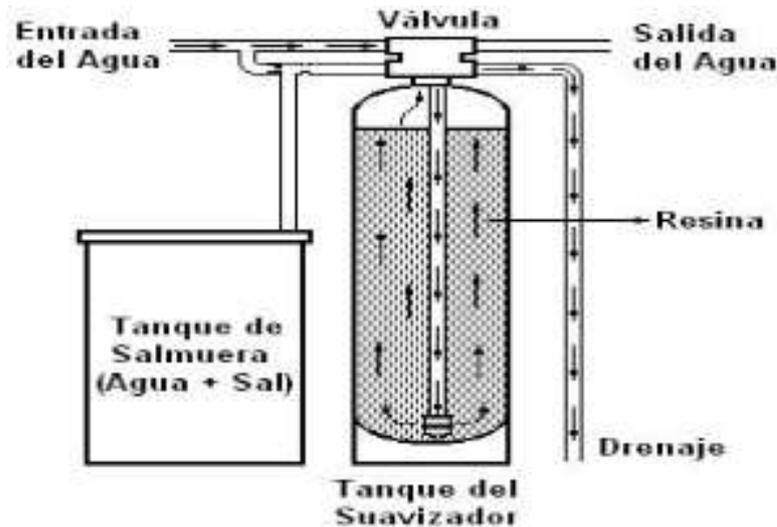
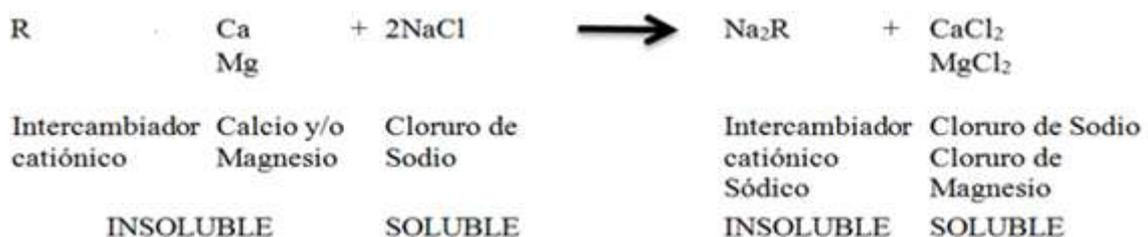


Figura 6 Ciclo de Retrolavado

c) Ciclo de Regeneración de la Resina

Durante este ciclo la salmuera que se encuentra en el tanque de salmuera, se aplica por medio de un inyector que la aplica a la resina. La aplicación es desde la parte superior hacia la parte inferior para luego pasar por el tubo central para que se descargue en el drenaje.

La función de este ciclo es eliminar los iones de Calcio (Ca^{+2}) y Magnesio (Mg^{+2}) por los iones de Sodio (Na^{+}), esto para que cuando el suavizador entre de nuevo en el ciclo de servicio pueda capturar la dureza del agua.



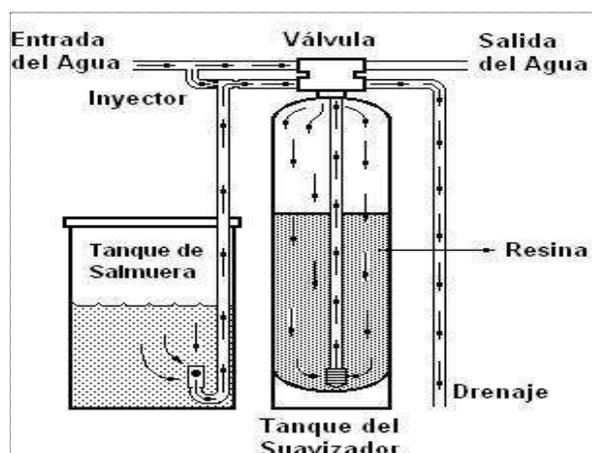


Figura 7 Ciclo de Regeneración de la Resina

d) Ciclo de Enjuague Lento

El ciclo de enjuague lento se inicia una vez concluido el ciclo de regeneración, el agua sigue fluyendo por el inyector que se encuentra en la parte superior del tanque del suavizador pasando por la resina, donde el agua es evacuada por el tubo central hacia el drenaje tal como se muestra en la Figura 7.

La importancia de este ciclo es eliminar el exceso de salmuera y de dureza que quede residual en la resina, la limpieza y eliminación de los residuos se hace por medio de un enjuague de la resina.

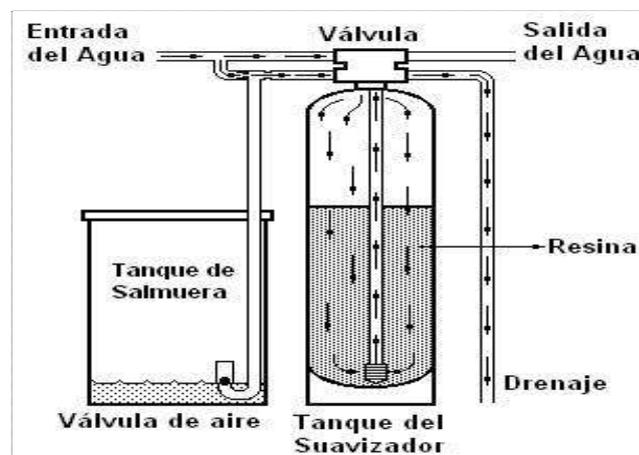


Figura 8 Ciclo del Enjuague Lento

e) Ciclo del Enjuague Rápido

Durante el ciclo del enjuague rápido, el agua filtra desde la parte superior del tanque hacia la parte inferior para ser evacuada por el drenaje por el tubo central de aspiración.

La función de este ciclo es compactar la resina para que quede listo para el ciclo de servicio.

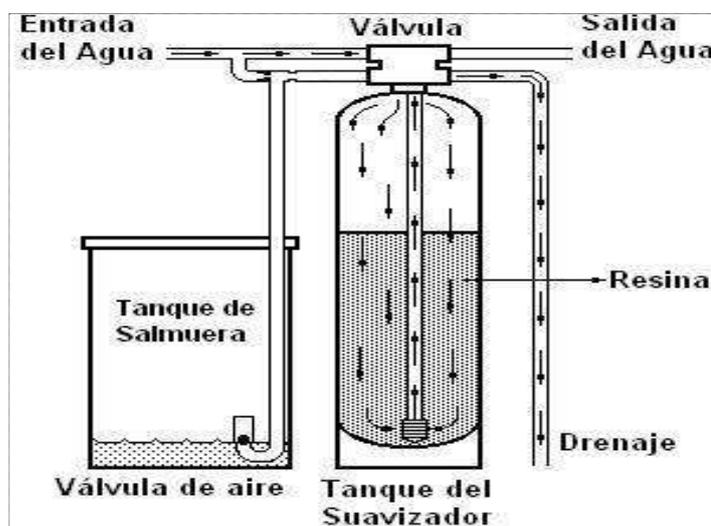


Figura 9 Ciclo del Enjuague Rápido

f) Ciclo de Llenado del Tanque de Salmuera

Durante el llenado del tanque de salmuera, el agua va directo al tanque de salmuera y el remanente del agua se va por el drenaje. Cada galón (3,785 L) de agua puede disolver hasta 3 libras de sal (1,36 kg).

El suavizador en este proceso continúa en el ciclo de enjuague rápido al mismo tiempo que está en el proceso del llenado del tanque de salmuera.

Una vez que concluye el llenado del tanque de salmuera el suavizador retorna al ciclo de servicio.

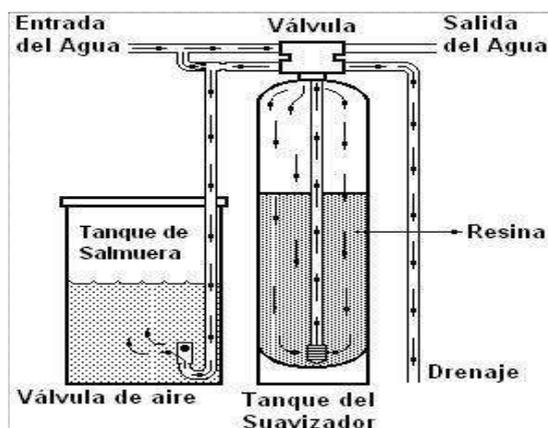


Figura 10 Ciclo del Llenado del Tanque de Salmuera

2.1.3.4. Salmuera para Regeneración

Para el buen funcionamiento de los ablandadores, es necesaria la regeneración a partir de una solución saturada de cloruro de sodio, teniendo en cuenta que existen algunos factores que afectan la eficiencia de la salmuera y por lo tanto de la regeneración de los ablandadores.

Factores que afectan la eficiencia de salmuera en los ablandadores

La eficiencia de la salmuera para ablandadores se define como el número de granos de dureza removida por libra de sal usada para regenerar. Claro está, asume un punto de fuga que generalmente es de un grano

La eficiencia teórica máxima significa que cada ión de sodio o de potasio en la salmuera regenerante, busca su camino hacia los sitios de intercambio de la matriz de la resina y el desperdicio de regenerantes, es pura dureza sin sodio ni potasio. Para calcular la eficiencia, simplemente se multiplican los granos por galón en la alimentación por el total de galones procesados entre cada corrida y se divide entre el número de libras de sal por pie cúbico usada para regenerar.

La siguiente tabla enumera una serie de factores que afectan la eficiencia de la salmuera:

Ajustes de sal: capacidad gal (US).

- ❖ Análisis de agua: dureza total (ppm) y sólidos totales disueltos (ppm).
- ❖ Selección del inyector: concentración de la salmuera (%masa) y flujo (GPM).
- ❖ Configuración de tanque: altura de cama (pie), espacio de tanque libre (pie), cama de grava (pie³).
- ❖ Selección de resina: tamaño (granos/galón) y función (propiedades fisicoquímicas).
- ❖ Flujo de servicio: GPM de agua suave.

2.1.3.5. Elección del Ablandador

Ramos (2012), para seleccionar un suavizador de agua se comienza con determinar la cantidad de dureza, Muchos de los análisis del agua expresan la dureza en partes por millón (ppm). Las partes por millón deben convertirse a granos por galón (gpg), para poder calcular el tamaño del suavizador. Para convertir la dureza expresada en ppm a gpg hay que dividir la ppm entre 17,1. Esta medida significa, cuántos granos de resina se necesitan para suavizar un galón de agua, la cual se obtiene a partir de la siguiente conversión:

$$1 \frac{\text{grano}}{\text{gal}} * \frac{1 \text{ g}}{15,4324 \text{ granos}} * \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} * \frac{1 \text{ gal}}{3,375 \text{ l}} = \frac{17,1 \text{ mg}}{\text{l}} = 17,1 \text{ ppm} \quad \text{Ec. 4}$$

En la selección del ablandador de agua hay que estar familiarizado con las capacidades de ablandador. Obviamente los esfuerzos realizados para calcular los granos totales necesarios para ablandar un volumen específico de

agua, con una dureza específica, sirven para seleccionar algún ablandador con base a su capacidad. Cuando se revisa la información técnica de un ablandador, se observará que la mayoría de ellos siempre vienen especificados a su capacidad máxima de intercambio en grano, hacer esto tendrá como resultado una ineficiente operación en términos de consumo de sal. La selección debe realizarse con base a la capacidad baja o media de granos del ablandador. Por lo que se recomienda cada vez que se seleccione un ablandador, se considere que tan eficiente se quiere diseñar.

Es importante mencionar que el empleo de la máxima, media o baja capacidad, solamente afecta en el consumo de sal, pero cualquiera de las tres que se seleccione, el ablandador elimina totalmente la dureza, esto se hace por el ahorro en la operación y no por la calidad del agua, siempre será ablandada.

2.1.4. Intercambio Iónico

Kirchmer (2008), reporta que, tres métodos son utilizados para el ablandamiento por intercambio iónico, ellos son: ciclo de sodio, ciclo de hidrógeno y desmineralización. Esta operación, comprende el intercambio entre los iones presentes en una disolución (contaminantes) y los iones de un sólido (resina). Las operaciones de intercambio iónico son básicamente reacciones químicas de sustitución entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución, los mecanismos de estas reacciones son tan parecidos a las operaciones de adsorción que se considera como un tipo especial de adsorción.

Ramos (2012), reporta que, el intercambio de iones es un proceso en el cual las partículas sólidas que contienen cationes o aniones intercambiables se

ponen en contacto con una solución electrolítica para cambiar la composición de la solución. Las mayores aplicaciones se ven en el ablandamiento del agua por intercambio de iones de calcio por iones de sodio y desmineralización de agua por eliminación de cationes y aniones.

La capacidad de intercambio de iones existe en algunos materiales naturales, tales como arcillas y zeolitas, pero la mayoría de los procesos utilizan resinas sintéticas de intercambio iónico. Dichas resinas se preparan a partir de polímeros orgánicos, tales como poliestireno unido de forma transversal en el cual se han añadido grupos ionizables.

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

La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo, está presente un agente flotador para mantener todo disperso. El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución de agua/sustancia química orgánica. El estireno/ DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotitas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño de

más o menos un milímetro. En ese momento inicia la reacción de polimerización a través de la adición de peróxido de benzoilo, el cual hace que las moléculas de estireno/DVB formen las esferas pequeñas de plástico que resultan.

El divinilbenzeno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fortaleza física, y sin el cual el estireno sería soluble en el agua. La esfera de poliestireno-DVB necesita ser químicamente activada para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera, cada uno posee una carga eléctrica fija, balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta, con libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga.

El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99 por ciento de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de la esfera.

Hidalgo *et al.* (2006), menciona que, la parte de los intercambiadores iónicos comerciales son de material plástico sintético, como polímeros de estireno y divinil benceno. Los intercambiadores iónicos para el tratamiento de agua son: en esencia insoluble y su vida útil esperada es de 5 a 10 años.

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.

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 deba estar disponible a un precio tal que haga rentable el proceso.

El intercambio iónico tiene 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.

Esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye de ordinario retrolavado regeneración, enjuagado y servicio.

Los intercambiadores iónicos se clasifican según el tipo de iones a retener.

Los iones presentes en el agua están divididos en aniones y cationes.

Los cationes principales son:

- ❖ Sodio Na^+
- ❖ Potasio K^+
- ❖ Calcio Ca^{++}
- ❖ Magnesio Mg^{++}
- ❖ Hierro Fe^{++}
- ❖ Manganeseo Mn^{++}

Estos elementos constituyen la “dureza”.

2.1.4.1. Reacción de Intercambio Iónico

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

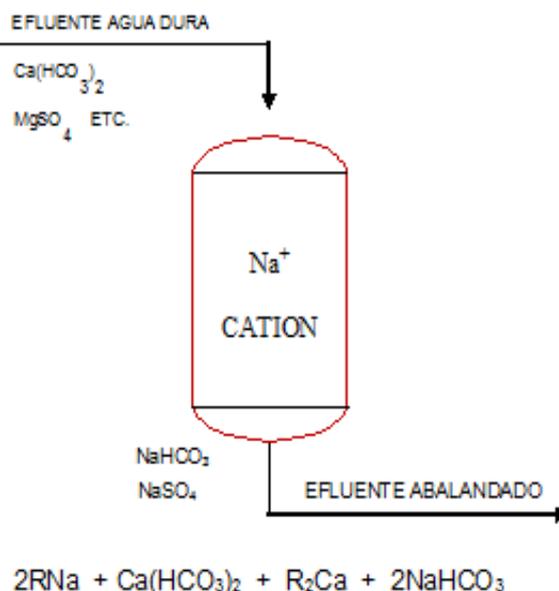


Figura 11 Ablandamiento por Intercambio Iónico

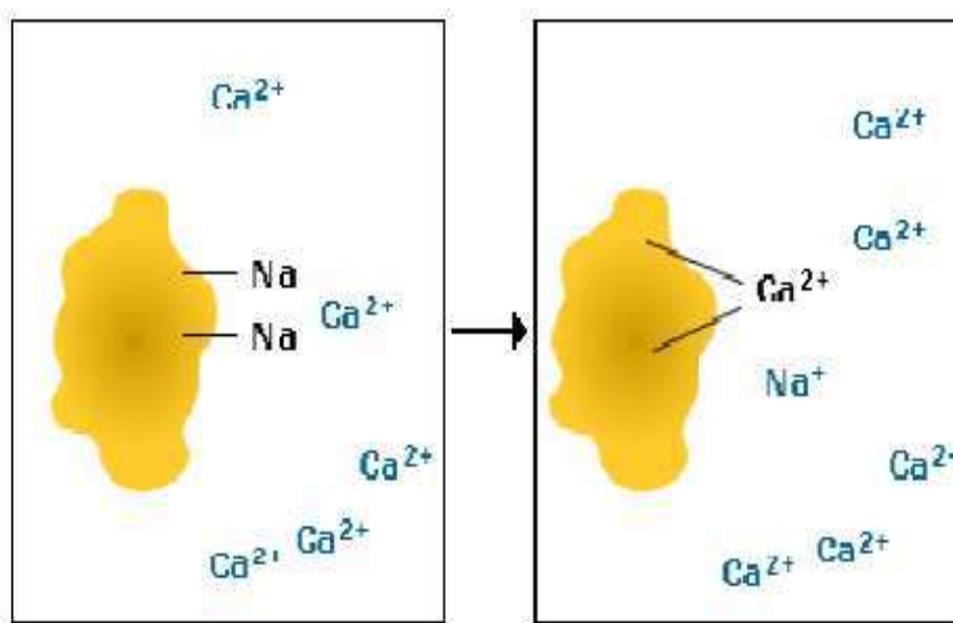


Figura 12 Representación de los Sitios Activos de una Resina

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.

Este movimiento se conoce como proceso de difusión como se puede apreciar en la figura 12. La difusión de un ión está en función de su dimensión, carga electrostática, 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.

Vergara (1988), dentro de una solución y el medio de un intercambio iónico se debe mantener un balance de cargas (electro neutralidad); debe mantenerse constante el número de cargas y no el número de iones dentro o en la superficie del gránulo de cambiador. Por ejemplo, un ión de Ca^{++} desplazado a 2 iones de Na^+ . Por lo tanto, la capacidad de intercambio de un intercambiador iónico se expresa por el número de cargas, es decir, de los equivalentes necesarios de los iones para mantener el electro neutralidad dentro de la fase sólida para un peso o VOLÚMEN determinados de material de intercambio iónico.

2.1.4.2. Aplicaciones de los Intercambiadores Iónicos

a) Eliminación de la Dureza del Agua

Hidalgo *et al.* (2006), reporta que, el paso del agua por rocas sedimentarias como la piedra caliza, provoca que dos de los iones más comunes en aguas naturales sean el calcio y el magnesio. Estos cationes divalentes cuando se encuentran en altas concentraciones son los responsables de la dureza del agua. El empleo de agua dura tanto para usos domésticos como industriales, provoca problemas de formación de depósitos e

incrustaciones y dificulta la acción de los detergentes, ya que se forman espumas y precipitados que reducen su eficiencia.

Las zeolitas se utilizan en la eliminación de la dureza de aguas domésticas e industriales por su capacidad de intercambiar los iones calcio y magnesio presentes en el agua por iones sodio alojados en su estructura. Por esta misma razón, estos minerales han reemplazado a los fosfatos en la composición de los detergentes, precisamente para mejorar su efectividad al secuestrar los iones calcio y magnesio del agua. El 80% de la producción de zeolitas se emplea en esta aplicación.

Además, el uso de zeolitas naturales tiene la ventaja de ser compatible con medidas de protección del medio ambiente.

En la eliminación de la dureza del agua también se emplean intercambiadores iónicos más versátiles como carbón sulfonado, resinas sulfonadas de fenolformaldehído y, en los últimos años resinas de poli estireno sulfonado. En las aguas naturales también hay una pequeña fracción de iones hierro y manganeso, cuya presencia es indeseable ya que pueden manchar los tejidos, formar depósitos en tuberías, tanques u otros elementos, así como inducir su corrosión. Estos iones pueden eliminarse mediante intercambio iónico, pero este proceso tiene ciertas limitaciones ya que ambos iones pueden precipitar en la superficie de la resina.

2.1.4.3. Las Ventajas del Proceso Iónico

Las ventajas del proceso iónico en el tratamiento de aguas son las siguientes:

Hidalgo *et al.* (2006), donde menciona las siguientes ventajas en el proceso iónico:

- ❖ 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 iónogénicos por unidad de peso o de volúmen.

Dado que las resinas se hinchan y contraen según la forma iónica, la referencia al peso es mucho más constante, pero se suele usar la capacidad volumétrica de la forma completamente hinchada, expresada en meq/L. La capacidad aparente es un valor práctico que indica cuántos iones de la solución pueden ser captados realmente bajo las condiciones específicas de operación.

La capacidad aparente de una resina catiónica para el Na^+ por ejemplo, depende del pH de la solución, de la concentración de Na^+ en la solución y del nivel de regeneración o volúmen de regenerante empleado. Pero, además, situada en el recipiente de intercambio, dependerá de la fuga de ión Na^+ que se considere admisible.

Es importante considerar que los vertidos de la regeneración son corrosivos y en general, aún después de mezclarlos, se precisará una neutralización previa al envío del efluente como vertido.

El sistema de regeneración seleccionado es de corriente paralela o co-corriente hacia abajo, donde la solución regenerante circula por el lecho de resina en la misma dirección a la corriente de alimentación del agua dura. Es decir, de arriba hacia abajo. Es la técnica más utilizada en el tratamiento de agua con resinas de intercambio iónico. Ya que supone un equipamiento más barato que el de contracorriente; sin embargo, este modo de operación utiliza el regenerante menos eficientemente que el segundo proceso, en efecto, se necesitaría gran cantidad de regenerante para mejorar el rendimiento del proceso.

Ventajas y desventajas de la configuración seleccionada.

VENTAJAS:

- ❖ El flujo hacia abajo sumado a la gravedad mantiene el lecho de resina compactado, asegurando un contacto mejor entre la resina y el líquido, lo que facilita y promueve el intercambio de iones.
- ❖ Esta configuración es más fácil de aplicar desde el punto de vista ingenieril.
- ❖ El sistema de equipamiento es económico.

DESVENTAJAS:

- ❖ Menos eficiente que la regeneración en contracorriente; las capas inferiores del lecho de resina son mal regeneradas, lo que hace que al

principio de la fase de agotamiento siguiente ocurra una fuga iónica, esto se puede apreciar en la Figura 14.

- ❖ Consume más regenerante; la única manera de reducir la *fuga permanente* es aumentar la cantidad de regenerante para dejar una proporción menor de resina agotada en la parte baja de la columna al final de la regeneración
- ❖ Se pueden formar canalizaciones en el lecho compactado debido a que no hay fluidización.

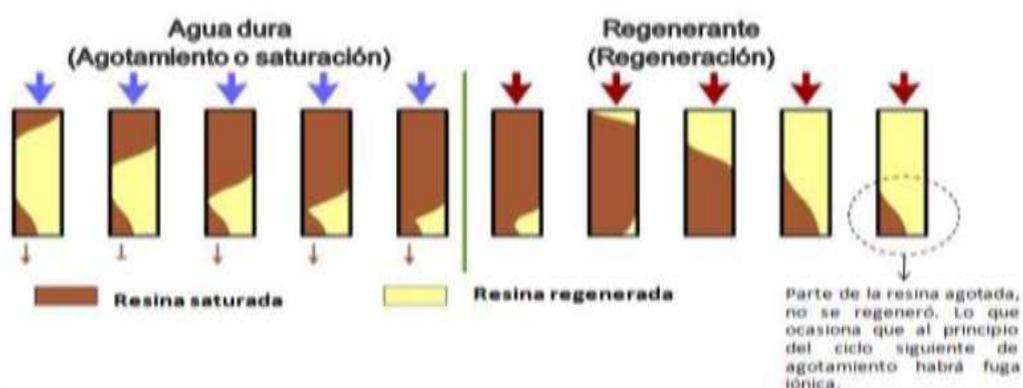


Figura 13 Fuga iónica en la regeneración co-corriente

2.1.4.4. Cinética Química

La cinética química trata del estudio de la velocidad, considerando todos los factores que influyen sobre ella y explicando la causa de la magnitud de esa velocidad de reacción.

a) Velocidad de Reacción

Se define como la variación del número de moles n , de un componente con respecto al tiempo, or unidad de volumen de reacción, es decir:

$$\text{Velocidad} \frac{1}{V} \frac{dn}{dt} = \text{Función} (A, B, C, \dots \text{Temperatura}) \quad \text{Ec. 5}$$

b) Orden de Reacción

El orden de reacción con respecto a una especie en particular, es el valor numérico de la potencia a la cual la concentración es elevada, por lo tanto, describe la relación experimental entre la velocidad de reacción y la concentración de dicha especie. El orden total de una reacción es la suma de los exponentes, es decir si:

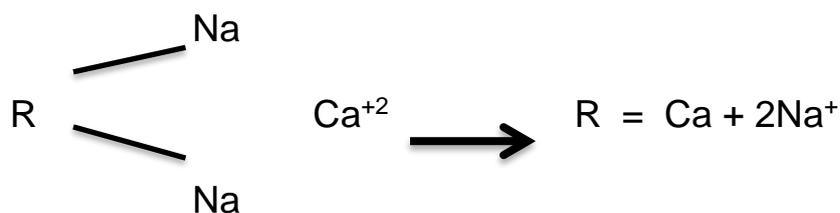
$$-\frac{dC_A}{dt} = KC_A^\alpha C_B^\beta C_C^\gamma \quad \text{Ec. 6}$$

Cinética y Equilibrio del Intercambio Iónico:

Una reacción de intercambio iónico es aquella en la cual un átomo o una molécula que han ganado o perdido un electrón, y que por lo tanto adquiere una carga positiva o negativa, se intercambia por otra partícula de igual signo, pero de naturaleza diferente. Esta última partícula inicialmente está ligada a la superficie de un cuerpo sólido inerte y pasa a solución y su lugar es ocupado por otra partícula que queda retenida (temporalmente) en la superficie del polímero o soporte.

Este soporte sólido puede ser una zeolita natural o un polímero sintético, aunque en la actualidad por su mayor capacidad de intercambio y menor costo, casi siempre se emplea una resina sintética.

Una reacción de intercambio en una resina puede ser representada de la siguiente manera:



R es la fase estacionaria o soporte (el copolímero de divinilbenceno) y Na^+ y Ca^{+2} son las especies que reaccionan.

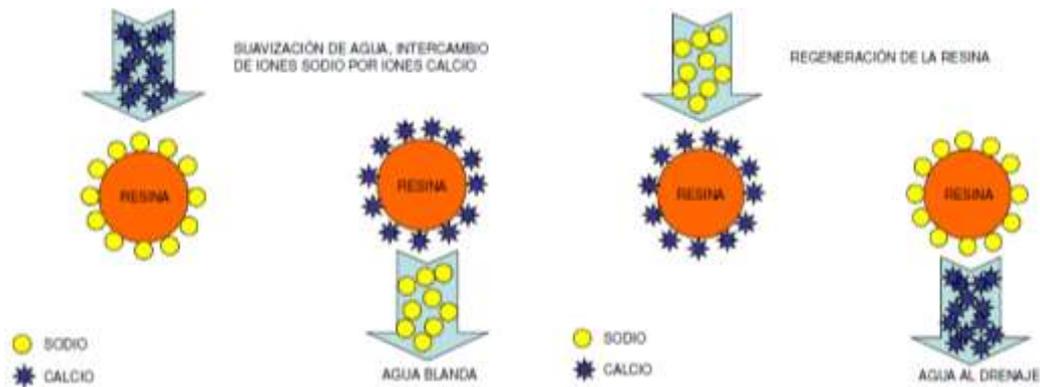
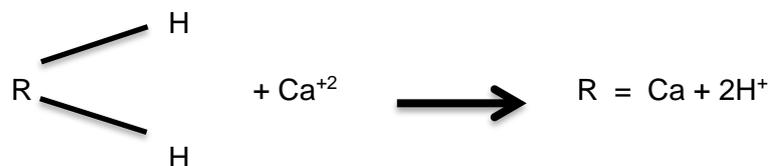


Figura 14: Resina de Intercambio Iónico en Ciclo Sodio, en Proceso de Suavización del Agua y Durante el Paso de Regeneración de la Capacidad de Intercambio de la Resina

En esta reacción química, el calcio Ca^{+2} se intercambia por su equivalente que son dos iones sodio Na^+ . Químicamente esta reacción es de intercambio o desplazamiento y el grado o extensión en que se lleva a efecto tal reacción depende de factores tales como: temperatura, pH, concentración de la especie en solución y naturaleza del ión. Para la reacción anterior, la constante de equilibrio sería:

$$K_1 = \frac{[\text{Na}^+]^2}{[\text{Ca}^{+2}]}$$

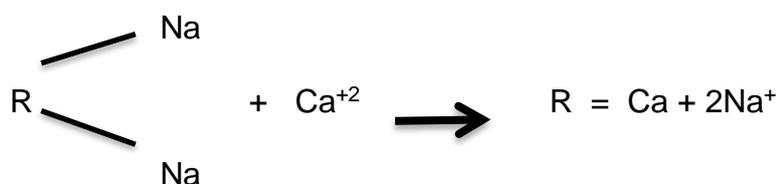
Para una temperatura determinada K, la constante de equilibrio, tiene un valor fijo que depende de la naturaleza del ión que es desplazado y del que se adhiere a la superficie del polímero. Por ejemplo, si sobre la superficie de la resina se tienen iones hidrógeno la reacción sería:



El valor de la constante de equilibrio es:

$$K_2 = \frac{[H^+]^2}{[Ca^{+2}]}$$

Es evidente que K_1 y K_2 serán diferentes para las dos reacciones anteriores. También, el desplazamiento o sentido de la reacción, de acuerdo al principio de Le Chatellier, dependerá de la concentración de las especies en solución, y este hecho se aplica para la regeneración de la resina intercambiadora. Por ejemplo: para regenerar una resina saturada en calcio se revierte el equilibrio incrementando sensiblemente la concentración de sodio y la reacción sería:



En otras palabras, si a una resina saturada en calcio se le agrega una solución de alta concentración de sodio, los iones sodio desplazan el calcio de los sitios activos de la resina y la resina se “regenera”.

En la práctica o en el “mundo real”, los iones que se adhieren a los sitios activos de la resina son de muy diferente tipo y pueden ser removidos total o parcialmente durante el proceso de regeneración.

Si la naturaleza o la concentración de los iones en solución son similares, el orden de preferencia o la selectividad de la resina para los diferentes iones.

La cinética o velocidad con que se efectúa la reacción de intercambio se ha observado que es sumamente rápida y ocurre en segundos, cuando el

catión o el anión tienen contacto con el grupo funcional de la resina. Esta alta velocidad de reacción se debe a que no es necesario romper enlaces químicos para que proceda la reacción. La velocidad de intercambio está en función de la movilidad del ión o su facilidad a difundirse en la estructura de la resina.

La estructura tipo gel de la resina y el grado de porosidad obtenido en el proceso de polimerización, es lo que determina la eficiencia de la resina en su capacidad de intercambiar iones con el agua en su contacto

2.1.5. Resinas

Una resina es un polímero compuesto de un número elevado de moléculas repetitivas enlazadas.

En el sentido más amplio de la palabra, una resina sintética consiste en una red de radicales hidrocarburos a los cuales están unidos grupos funcionales iónicos solubles. Las moléculas de hidrocarburos están unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que imparte una insolubilidad y tenacidad global a una resina. La extensión, o grado de reticulación, determina la estructura porosa interna de la resina, y ésta no debe ser tan grande que restrinja el movimiento libre de los iones cambiables. Como los iones deben difundir dentro y fuera de la resina para que ocurra el intercambio, los iones de tamaño superior a uno dado pueden ser excluidos de la reacción mediante una selección adecuada del grado de reticulación.

La naturaleza de los grupos iónicos unidos al armazón de la resina determina ampliamente el comportamiento de la misma. El número total de grupos por unidad en peso de resina determina la capacidad de intercambio, y el tipo de grupo afecta al equilibrio de intercambio iónico y a la selectividad

iónica. Cambiadores catiónicos son resinas que llevan cationes cambiables y contienen grupos funcionales ácidos, tales como: el sulfónico $R-SO_3H$; fenólico $R-OH$, carboxílico $R-COOH$; y fosfórico $R-PO_3H_2$. La letra R representa la red orgánica de la resina

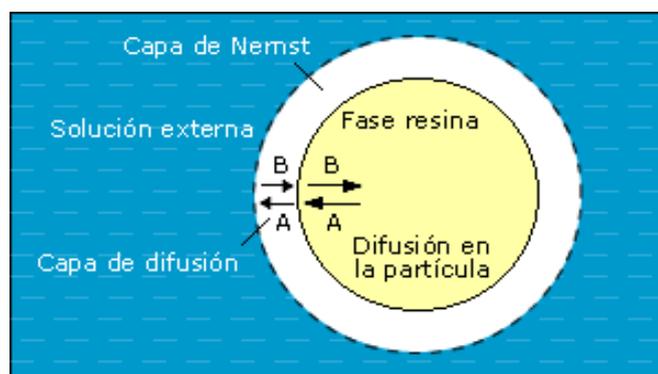


Figura 15 Proceso de Difusión de una Resina

2.1.6.1. Tipos de Resinas

Vergara (1998), reporta que, se clasifica con relación a su constitución química y a su polaridad de intercambio. Las resinas catiónicas se subdividen en tipos de sodio intercambiable y de hidrogeno disponible.

Las resinas que se necesitan para eliminar los cationes de calcio (Ca) y magnesio (Mg) que dan la dureza del agua, necesita que se elija la resina catiónica de tipo gel sintético Poli estirenos Sulfonado que utiliza un compuesto de bajo costo en nuestra localidad para su regeneración que es el cloruro de sodio (sal común).

2.1.6.2. Resinas Orgánicas e Inorgánicas.

Los intercambiadores iónicos forman un grupo de materiales muy heterogéneo, cuya única característica común es que contienen una carga eléctrica fija capaz de enlazar a iones de carga opuesta. Se clasifican en dos

grandes grupos: intercambiadores orgánicos e intercambiadores inorgánicos.
Ambos grupos incluyen materiales sintéticos y naturales.

RESINAS INORGÁNICAS:

NATURALES. Son aluminosilicatos como zeolitas, arcillas minerales y feldespatos

SINTÉTICOS. - Generalmente se pueden subdividir en las siguientes categorías.

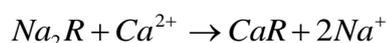
- ❖ Óxidos metálicos hidratados, Ej. óxido de titanio hidratado, ácido poliantimónico.
- ❖ Sales insolubles de metales polivalentes, Ej. Fosfato de titanio.
- ❖ Sales insolubles de hetero poliácidos, ej. molibdeno fosfato amónico.
- ❖ Sales complejas basadas en hexaciano ferratos insolubles.
- ❖ Zeolitas sintéticas.

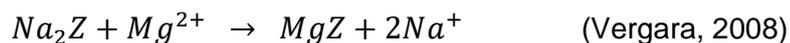
Las zeolitas y las arcillas son minerales de aluminosilicatos ampliamente distribuidos en la corteza terrestre. Algunas proceden de la erosión de las rocas, otras aparecen como depósitos sedimentarios y, por último, algunas tienen origen volcánico

2.1.6.3. Resinas Intercambiadoras en Ciclo Sódico:

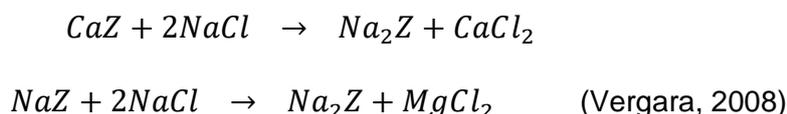
Vergara (2008), se conoce a la zeolita (NaZ) como los silicatos hidratados de sodio y aluminio en el estireno. Su fórmula general es $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$

Las reacciones del intercambio iónico al tratar el agua son las siguientes:





Cuando la zeolita se vuelve inerte, se regenera mediante un lavado con solución de salmuera de NaCl, para que de esta manera se restituya el sodio por intercambio.



La regeneración se realiza por ciclo de operación del tratamiento de agua, para lo cual se debe tener en cuenta la relación con su constitución química, la cual es variada y se aprecia en la Tabla 2 (ver Anexo 4)

Las resinas intercambiadoras de iones son hoy en día ampliamente utilizadas en el ablandamiento de aguas.

Como ya se ha mencionado anteriormente, éstas consisten de esferas de polímeros de polivinilbenceno las cuales tienen terminales de grupos sulfónicos. Estos son grupos funcionales que tienen capacidad de intercambio, donde se pueden fijar especies químicas tales como H^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , etc.

Cuando se pone en contacto una solución que contiene como cationes H^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+ , los cationes serán removidos selectivamente en orden a su relación tamaño/carga del ión (Tabla 2, Ver Anexo 6), así como en función de la concentración del catión. La selectividad aumenta a medida que disminuye la relación tamaño/carga y también se incrementa con la concentración de la especie.

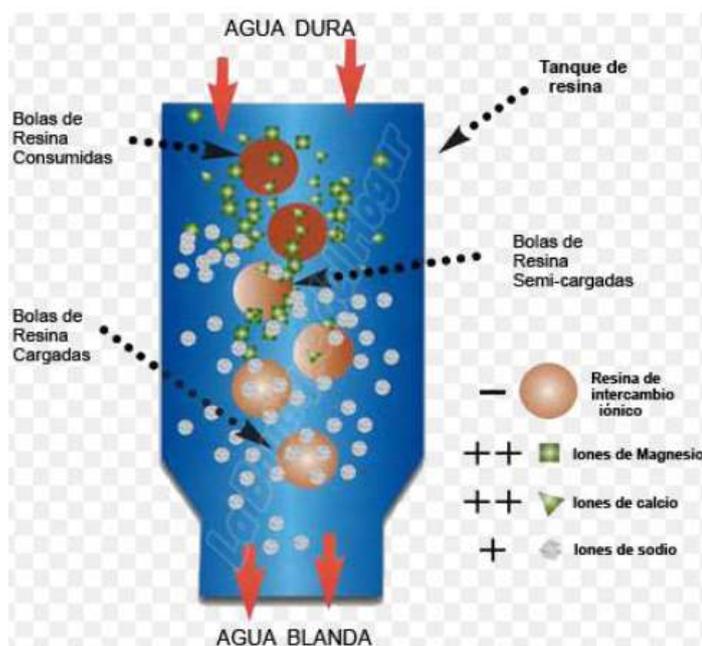


Figura 16 Esquema de la reacción química en el ablandamiento

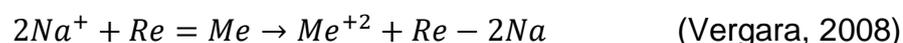
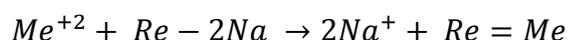
Si la resina está en contacto con una solución de igual concentración (igual normalidad) de iones Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} , el orden de selectividad es $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^{+}$ y de esta forma el calcio y el magnesio serán removidos antes que el sodio.

En una resina intercambiadora de iones en ciclo sódico, las terminales activas de las esferas de PVB (Polivinilbenceno) tienen grupos sodio, los cuales se intercambian por los iones Ca^{+2} , Mg^{+2} , en ese orden. El agua que ha estado en contacto con la resina ya no tiene cantidades apreciables de calcio y magnesio y se dice que el agua es blanda.

Es necesario recalcar que en el tratamiento de resinas ocurre un proceso de intercambio, ya que el calcio y el magnesio se integran a la estructura a la resina y el sodio que se encuentra inicialmente en la resina pasa a la solución acuosa.

Cuando la resina agota su capacidad de intercambio, las terminales activas de ésta se encuentran saturadas de iones de calcio y magnesio principalmente, y ya no es posible remover la dureza del agua que se pone a su contacto. Para recuperar esta capacidad se efectúa la regeneración de la resina, que consiste en hacer pasar por el lecho de resina una solución de cloruro de sodio de alta concentración y en exceso de la cantidad de sodio requerida estequiométricamente para volver a saturar en sodio los sitios activos de la resina.

La regeneración o recuperación de sodio en los sitios activos de la resina, es posible y explicable por el principio de Le Chatellier, ya que la alta concentración de sodio en la salmuera de lavado produce una reversión en la reacción de intercambio.



Me^{+2} puede ser: Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na , Fe^{+2} , Sr^{+2} , etc.

Re es la terminal activa de la resina.

La reacción representa el proceso normal de intercambio, tal y como ocurre cuando el agua a tratar fluye a través de la resina, mientras que la reacción es cuando se agregan cantidades de sodio en exceso y en altas concentraciones, para invertir la reacción y favorecer que esta proceda en sentido inverso.

Cuando la resina opera en una reacción de intercambio de iones sodio por otros iones en solución, se dice que la resina trabaja en ciclo sódico. Es

evidente, de acuerdo a la reacción de intercambio, que la cantidad de sólidos disueltos en el agua no disminuye, por el contrario, aumenta ligeramente, ya que el peso equivalente del sodio es 23, mientras que el del calcio es 20 y el del magnesio es 12,15.

Resinas intercambiadoras de iones en ciclo sódico: Los filtros de resinas en ciclo sódico tienen como finalidad darle un tratamiento al agua para disminuir la dureza, que principalmente se debe al calcio y magnesio en solución.

Para disminuir la dureza a niveles mínimos, se emplea una resina que retiene el calcio y el magnesio del agua, dejando un agua blanda. Para este propósito, en un filtro de resinas se tiene un recipiente dentro del cual hay un determinado volumen de resina. Mientras mayor sea la cantidad de resina mayor es la capacidad del filtro.

El agua fluye de arriba hacia abajo dentro del filtro, por lo que el agua tiene contacto con la resina y de esta manera son removidos calcio y magnesio, saliendo por la parte inferior del filtro agua blanda o de baja dureza.

La resina tiene una cierta capacidad, por lo cual después de que ha pasado un determinado volumen de agua,

La resina se satura y ya no es capaz de cumplir su función. El tiempo de duración de la resina cumpliendo su función adecuadamente depende de la dureza del agua tratada, así como del volumen de agua que se pase por el filtro. Si la dureza es muy alta, la resina se satura más rápidamente; y de la misma manera: si el volumen de agua es muy alto la resina se satura en menor tiempo

Las resinas pueden clasificarse en función de:

- ❖ Estructura de la red polimérica
- ❖ Tipo de grupo funcional

Tipos de resinas de intercambio iónico según su estructura de red

Tipo gel: También conocidas como resinas microporosas ya que presentan tamaños de poro relativamente pequeños.

En estas resinas el fenómeno swelling es muy importante, ya que se hinchan en mayor o menor medida en función del porcentaje de agente entrecruzante empleado durante la polimerización y del disolvente en el que se encuentre la resina.

Por ejemplo, una resina con baja proporción de divinilbenceno se hinchará mucho en disolución acuosa, abriendo ampliamente su estructura, lo cual permitirá la difusión de iones de gran tamaño.

Resinas macroporosas: También llamadas macro reticulares. Durante la síntesis de estas resinas a partir de sus monómeros, se utiliza un co-solvente que actúa interponiéndose entre las cadenas poliméricas creando grandes superficies internas. Este disolvente se elimina una vez formada la estructura rígida del polímero. Las perlas tienen una relación área/volumen mayor que las resinas tipo gel, y por tanto, mayor capacidad de intercambio. La estructura macro reticular favorece la difusión de los iones, mejorando por tanto la cinética de intercambio.

Resinas isoporosas: Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme, con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red.

Son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y de costo más bajo que las resinas macroporosas.

2.1.6.4. Propiedades de las Resinas

Propiedades Físicas

Las resinas de intercambio iónico son generalmente producidas y usadas en la forma de partículas granulares o partículas esféricas.

En aplicaciones especiales estas partículas esféricas pueden variar de material retenido sobre malla 16 (menor 0,004 mm de diámetro).

En los procesos de ciclo promedio, sin embargo, las partículas fluctúan entre 16 a 50 mallas (0,3 – 1,2 mm de diámetro), ya que en la mayoría de las aplicaciones de estos materiales incluye su uso en soluciones acuosas muy diluidas, las propiedades físicas de los polímeros hidratados completamente son los más comúnmente usados en la operación de columnas.

Todas las propiedades físicas dependen de algún grado de la forma química del grupo funcional (aunque a veces es conveniente determinar las propiedades).

Es más usual transformar la resina para una forma iónica conocida antes de hacer algunas medidas físicas. Las propiedades del intercambiador de cationes son más comúnmente medidas en el sodio o en forma hidrógeno, mientras que el intercambiador de aniones son evaluados.

Estas formas estándar son seleccionadas porque son los únicos, de los cuales son más vendidas las resinas y también porque representan las formas de regeneración comunes para aplicaciones comerciales. En casos donde la

resina es regenerada a otras formas iónicas, las propiedades físicas pueden ser más provechosamente determinadas sobre esa forma de regeneración, (Tabla 3, Ver Anexo 5)

Propiedades Químicas

Hidalgo *et al.* (2006), las propiedades químicas de una resina de intercambio iónico son determinadas, primero en su estructura esquelética y segundo por la naturaleza del grupo funcional. Cabe mencionar que el grupo funcional determina la estructura esquelética, determina la estabilidad de la resina. Las propiedades químicas más comúnmente determinadas son las sustancias sólidas, las características de los grupos funcionales y la capacidad de la resina de intercambio iónico.

a) Capacidad de Intercambio de una Resina

Desde el punto de vista práctico, un intercambiador puede consolidarse como un reservorio de iones intercambiadores. Los intercambiadores iónicos se caracterizan de una manera cuantitativa por su capacidad que usualmente se define como el número de iones intercambiables contenidos en una cantidad específica de material.

Los datos de capacidad se usan básicamente para dos propósitos:

- ❖ Para caracterizar los materiales de intercambio iónico
- ❖ Para el uso en los cálculos de las operaciones de intercambio.

En el primer caso, la caracterización debe de definirse de ser posible de tal manera que sea una constante característica del material, independiente de las condiciones experimentales. En el segundo caso, es más práctico usar definiciones o cantidades que reflejen el efecto de las condiciones de

operación. La capacidad puede expresarse en la base de peso seco, peso húmedo y columna húmeda.

b) Capacidad en Peso Seco

Está expresada en mili equivalente por granos de resina seca, éste concepto es la medida más precisa del grado de sustitución química durante la síntesis.

c) Capacidad en Peso Húmedo

Esta definición considera la incorporación del agua a la resina y está expresada en mili equivalente por grano de resina húmeda.

d) Capacidad en Volúmen Húmedo

Este concepto involucra el número total de sitios de intercambio disponibles por unidad de volúmen de resina húmeda.

Se expresa en mili equivalente por mililitro de resina húmeda, una disminución de este valor, puede indicar una disminución de los sitios activos de intercambio o una rotura de la estructura polímero.

e) Capacidad de Operación

Es una medida del trabajo útil obtenido de una resina, que opera en una columna bajo un juego definido de condiciones.

Está determinada por la capacidad inherente de la resina, el nivel de regeneración, la composición de la solución a tratarse, flujo de operación, temperatura, tamaño de partículas y otros factores más. Se expresa usualmente en kilogramos/pie cúbico de resina.

f) Capacidad de Rotura

Es la capacidad que se consigue antes de que el lecho haya alcanzado un completo equilibrio. Este podría ser igual a la capacidad de operación

g) Vida Útil de una Resina

Es importante hablar de los agentes que pueden disminuir la eficiencia de las resinas catiónicas y que a veces puede llegar a obstruir los lechos de una unidad.

Los agentes que atacan las resinas con mayor regularidad son los óxidos hidratados de hierro, manganeso, cobre, aluminio, magnesio, sulfato de calcio, aceites y materia orgánica en suspensión.

2.1.6.5. Efectos de la Contaminación de una Resina**a) Capacidad Disminuida**

Hidalgo *et al.* (2006), menciona que, varios contaminantes cubrirán las bolitas de resina u ocuparán los sitios de intercambio, sobre y dentro de las bolitas, con lo cual obstruye el flujo apropiado e intercambio de iones, de este modo, la resina no es utilizada en su capacidad total teórica y las horas de servicio del equipo entre una y otra regeneración disminuye.

Los contaminantes que causan este tipo de efecto son: hierro, manganeso, aluminio y ácidos orgánicos de peso molecular alto.

b) Goteo

Hidalgo *et al.* (2006), nos dice que, algunos contaminantes presentes después de la regeneración son extraídos del lecho durante el ciclo de servicio.

Este conduce a un goteo continuo de iones contaminantes dentro de los efluentes.

Estos contaminantes son: sulfato de calcio, carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sílice y ácidos orgánicos de peso molecular alto.

c) Acanalamiento

Hidalgo *et al.* (2006), afirma que, la acumulación de partículas contaminantes debido a la acción filtrante de la resina origina una resistencia, hacia el flujo de agua (que se detecta como un incremento en la caída de presión a través del lecho de resina). El proceso en contracorriente es diseñado para remover partículas, aunque no siempre se logra un éxito.

2.1.6.6. Criterios Técnicos para la Selección de Resinas

Hidalgo *et al.* (2006), menciona que, los métodos de análisis de resinas de intercambio iónico pueden dividirse entre aquellos en que se determina el material utilizado como base (polímero de estireno, de acrílico, base sulfónica, etc.) y los que se orientan a evaluar el funcionamiento de la resina. De estos últimos nos ocuparemos en esta presentación. En general todos los métodos se desarrollan conforme a técnicas particulares compiladas por ASTM (American Society for Testing Materials), son ampliamente aceptados por la industria. Los métodos más comunes que permiten evaluar la performance de una resina son: capacidad de retención de agua

- ❖ capacidad de intercambio
- ❖ densidad
- ❖ tamaño y distribución de partículas

Las resinas son plásticos, polímeros activados, desarrollados desde hace aproximadamente 50 años para intercambiar iones. Más del 90% de las resinas corresponden a polímeros de estireno o acrílico, formados por largas cadenas.

Estas cadenas se cruzan luego con un monómero (generalmente divinilbenceno), formando un copolímero (resultante del cruzamiento, por ejemplo, entre estireno y divinilbenceno), que toma la forma de una malla reticulada o matriz del copolímero.

A mayor “cruzamiento” o crosslinking, menores son los “agujeros” que quedan en la matriz que podrían retener el agua.

De manera que al aumentar el cruzamiento disminuye la capacidad de retención de humedad. Esta descripción elemental se adapta perfectamente a las resinas estándar catiónicas. Son resinas fuertes de tipo gel que se usan para ablandar agua o de cationizarla.

Cuando las resinas son macroporosas, la matriz que se forma al realizar el cruzamiento presenta discontinuidades, como si fuera un queso gruyere, que dan lugar a la porosidad. Las resinas catiónicas suelen ser atacadas por el cloro residual existente en el agua, u otros oxidantes que rompen su estructura polimérica aumentando su capacidad de retención de agua. De esta manera, puede verse el grado de envejecimiento que una resina presenta, simplemente comparando su capacidad de retención con la de la misma resina nueva,

Existe una regla casi infalible en lo que hace a la capacidad de intercambio: la cantidad de soda cáustica que se usa para regenerar, aumenta

al disminuir la capacidad de retención de humedad. El envejecimiento provoca una pérdida en la capacidad de intercambio, medida en mili equivalentes por litro de resina. Siempre es conveniente hacer un seguimiento en la performance de las resinas, teniendo en claro que la capacidad de intercambio total puede no variar, pero la resina habrá envejecido al alterarse la relación entre aniones débiles y fuertes efectivamente intercambiados.

La vida útil de las resinas no depende tanto del tiempo que éstas han estado en servicio como de la cantidad de ciclos de regeneración a las que estuvieron expuesta. El último punto es particularmente oportuno para prevenir subdimensionar el volúmen de resina al diseñar un sistema. Menores inversiones iniciales se compensan con mayores costos operativos. Los parámetros a determinar para completar la evaluación son tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad de las partículas.

2.2. MARCO CONCEPTUAL

AGUA: El agua es un líquido incoloro e inodoro, su fórmula química es H_2O (HOH) y está compuesta de un volúmen de oxígeno y dos de hidrógeno. El agua químicamente pura es difícil de encontrar debido a que es un solvente universal, porque muchas sustancias se disuelven en ella. Es usada ampliamente en la vida diaria, se puede decir que es el recurso natural máspreciado y el más indispensable de nuestro planeta; donde la encontramos en sus tres estados: sólido, líquido y gaseoso.

AGUA DURA: Es agua que contiene disueltas cantidades importantes de sales de calcio y magnesio, que se combinan con el jabón formando sustancias insolubles y no permiten que el jabón forme espuma. Existen procedimientos

para depurar el agua de esos componentes, dando lugar a las “aguas ablandadas”.

DUREZA: La dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (Calcio y Magnesio principalmente, estroncio y bario en forma de carbonatos y bicarbonatos) y se expresan en términos de carbonato de calcio. Constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua.

INTERCAMBIO IÓNICO: El intercambio iónico es una de las técnicas de eliminación de iones Mg^{+} y Ca^{+} presentes en las aguas naturales, y consiste en hacer pasar el agua a través de resinas de intercambio iónico con el propósito de remover impurezas, esta técnica es ampliamente utilizada en laboratorios para conseguir agua pura y en la industria para agua de calderas.

CABEZALES: Son las tapas que cierran la carcasa. Normalmente son bombeados, existiendo una gran diversidad de tipos entre ellos, y como excepción existen los fondos cónicos y planos, de muy reducida utilización.

CAPÍTULO III

MÉTODOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN

3.1. CAUDAL DE AGUA REQUERIDO:

De las especificaciones de la casa fabricante el equipo está diseñado y programado para un trabajo de 10 GPM como máximo, pero se asumirá los 10 GPM como dato que será utilizado como base de cálculo:

$$(Q) = 10 \text{ gal/min} = 2274 \text{ L/h}$$

3.2. VOLÚMEN DE LA RESINA CATIÓNICA REQUERIDO

(Owens, 1995):

$$V_r = \frac{(V_{\text{agua}} (\text{gal})) \left(\text{dureza} \left(\frac{\text{g}}{\text{pie}^3} \right) \right)}{CA \left(\frac{\text{g}}{\text{pie}^3} \right)} \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

CA = Capacidad de intercambio (g/pie³)

3.3. DETERMINACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO

(Owens, 1995):

$$t_{\text{teórica}} (\text{horas}) = \frac{\frac{CA \frac{\text{granos}}{\text{pie}^3}}{\text{Dureza} \frac{\text{granos}}{\text{galón}}} V_{\text{resina}}}{Q_{\text{requerido}}} * \frac{1}{60} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

$t_{\text{teórico}}$ = Tiempo de duración teórico del ablandador según la cantidad de resina

Dureza = Granos de dureza existentes en un galón

CA = Capacidad de intercambio

V_{resina} = Volúmen de la resina

$Q_{requerido}$ = Galones por minuto de cada ablandador, flujo volumétrico

60 = Factor de conversión de minutos a horas

3.4. CAPACIDAD OPERATIVA DE INTERCAMBIO

(Owens (1995):

$$V_R \frac{dC_R}{dt} = C_1 Q_1 - C_1 * Q_1 \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

V_R = Volúmen del ablandador, m^3

C_1 = Dureza de la corriente, mili equivalente/litros

C_0 = Dureza que sale del ablandador, mili equivalente/litros

Q_1 = Caudal de operación de la corriente, litros/segundos

3.5. DIMENSIÓNAMIENTO DEL TANQUE ABLANDADOR

(Luterl, 1940):

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

A_c = Área del ablandador

D = Diámetro del ablandador

ALTURA DEL LECHO

$$hl = \frac{Vr}{A_c} \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde:

Vr = Caudal de ingreso

A_c = Área del ablandador

CÁLCULO de % DE EXPANSIÓN DEL ABLANDADOR

$$E_{Max} = h_l * 0,04 \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

E_{max} = Expansión máxima del ablandador

h_l = Altura del lecho

ALTURA DEL LECHO HINCHADO:

$$h_{lex} = h_l + E_{Max} \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde:

h_{lex} = Altura del lecho hinchado

E_{max} = Expansión máxima del ablandador

h_l = Altura del lecho

FRACCIÓN DE LECHO UTILIZADO:

$$X_l = \frac{C_R}{C_r} \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

X_l = Fracción del lecho utilizado

C_R = Capacidad útil de la resina

C_r = Capacidad total de la resina

LONGITUD DEL ABLANDADOR NO UTILIZADO:

$$h_0 = h_{lex} - X_l * h_{lex} \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

h_{lex} = Altura del lecho hinchado

X_l = Fracción del lecho utilizado

CÁMARA DE EXPANSIÓN (FREEBOARD):

$$Freeboard = h_f - h_{lex} \quad \text{Ec. 16}$$

Dónde:

h_f = Altura del ablandador

h_{lex} = Altura del lecho hinchado

ALTURA CILÍNDRICA DE LA COLUMNA

$$h_c = h_{lex} + \text{Freeboard} + 0,3 \text{ m} \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

h_{lex} = Altura del lecho hinchado

REGENERACIÓN

3.6. VOLÚMEN DE REGENERACIÓN DE LA RESINA CATIONICA

(Owens, 1995):

$$V_{reg} = \frac{v_r(\text{pie}^3) * CA(\text{pie}^3)}{\text{dureza}(\frac{\text{g}}{\text{gal}})} \quad \text{Ec. 18}$$

3.7. FLUJO DE SALMUERA

(Owens, 1995):

$$RFR = \frac{Q_{reg}}{V_r} \quad \text{Ec. 19}$$

Dónde:

Q_{reg} = Caudal de regeneración.

V_r = Volúmen de resina.

3.8. VELOCIDAD DE REGENERACIÓN

(Owens, 1995)

$$V_{reg} = \frac{Q_{reg}}{A_c} \quad \text{Ec. 20}$$

Dónde:

Q_{reg} = Caudal de regeneración.

A_c = Área de columna

RETROLAVADO

3.9. CAUDAL DE DESCOMPACTACIÓN

$$Q_d = v_d * A_c \quad \text{Ec. 21}$$

Dónde:

Q_d = Caudal de descompactación

v_d = Velocidad de descompactación

A_c = Área de la columna

3.10. VELOCIDAD DE DESCOMPACTACIÓN

$$V_d = Q_d * t_d \quad \text{Ec. 22}$$

Dónde:

Q_d = Caudal de descompactación

V_d = Velocidad de descompactación

t_d = Tiempo de descompactación

3.11. VOLÚMEN DE LA SOLUCIÓN REGENERANTE

$$Nivel = \frac{Masa\ de\ NaCl}{Volumen\ de\ Resina} \quad \text{Ec. 23}$$

3.12. TIEMPO DE REGENERACIÓN

$$t_c = \frac{V_{H_2O}}{Q_{reg}} \quad \text{Ec. 24}$$

Dónde:

t_c = Tiempo de regeneración

V_{H_2O} = Volúmen de agua

Q_{reg} = Caudal de regeneración.

3.13. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA

En el mercado existen varios tipos de bombas centrífugas que se acoplan a las especificaciones del sistema, para esto se escogió la bomba de ½ HP.

Cálculo de la velocidad de entrada v:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \text{Ec 25}$$

Dónde:

V = Velocidad de entrada

Q = Caudal

D = Diámetro de la tubería

Para calcular la potencia de la bomba necesitaremos valernos de la siguiente

Ecuación:

$$Pt = \frac{Q \cdot \Delta P \cdot \rho}{102} \quad \text{Ec. 26}$$

Pt = Potencia necesaria o consumo de la bomba (kw)

Q= Flujo volumétrico (m³/s)

D = Densidad (kg/m³)

ΔP = Pérdida de carga total (m)

3.13. NÚMERO DE REYNOLDS PARA TUBERÍAS 1 pulg.

(Mott, 1996):

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 27}$$

V = Velocidad de entrada (m/s)

Q = Caudal (m³/h)

A = Área (m²)

NÚMERO DE REYNOLDS EN TUBERÍAS

(Mott, 1996):

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ec. 28}$$

Dónde:

D= Diámetro interior del tubo (m)

v = Velocidad promedio (m/s)

ρ = Densidad del fluido (kg/m³)

μ = Viscosidad Cinemática (m²/s)

3.14 CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA PARA TUBERÍAS 1 pulg.

(Mott, 1996):

$$\text{Rugosidad relativa}(f) = \frac{\varepsilon}{D} \quad \text{Ec. 29}$$

Dónde:

ε = Rugosidad absoluta de la tubería (m) depende del material y acabado de la tubería.

D = Diámetro del ducto (m).

3.15. PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS 1 pulg. (hf)

(Mott1996):

$$h_f = f * \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad \text{Ec. No. 30}$$

Donde:

Hf = Pérdida de carga

L = Longitud de la tubería (m)

v = Velocidad del Fluido (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA DEBIDO A LA VELOCIDAD (h_v)

(Mott1996):

$$h = K \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. No. 31}$$

Dónde:

v = Velocidad del Fluido (m/s)

g = Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA DEBIDO A LA VELOCIDAD (h_v)

(Mott1996):

$$h_v = \frac{v^2}{2g}$$

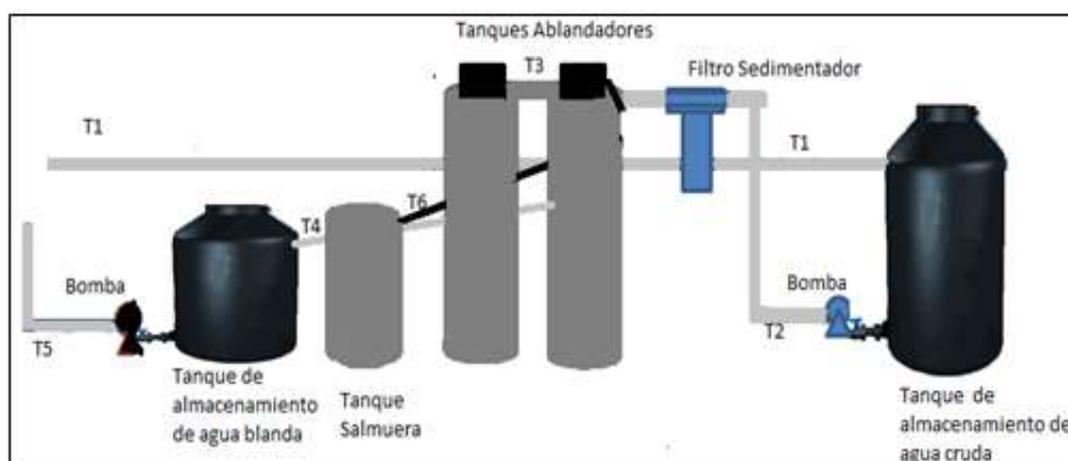
Ec. No. 32

Dónde:

v = Velocidad de fluido (m/s)

g = Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

3.16. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ABLANDADOR DE AGUA



LEYENDA:

- T1: Ingreso el agua cruda
- T2: Retorno del agua cruda, en dirección al filtro.
- T3: Conector entre los tanques ablandadores.
- T4: Tubería con agua blanda
- T5: Agua blanda en dirección al laboratorio de la FIQ UNAP
- T6: Tubería de conexión entre los tanques ablandadores y el tanque de salmuera

CAPÍTULO IV

CÁLCULO DE INGENIERÍA

4.1. VALIDACIÓN DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO

Cuadro 1 Datos Experimentales Promedio de la Obtención de Agua

Blanda

CALIDAD DE AGUA DE ALIMENTACIÓN						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	PROMEDIO
Dureza total	mg/L	451,97	570,34	447,64	442,48	478,11
CALIDAD DE AGUA DEL ABLANDADOR						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	Dato Cte.
Dureza total	mg/L	13,00	8,72	4,08	2,48	2,48

Fuente: Elaboración Propia.

Debido a que las concentraciones de los parámetros presentes en el agua cruda varían de acuerdo a las épocas del año, por cuestiones de seguridad se tomó un promedio en las concentraciones de dureza, calcio y magnesio

Los análisis se realizaron entre los meses de junio, julio y noviembre del 2016 y enero del 2017.

4.2. CAUDAL DE AGUA REQUERIDO:

De las especificaciones de la casa fabricante el equipo está diseñado y programado para un trabajo de 10 GPM como máximo, pero se asumirá 5 GPM como dato que será utilizado como base de cálculo:

$$(Q) = 10 \text{ gal/min}$$

$$(Q) = 600 \text{ gal/h}$$

$$(Q) = 2,27 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.3. VOLÚMEN DE LA RESINA CATIÓNICA REQUERIDO

De la Ec. 5

$$V_r = \frac{1798,632 \text{ gal} * 27,9596 \left(\frac{g}{gal}\right)}{30000 \left(\frac{g}{pie^3}\right)}$$

$$V_r = 1,6763 \text{ pie}^3 \cong 2 \text{ pie}^3 = 0,0566 \text{ m}^3$$

Se debe instalar un ablandador de 2 pies³ para tratar 478,11 mg/L de dureza CaCO₃

Según literatura se usa un factor de seguridad del 10%, entonces

Convirtiendo pie³ a m³

$$V_r = 0,0566 + 0,1 * 0,0566 = 0,0623 \text{ m}^3$$

El volúmen de la resina es de 0,0511 m³, la casa comercial proporciona la resina en sacos litros, por lo tanto, el volúmen de la resina que se debe solicitar es

$$\text{sacos a compra} = \frac{0,0623 \text{ m}^3 \left(\frac{1000l}{m^3}\right)}{25 \frac{l}{\text{saco}}} = 2,49 \text{ sacos por ablandador}$$

Se solicitará 4 sacos y medio de resina para los dos tanques ablandadores

4.4. DETERMINACIÓN DEL CICLO DE TRABAJO

De la Ec. 6

$$t_{teórica}(horas) = \frac{\frac{CA^{\frac{granos}{pie^3}}}{Dureza^{\frac{granos}{galón}}} V_{resina}}{GPM_{ablandador}} * \frac{1}{60}$$

$$t_{teórica}(horas) = \frac{\frac{30000^{\frac{granos}{pie^3}}}{27,9596^{\frac{granos}{galón}}} * 2pies^3}{10 GPM} * \frac{1}{60}$$

$$t_{teórica}(horas) = 3,58$$

La resina seleccionada debe demorar en 3 horas con 58 min en agotarse para que el tanque abastezca de agua blanda hasta su capacidad.

EFICIENCIA DE INTERCAMBIO

La eficiencia de intercambio, es decir, la eficiencia del proceso de agua blanda, llevado a cabo los ablandadores, el cual se determina a partir de los tiempos de operación.

Para el cálculo de la eficiencia de intercambio iónico de cada ablandador según los GPM ablandadores, se utilizó la siguiente Ecuación:

$$Eficiencia (\%) = \frac{GPM_{real}}{GPM_{teórico}} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = \frac{8 GPM}{10 GPM} * 100$$

$$Eficiencia (\%) = 80$$

4.5. CAPACIDAD OPERATIVA DE INTERCAMBIO

Mediante un balance de masa en el punto de mezcla y en el intercambiador, se desarrolló un modelo matemático para determinar la capacidad operativa de la resina. En el diagrama siguiente se define el sistema para el balance de masa simple en el punto de mezcla



Dónde:

m_1 = Representa la cantidad de los cationes en la línea o corriente por unidad de tiempo

m_2 = Cantidad del catión que sale del intercambiador.

Como el estado del sistema definido es estacionario, entonces el balance queda:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$m_1 = m_2$$

En función del caudal y la concentración

$$C_0 * Q_1 = C_1 * Q_2$$

Dónde:

C_0 = Dureza en la salida del ablandador, mg/L

C_1 = Dureza de la corriente, mg/L

Q_1 y Q_2 = Caudales de operación, L/s

Se supone que el agua es incompresible, es decir que la densidad no varía a lo largo de todo el flujo. Por lo tanto:

$$Q_1 = Q_2$$

Siguiendo el mismo principio de la ley de la conservación de la materia:

$$\text{Acumulación} = \text{Masa que entra} - \text{Masa que sale}$$

$$\frac{dm_R}{dt} = m_2 - m_1$$

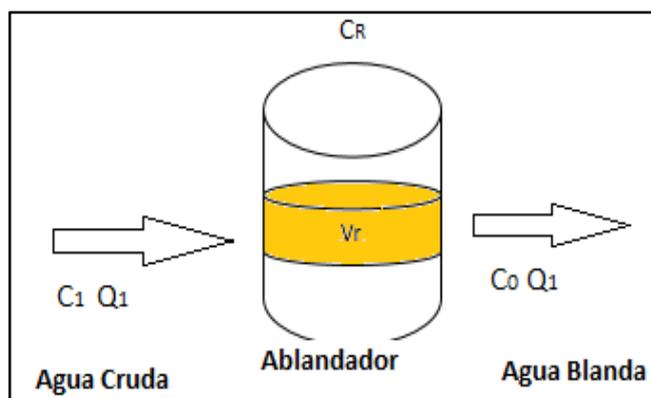


Figura 17 Capacidad Operativa de Intercambio

De la Ec. 7

En términos de la concentración

$$V_R \frac{dC_R}{dt} = C_1 Q_1 - C_0 * C_1$$

V_R = Volúmen del ablandador, m^3

C_1 = Dureza de la corriente, mili equivalente/litros

C_0 = Dureza que sale del ablandador, mili equivalente/litros

Q_1 = Caudal de operación de la corriente, litros/s

$$dC_R = \frac{(C_1 - C_0)Q_1}{V_R} dt$$

Las concentraciones de frontera para resolver la integral. En un tiempo cero la resina no ha intercambiado iones, por lo que aún está en su forma iónica Na^+ , en consiguiente, la concentración de calcio y magnesio retenida es cero. En un tiempo t , la resina ha dado su capacidad para intercambiar los iones de sodio por los de calcio y magnesio (capacidad útil u operación de la resina).

Entonces:

$$\int_0^{C_R} dC_R = \frac{(C_1 - C_0)Q_1}{V_R} \int_0^t dt$$

Integrando

$$C_R = \frac{(C_1 - C_0)Q_1}{V_R} t$$

El valor de C1 es de 478,11 mg/CaCO₃/L. el peso molecular del carbonato de calcio es 100 mg/mmol y los equivalentes son 2 meq/mmol

$$478,11 \frac{mg \text{ Ca}^{++}}{L} * \left(\frac{2 \text{ meq}}{100 \text{ mg}} \right) = 9,5622 \frac{meq}{L}$$

Reemplazando valores

$$C_R = \left(\frac{\left(9,5622 \frac{meq}{L} - 0,005 \frac{meq}{L} \right) * 2,27 \frac{L}{h}}{0,0623 m^3} \right) * 3h$$

$$C_R = 1044,656 \frac{meq}{L} = 1,04 \text{ eq/L}$$

La capacidad útil de la resina es de 1,04 eq/L. la capacidad útil es siempre menor que la capacidad total. Los cálculos demostraron que la resina seleccionada es la adecuada porque la capacidad total por el fabricante es suficiente para el fin requerido (>2 eq/L)

En conclusión, el tiempo que tarda la resina en agotarse basta para tratar un volúmen de agua con esta dureza.

4.6. DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE ABLANDADOR

Rigola M. nos dice que, en operaciones convencionales, la altura del ablandador no debe ser mayor a 1,50 m porque a mayor altura representarían pérdidas de eficiencia hidráulica por la resistencia al flujo y pérdida de cargas asociadas

Dentro de la ficha técnica de la resina se exhibe la profundidad mínima que debe tener el ablandador (0,8m),

De la Ec. 8

$$h_l = 0,8 \text{ m}$$

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (0,3048\text{m})^2}{4} = 0,073\text{m}^2$$

ALTURA DEL LECHO:

De la Ec. 9

$$hl = \frac{Vr}{Ac} = \frac{0,0623\text{m}^2}{0,073\text{m}^2} = 0,85\text{m}$$

CÁLCULO de % DE EXPANSIÓN DEL ABLANDADOR

La ficha técnica indica que la expansión máxima por hinchazón debe de ser 4%

De la Ec. 10

$$E_{Max} = h_l * 0,04 = 0,85 * 0,04 = 0,034 \text{ m}$$

ALTURA DEL LECHO HINCHADO:

De la Ec. 11

$$h_{lex} = h_l + E_{Max} = 0,85 + 0,034 = 0,884\text{m}$$

FRACCIÓN DE LECHO UTILIZADO: la fracción del ablandador utilizado durante el tiempo de la operación, se determina a partir de la relación entre la capacidad útil y la capacidad total.

De la Ec. 12

$$X_l = \frac{C_R}{C_r} = \frac{1,04 \frac{eq}{l}}{2 \frac{eq}{l}} = 0,52$$

LONGITUD DEL ABLANDADOR NO UTILIZADO:

De la Ec. 13

$$h_0 = h_{lex} - X_l * h_{lex}$$

$$h_0 = 0,884 - 0,52 * 0,884m$$

$$h_0 = 0,42m$$

CÁMARA DE EXPANSIÓN (FREEBOARD): (Rigola lapeña) es la altura mínima que se debe dejar por encima de la resina para que la expansión en el retrolavado se efectuó correctamente, teniendo en cuenta la forma más ampliada de la resina. Se suele tomar la expansión de un 50 a un 75% de la altura del lecho para las catiónicas, por ello se toma una expansión de 60%

$$\%Expansión = \frac{\text{Altura del ablandador (forma hinchada), } h_{lex}}{\text{Altura del ablandador fluizado, } h_f} * 100$$

$$60\% = \frac{0,884 \text{ m}}{h_f} * 100$$

$$h_f = \frac{0,884}{0,6} = 1,5 \text{ m}$$

De la Ec. 14

$$\text{Freeboard} = h_f - h_{lex} = 1,5 - 0,884 = 0,6 \text{ m}$$

DOWEX Se debe tener mucho cuidado que durante la fluidización, el ablandador no alcance el sistema colector de retrolavado, debido a que puede haber escape de las partículas más finas de las resinas. Es por ello, que se sugiere un espacio de 30 cm del límite del ablandador expandido hasta el colector superior

ALTURA CILÍNDRICA DE LA COLUMNA: es la sumatoria de la altura del ablandador en su forma hinchada, el Freeboard y el espacio sugerido en el paso anterior

De la Ec. 15

$$h_c = h_{lex} + \text{Freeboard} + 0,3 \text{ m}$$

$$h_c = 0,884\text{m} + 0,6\text{m} + 0,3 \text{ m}$$

$$h_c = 1,25\text{m}$$

4.7. DISEÑO DEL PROCESO DE REGENERACIÓN

4.7.1. Volúmen de Regeneración de la Resina Catiónica

De la Ec. 15

$$V_{reg} = \frac{v_r(\text{pie}^3) * CA(\text{pie}^3)}{\text{dureza}(\frac{g}{gal})}$$

$$V_{reg} = \frac{2(\text{pie}^3) * 30000(\frac{g}{\text{pie}^3})}{27,3735(\frac{g}{gal})}$$

$$V_{reg} = 1797,1336\text{gal} = 6802,89 \text{ L}$$

El flujo de salmuera que se requiere para regenerar la resina

De la Ec. 16

$$RFR = \frac{Q_{reg}}{V_r}$$

La tasa de flujo de regeneración (RFR = 1,2)

De la Ec. 17

$$Q_{reg} = RFR * V_R$$

$$Q_{reg} = 1,2 * 0,0623 = 0,075 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4.7.2. Velocidad de Regeneración

De la Ec. 18

$$V_{reg} = \frac{Q_{reg}}{A_c} = \frac{0,075 \frac{m^3}{h}}{0,073m^3} = 1,024 \frac{m}{h}$$

La velocidad aproximada en la regeneración es de 5 según la ficha técnica de la resina, quiere decir que estamos dentro del diseño propuesto

4.8. RETROLAVADO

Antes de regenerar la resina, es necesario descompactar primero, para ello conocemos la expansión de la resina que es de 4% y sabemos que el tiempo de retrolavado es de 10 min., a temperatura de 20°C y la velocidad de retrolavado para una expansión es de 60%

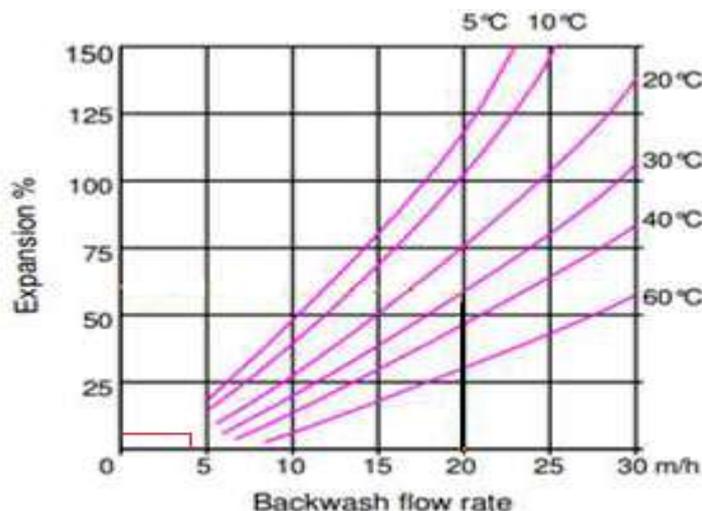


Figura 18 Tasa de Flujo de Retrolavado Vs Expansión del Lecho

De la Ec. 19

$$Q_d = v_d * A_c$$

$$Q_d = 4 \frac{m}{h} * 0,073m^2$$

$$Q_d = 0,292 \frac{m^3}{h}$$

De la Ec. 20

$$V_d = Q_d * t_d$$

$$V_d = 0,292 \frac{m^3}{h} * \left(10 \text{ min} * \frac{1h}{60 \text{ min}} \right) = 0,1 m^3$$

4.9. VOLÚMEN DE LA SOLUCIÓN REGENERANTE

El nivel de regenerante según ficha técnica $\left(200 \frac{kg}{m^3} \right)$ y conocemos el volúmen de la resina, con todos estos datos tenemos:

De la Ec. 21

$$Nivel = \frac{Masa \text{ de } NaCl}{Volumen \text{ de } Resina}$$

$$Masa \text{ de } NaCl = \frac{200 \text{ Kg de } NaCl}{m^3 \text{ de resina}} * 0,0623 m^3 \text{ de resina}$$

$$Masa \text{ de } NaCl = 12,46 \text{ Kg}$$

La solución de NaCl debe tener una concentración del 10% para regenerar la resina. A partir de la masa y concentración de NaCl se determina el volúmen de agua necesario para preparar la solución regenerante:

$$\% = \frac{kg \text{ soluto}}{kg \text{ soluto} + kg \text{ agua}} * 100$$

Reemplazando valores:

$$10\% = \frac{12,46}{12,46 + kg \text{ agua}} * 100$$

$$Masa \text{ de } agua = 12,46 * \frac{100}{10} - 12,46 = 112,14 \text{ kg}$$

La densidad del agua a 20°C es de 998.2 kg/m³ (Tabla 6, Ver Anexo 6) por lo tanto el volúmen de agua es:

$$V_{H_2O} = \frac{112,14kg}{998,2 \frac{kg}{m^3}} = 0,112 m^3$$

En conclusión, tendremos que preparar 12,46 kg de NaCl, con lo que se gastara 112 litros de agua en cada ciclo de trabajo para regenerar la resina.

4.10. TIEMPO DE REGENERACIÓN

De la Ec. 22

$$t_c = \frac{V_{H_2O}}{Q_{reg}}$$

$$t_c = \frac{0,112m^3}{0,075 \frac{m^3}{h}}$$

$$t_c = 1,49h = 90 \text{ min}$$

Para saber si con el nivel de regeneración seleccionado se alcanza a regenerar completamente la resina, se debe comprobar si existe un excedente estequiométrico:

De la Ec. 23

$$\%Est = \frac{\frac{eq \text{ de regenerante}}{l \text{ de resina}}}{capacidad \text{ operativa}} * 100$$

$$\%Est = \frac{Nivel \text{ de regeneración} * \left(\frac{eq \text{ de } Na^+}{gramos \text{ de } Na^+}\right)}{capacidad \text{ operativa}} * 100$$

$$\%Est = \frac{\frac{200 \text{ g } Na^+}{l \text{ de resina}} * \left(\frac{1eq \text{ de } Na^+}{58,5 \text{ g de } NaCl}\right)}{2 \frac{eq}{l \text{ de resina}}} * 100 = 170,94\%$$

El estequiométrico es de 170,94%. Para resinas catiónicas fuertes, la eficiencia de regeneración típica según la ficha técnica es de 200%. Teniendo en cuenta lo anterior y el porcentaje estequiométrico calculado, se concluye que el nivel de regenerante seleccionado alcanza a regenerar completamente la resina.

LAVADO

Se debe efectuar un desplazamiento del volúmen regenerante presente a la misma velocidad y tempo de regeneración esta operación se conoce como enjuague lento o desplazamiento.

La casa comercializadora da la referencia de volúmen de agua que se debe emplear para lavar la resina de la solución degenerante en función del volúmen de lecho (4BV aprox.), el agua puede ensuciarse y agotarse durante este proceso.

$$\text{Volumén de agua de enjuague lento} = 4 \frac{\text{m}^3 \text{ de agua}}{\text{m}^3 \text{ de resina}} * 0,0623 \text{m}^3 \text{ resina} = 0,25 \text{m}^3$$

El volúmen de agua que se requiere para enjuagar la resina es de 0,25m³

$$\text{Caudal de enjuague lento} = \frac{0,25 \text{m}^3}{90 \text{min} * \frac{1 \text{h}}{60 \text{min}}} = 0,0028 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Cuadro 2: Especificaciones para el ablandador

ESPECIFICACIONES	VALOR
Fuentes de agua	Laboratorio de FIQ UNAP
Dureza del agua, mg/L	478,11
Volúmen del ablandador, pie ³ =m ³	2=0,056
Ciclo de trabajo, h	3
Tiempo de regeneración, min	90
Volúmen de regeneración, L	6802,89
Masa de NaCl, kg	12,46
Capacidad útil de la resina, eq/L	1.04
Eficiencia de intercambio, %	80
Área de la columna, m ²	0,073
Altura del lecho, m	0,85
Altura del lecho hinchado, m	0,88
Caudal de descompactación (Qd), m ³ /h	0,292
Tiempo de retrolavado, min	10
Volúmen de regeneración, m ³	0,112
Diámetro del ablandador, m	0,3048
Altura del ablandador, m	1,22
Altura del ablandador expandido h _{lex} , m	0,832
Material del ablandador	Fibra de vidrio

Fuente: Elaboración propia

4.11. DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

(Mott, 1996):

$$Q = v * A$$

$$A = \frac{Q}{v}$$

$$v = 1,5 \frac{m}{s}$$

La velocidad máxima para diseño de impulsión de drenaje típica es de 1,5 m/s. esta velocidad asegura la auto limpieza de la línea. La velocidad puede ser mayor, sin embargo deben revisarse aspectos como el aumento en la magnitud de las sobres presiones por golpe de ariete y el incremento en las pérdidas por fricción y consumo de energía, entre otras cosas. La velocidad mínima recomendada para un emisor a presión de aguas debe ser de 1,0 m/s ya que es la mínima velocidad requerida para suspender el contenido de sólidos propios de las aguas residuales una vez que estos hayan tenido la oportunidad de sedimentarse durante periodos sin bombeo.

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{0,000333 \frac{m^3}{s}}{1,5 \frac{m}{s}} = 0,000222m^2$$

$$A = \frac{\pi * Di^2}{4}$$

$$Di = \sqrt{\frac{4 * (0,000222m^2)^2}{\pi}}$$

$$Di = 0,6 \text{ pulg} = 0,0168 \text{ m}$$

Para calcular la potencia de la bomba necesitaremos valernos de la siguiente Ec.:

De la Ec. 24

$$Pot = \frac{Q * \Delta P * \rho}{102}$$

$$Pot = \frac{(0,00278 \frac{m^3}{s}) * 0,436m * (\frac{1000kg}{m^3})}{102}$$

$$Pot = 0,027 kw = 26,71 w = 0,036HP$$

Energía hidráulica de la bomba

a) Rendimiento hidráulico

$$n = h_e/h_a$$

Donde:

He= pérdida por altura

Ha= pérdida por altura de impulsión

$$n = \frac{0,71m}{1,06m} = 0,67 m$$

b) Rendimiento interno

Son las pruebas de pérdidas internas o volumétricas

$$n = \frac{Q}{(Q + Q \text{ rodete})} = 0,60$$

Se considera 60% = (Q+ Q rodete) Por lo tanto:

$$P = \frac{Pt}{n * ni} = \frac{0,036HP}{0,67 * 0,7} = 0,1 HP$$

Por lo tanto, utilizaremos una bomba de 1/2 HP, por ser el más cercano al caballaje encontrado.

Cuadro 3: Especificaciones de la Bomba

Q máximo	40 L/min
Succión	2 pulg.
Descarga	¾ pulg.
Potencia de Bombeo	0,5 HP
Mejor Punto de Eficiencia	75

Fuente: Elaboración Propia.

4.12. NÚMERO DE REYNOLDS PARA TUBERÍAS 1pulg:

De la Ec. 23

Hallando la velocidad:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,00278 \frac{m^3}{s}}{0,000506 m^2} = 1,247 \frac{m}{s}$$

Hallando el número de Reynolds para tubería de 1pulg.

De la Ec. 25

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,0254 m \cdot 1,247 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{Kg}{m^3}}{1,140 \cdot 10^{-3} N \cdot \frac{s}{m^2}}$$

$$Re = 27543,22$$

Si el $Re > 4000$, el flujo es turbulento; para calcular las pérdidas por fricción en tuberías se necesita obtener el factor de fricción f en el diagrama de Moody (Anexo 11)

Según, en diagrama de Moody $f = 0.045$ **4.13. CÁLCULO DE LA RUGOSIDAD RELATIVA PARA TUBERÍAS 1pulg.**

De la Ec.27

$$Rugosidad\ relativa(f) = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,02mm}{30,4mm} = 0,00066$$

4.14. PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS 1pulg. (h_f)

De la Ec.30

$$h_f = 0,045 \cdot \frac{1,73 \cdot (1,247 \frac{m}{s})^2}{0,0254 m \cdot 2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_f = 0,194 m$$

4.15. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA DEBIDO A LA VELOCIDAD**(h_v) PARA TUBERÍAS 1pulg.**

De la Ec.31

$$h = K \frac{v^2}{2 * g}$$

Ver Tabla 7 (Anexo 9)

$$h_s = 1,49 \frac{(1.247 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} = 0,11m$$

4.16. CÁLCULO DE PERDIDA DE CARGA DEBIDO A LA VELOCIDAD

De la Ec. No. 32

$$h_v = \frac{(1.247 \frac{m}{s})^2}{2 * 9.81 \frac{m}{s^2}} = 0.080m$$

4.17. ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

Para una mejor selección del equipo es necesario conocer algunas condiciones iniciales como las características y potencias de los equipos que serán adquiridos, la calidad del agua a ser tratada y las condiciones de dureza que se desea obtener al final del proceso.

De igual forma existen varios parámetros de diseño que deben ser considerados. Definiremos el concepto de profundidad mínima del lecho, altura de pared lateral mínima, parámetros importantes de diseño como velocidad lineal, velocidad espacial.

Se calculará la capacidad de trabajo, dimensiones de lecho de resina, dimensiones del tanque de intercambio, la cantidad de regenerante necesaria

para realizar el ciclo, la cantidad de sal a usarse por cada galón de agua, así como, también los tiempos de contacto.

Se determinarán las condiciones necesarias para el proceso de ablandamiento proceso de retro lavado, el proceso de regeneración y enjuague. También se analizarán criterios de selección que permitan definir las partes y piezas que serán usados para la construcción del equipo, así como la selección del diámetro y tipo de material a ser usado en las tuberías.

También se definirán los factores de seguridad recomendadas, para que el equipo sea eficiente y seguro.

4.18. EQUIPO DE RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUA

Se selecciona una línea comercial para tanques de almacenamiento para almacenar este volúmen de agua tratada. Esta línea de productos ofrece gran versatilidad en el almacenamiento, con capacidades desde 250 L hasta 25,000 L.

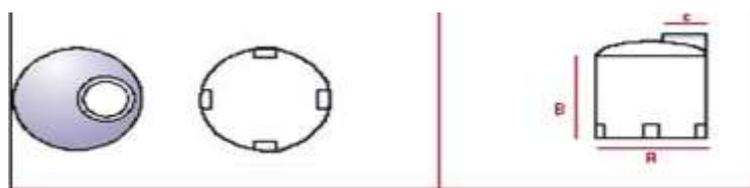


Figura 19 Tanque Vertical Especial

Ver Tabla 6 (Anexo 8)

DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE AGUA CRUDA

Se selecciona una línea comercial para tanques de almacenamiento para almacenar este volúmen de agua cruda. Esta línea de productos ofrece gran versatilidad en el almacenamiento, con una capacidad de presión más tolerable que el anterior tanque.

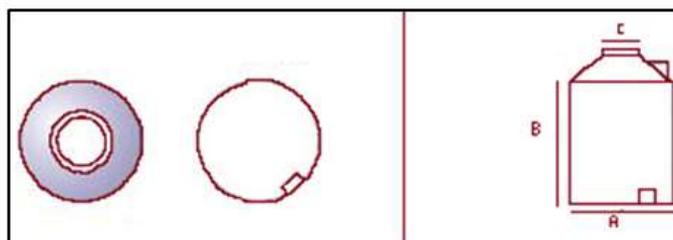


Figura 20 Tanque Vertical Cerrado

Ver Tabla 6 (Anexo 8)

4.19. SELECCIÓN EL TIPO DE ABLANDADOR

El proceso de selección del equipo depende del análisis de agua que se va a tratar y de la cantidad de agua que se quiere obtener. El método que se ha de utilizar en el tratamiento de agua depende básicamente de las características del agua a tratar.

Para lograr el objetivo específico de dotar agua blanda al laboratorio de Control de Calidad y Saneamiento de la FIQ UNA – PUNO. Para la eliminación de partículas de calcio y magnesio presentes en el agua se puede realizar mediante la utilización de ablandadores de tipo mecánico y de tipo químico a continuación se analiza algunos parámetros en la Cuadro 4.

Cuadro 4: Cuadro comparativo

Tipo de Ablandador	Principio de Funcionamiento	Características	Aplicaciones	Costo de Equipo
Mecánico	El fluido a presión pasa a través de varias membranas de poliamida	Agua destinada a la consumo humano Baja capacidad de producción	Desalinización de agua de mar y salobre Industrias farmacéuticas, eléctrica, producción de energía	Alto
químico	El fluido pasa a través de resinas de intercambio catiónico	Membrana requieren frecuente limpieza Agua destinada al consumo industrial y domestico Capacidad de producción media Las resinas requieren ser regeneradas con poca frecuencia	Descontaminación de aguas urbanas En proceso de producción de vapor En viviendas en criaderos de peces y acuarios	bajo

A) Evaluación de las Características del Reactor Ablandador

La evaluación de la selección del ablandador de agua de funcionamiento alternativo automático controlado por una válvula Twin con turbina y Miter totalizador de agua tratada.

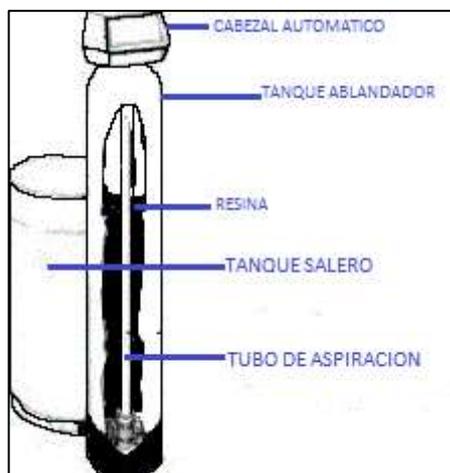


Figura 21 Tanque Reactor

Los tanques reactor son en material de polietileno reforzado con hilo de fibra de vidrio:

Equipo	: Reactor ablandador para agua por intercambio iónico
Tipo	: intercambio iónico catiónico
Marca	: PENTAIR - USA
Modelo	: ATFG1248-FLECK 9100
Material	: Polyglass recubierto con fibra de vidrio
VOLÚMEN de Resina	: 2 pies cúbicos por reactor
Capacidad Intercambio	: 30 000 Granos por reactor
Flujo Máximo de Servicio	: 10 GPM
Dimensiones del reactor	: 12pulg.x 48pulg., cada uno
Tanque de Salmuera	: 10 litros con válvula de nivel

Consumo de Sal	: 20 libras por regeneración
Válvula Cabezal	: FLECK CONTROL 9100
Conexiones In/Out	: $\frac{3}{4}$ NPT
Presión de Trabajo	: Min 25 psi, Max. 80 psi
Conexión e instrumentos	: Conexiones y accesorios para ingreso de agua cruda, lavado con salmuera, descargas de retro lavado, agua tratada blanda, eliminación de fluido de arrastre de cationes a eliminarse.
Operación	: Manual o Programable

B) Características de la Válvula Serie Twin



Figura 22 Cabezal Twin

- ❖ Agua descalcificada permanentemente, una sola botella en servicio, la segunda en fase de regeneración o stand-by
- ❖ Regeneración con agua descalcificada
- ❖ Cuerpo de la válvula de PPO, resistente a la corrosión
- ❖ Conexión rápida de la segunda botella, con tubos de unión de PVC suministrados con la válvula
- ❖ Opción: Regeneración a contra-corriente

C) Parámetros de Diseño

Existen parámetros de diseño que deben ser considerados para la construcción de ablandadores de tipo iónico, los cuales se derivan principalmente de un extenso estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas más importantes de las resinas que en su mayoría fueron determinadas de forma experimental. Es necesario cumplir con estos parámetros para que de esta manera conseguir condiciones ideales; que en el mundo de los tratamientos de agua se las conoce como “condiciones hidráulicas”. Los parámetros de diseño son:

4.19.1. Altura Mínima de Lecho de Resina (h)

OWENS (1995), se refiere a la altura mínima que debe tener un lecho de resina, esto en función de que debe existir un tiempo mínimo de contacto entre el agua dura y las resinas para garantizar que se lleve a cabo el intercambio de iones. Se establece como altura mínima el valor de 30 pulgadas (76.2 cm)

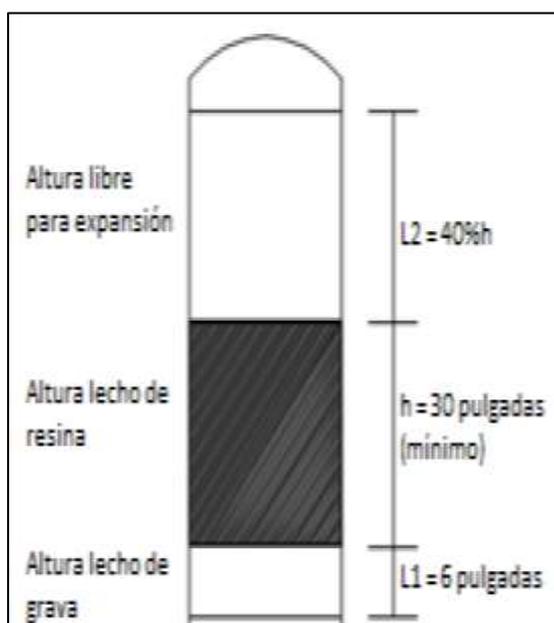


Figura 23 Longitud que conforman la pared Lateral mínima

4.20. ALTURA DE LA PARED LATERAL MÍNIMA (H)

OWENS (1995), menciona que, es la altura mínima que deberá tener el tanque donde se producirá el intercambio iónico, en función de la profundidad mínima del lecho; se defina el valor de “la pared lateral mínima” en 48 pulgadas el cual se obtiene de la siguiente manera:

Esto significa que si se considera una profundidad mínima para el lecho resina de 30 pulgadas, se debe dejar por arriba del lecho una altura libre equivalente a un 40% de la altura del lecho; esta consideración se debe a que la resina absorbe agua durante el proceso por lo cual se incrementa su volumen el cual puede aumentar hasta en un 40%. También se recomienda dejar por debajo de la base inferior del lecho una profundidad mínima de 6 pulgadas para colocar grava y el colector; se representa en la Figura 22

4.21. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO DE SEDIMENTOS DE 100 MICAS

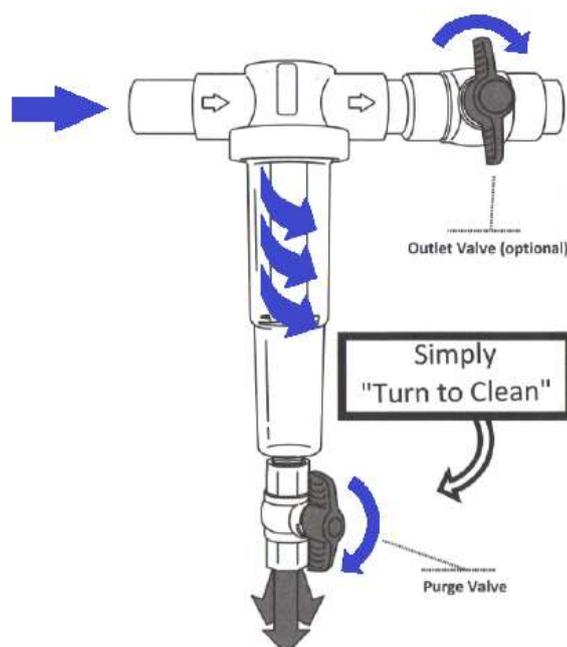


Figura 24 Filtro Sedimentador

Filtro con malla de acero inoxidable para retener sólidos o partículas en suspensión mayores a 20 micras nominales:

Marca	: Rusco
Procedencia	: USA
Modelo	:1 – 100SS
Conexión	: 1° NPT
Capacidad	: 10 GPM
Conexiones	: Acondicionamiento según resultados de cálculos y observaciones de fabricante para el ingreso del agua a tratar
Modelo	: Cilindro vertical de 25 cm de diámetro y 135 cm alto, porosidad de 5 micras, con brida de carga y mantenimiento en la parte superior, y cóncavo en la parte inferior con salida de producto obtenido e higienización
Conexiones	: Acondicionamiento de conexiones y accesorios para el ingreso del agua cruda y la salida del agua tratada, así como los accesorios del retrolavado

El mantenimiento de este filtro se deberá realizar una vez al mes, ya que este instrumento se encarga de atrapar sustancias no propias impidiendo el ingreso al ablandador, debiendo este ser lavado mediante presión de agua para eliminar las impurezas concentradas en sus compartimientos

4.21.1. Requerimiento de la Resina de Intercambio Iónico

Para el tratamiento del agua cruda se utiliza Resina de Intercambio Iónico de la marca comercial Lewatit S 1567, tipo Gel-Sintética Poliestireno Sulfonado, de forma esférica, de uso preferente en procesos de tratamiento de agua para eliminar la dureza como CaCO_3 y MgCO_3

La resina Lewatit S 1567, combina las propiedades de alta capacidad y gran resistencia a la fractura, que pudiera ser provocada por impacto osmótico; ofreciendo una mínima caída de presión a través del lecho a una amplia variedad de condiciones de operación.

La Lewatit S 1567 tiene la capacidad de intercambio de cationes los cuales remueven 30 000 granos de dureza como CaCO_3 y MgCO_3 , cuando es regenerada con 20 Lb (Kg) de la sal NaCl llegando a expandirse en un 50% mínimo durante el retro lavado

Las características de la resina de zeolita Lewatit S 1567. Ver Anexo 1

4.21.2. Selección de Tuberías

Una línea de conducción en un sistema de abastecimiento de agua potable se compone de tuberías, válvulas, accesorios, estructuras y obras para conducir el fluido desde la captación hasta el reservorio aprovechando toda la carga estática, debe utilizarse al máximo la energía disponible para conducir el gasto deseado, por lo que en la mayoría de casos lleva a la selección del diámetro mínimo que permita presiones iguales o menores a la resistencia física que soporta el material.

Criterios de Diseño

Definido el perfil de la línea de conducción, es necesario considerar criterios de diseño en base a consideraciones como: carga disponible, gasto de diseño, clase de tubería, diámetros, estructuras complementarias, líneas de gradiente hidráulica, pérdidas de carga, etc.

Para el cálculo de cálculo de la pérdida de carga unitaria, pueden utilizarse muchas fórmulas, sin embargo, una de las más usadas en conductos a presión, es la de Hazen y Williams. Esta fórmula es válida únicamente para tuberías de flujo turbulento, con comportamiento hidráulico rugoso y con diámetro mayores a 2 pulg. Algunas autoras recomiendan el empleo de la fórmula de para dímetros de menores de 2 pulg; sin embargo, se puede utilizar la fórmula de Hazen y Williams con cuya ecuación. los fabricantes elaboran.

Criterios de Selección Considerado para las Tuberías del Ablandador

Por las características del equipo no es posible considerar la carga disponible y gasto de diseño, en función de un caudal de 2 galones /minutos para el cual se diseñó el equipo y la presión hidráulica existe en la red, considerando un factor de seguridad de 2. Se decide utilizar tuberías de material PVC. Este material posee ventajas comparativas con relación a otro tipo de tuberías; es económico, flexible, durable, de poco peso y de fácil transporte e instalación, además son las tuberías que incluyen diámetros comerciales menores de 2 pulgadas y que fácilmente se encuentran en el mercado.

El diámetro de las tuberías se seleccionó considerando el criterio que busca obtener el menor ruido en las tuberías en función de las presiones y caudal de trabajo, para lo cual se utilizó. Con este instrumento se determinó que la tubería de diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada cumple con las condiciones necesarias.

Tuberías de PVC de $\frac{1}{2}$ pulg. , 1 pulg.

La denominación de tubería PVC proviene del policloruro de vinilo, que es un polímero termoplástico implica que a temperatura ambiente los materiales presentan características más rígidas que cuando la temperatura es aumentada.

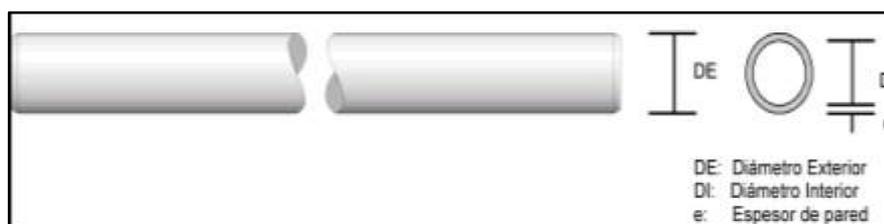


Figura 25 Tubo sanitario PVC

Entre las principales ventajas se puede mencionar:

- ❖ Alta durabilidad
- ❖ Superficie interior lisa (reduce las pérdidas)
- ❖ Liviano y fácil de manejar
- ❖ Es muy versátil
- ❖ No se corroe
- ❖ Fácil de cortar y roscar o ensamblar accesorios plegables
- ❖ Soporta altas presiones
- ❖ Coeficiente de rugosidad de Manning de 0.009, lo que significa una mayor eficiencia hidráulica.

- ❖ La tubería de PVC es muy resistente a golpes a al trato normal en obra, desde luego debe protegerse del manejo inadecuado y rudo.

Limitaciones en el Uso de Tubería de PVC

- ❖ A temperaturas menores a 0°C el PVC reduce su resistencia al impacto
- ❖ La tubería no debe quedar expuesta por periodos prolongados a los rayos solares, pues esto pudiera alterar sus propiedades mecánicas.
- ❖ La tubería de PVC es susceptible al daño al contacto con elementos punzo cortantes.

SELECCIÓN DE VALVULAS Y ACCESORIOS

Las válvulas principalmente sirven para regular o impedir la circulación de un fluido por un conducto. Consta de las siguientes partes:

Órgano de cierre: está inserto en la conducción y es el que modifica la sección de paso del caudal.

Aparato de manipulación externa: comunica el movimiento a través del giro de un eje al órgano de cierre.

La oferta en diseños y tipos de válvulas es muy amplia y ofrece múltiples posibilidades, por lo cual se debe seguir una secuencia lógica de parámetros para su selección. Naturalmente estos parámetros estarán influenciados por factores ajenos al aspecto técnico tales como la disponibilidad o economía.

La primera base de selección de basará en la función que tendrá la válvula; para ello se identificará las siguientes funciones:

Aislamiento. - interrumpe el flujo de la línea de forma total

Retención. - impide que el flujo retroceda.

Regulación. - permite modificar la cantidad de flujo

Seguridad. - protege equipos y personas de sobre presiones

El siguiente factor a considerar es la presión de diseño, del cual se derivará los materiales constructivos apropiados. Con estas consideraciones los elementos seleccionados son el siguiente:

VÁLVULAS DE BOLA COMPACTA

Morales (1998). Son de $\frac{1}{4}$ de vuelta, en las cuales una bola o esfera taladra gira entre asientos elásticos, lo que le permitirá la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando la bola se gira 90° cerrando así el conducto.



Figura 26 Válvula de Bola

- ❖ Excelentes características de flujo
- ❖ No se corroe y no hay desgaste
- ❖ Cierre de $\frac{1}{4}$ de vuelta
- ❖ Presión máxima de trabajo 235 psi a 23°C
- ❖ Rosca NPT
- ❖ Cierre rápido

Este tipo de válvula es la más apropiada para controlar los procesos que realiza el ablandador ya que son de fácil apertura, durables y económicas, se las puede apreciar en la figura.

ACCESORIOS DE POLIPROPILENO



Figura 27 Accesorio de Polipropileno

- ❖ Elementos 100% polipropileno monocapa
- ❖ Alta resistencia a la presión y a temperatura extremas
- ❖ Sistemas livianos y flexibles
- ❖ Fácil y rápida instalación
- ❖ Amplia gama con diámetros de van de ½ a 2 pulg.

ACCESORIOS PEGABLES DE PVC

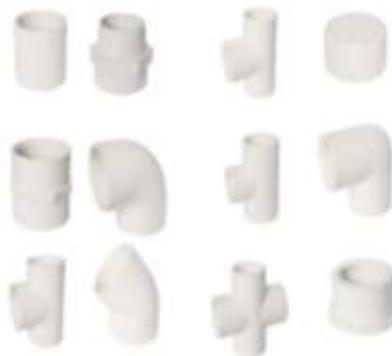


Figura 28 Accesorios Pegables de PVC

Elementos fabricados en PVC (policloruro de vinilo)

- ❖ Este material garantiza la conservación de la calidad de agua
- ❖ Son fabricados bajo las normas NTC 382
- ❖ Instalación rápida y sencilla

- ❖ Dependiendo la clasificación pueden soportar presiones hasta de 500 PSI
- ❖ Resistencia a la corrosión interna

BOMBAS CENTRÍFUGAS



Figura 29 Bomba Centrífuga

Morales (1998). Son las más utilizadas en la industria para transportar cualquier tipo de líquido. En estas bombas los líquidos no son confinados en espacios interiores sino que circulan libremente, recibiendo energía por acción de la fuerza centrífuga.

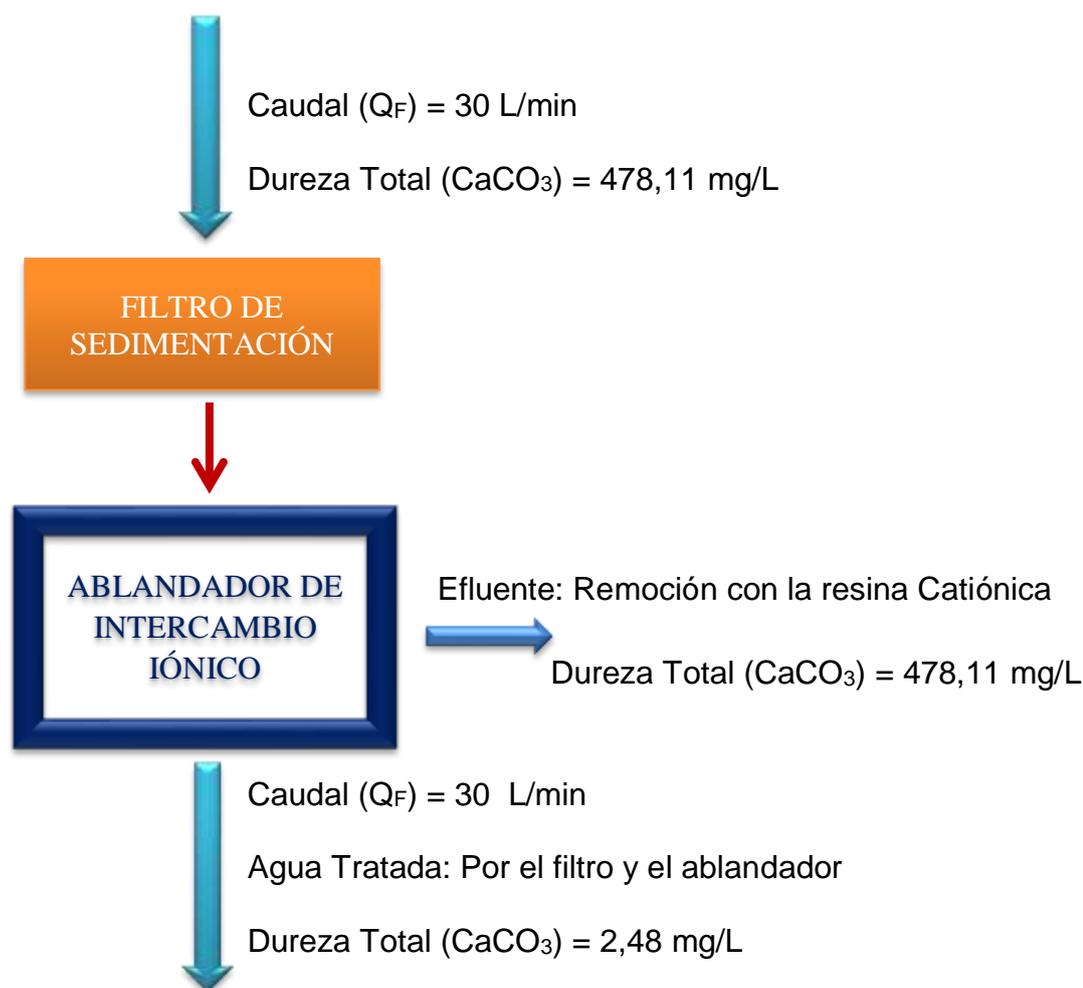
Constan de unas nervaduras que giran a gran velocidad. Como consecuencia de esta velocidad se crea una disminución inicial de presión y el líquido es aspirado. La energía cinética proporcionada (fuerza centrífuga) se transforma en energía de presión, debido a un estrechamiento progresivo en forma de espiral (voluta) hasta la zona de descarga.

Cuando queremos obtener presiones mayores se recurre a la doble aspiración de las bombas o se utilizan bombas de múltiples etapas, donde varias bombas

simples se colocan, en las que cada etapa aspira el líquido que expulsa la etapa anterior.

Giles (1996). Las principales ventajas de las bombas centrífugas son: construcción sencilla, bajos costes, ausencia de válvulas, posibilidad de acoplamiento directo a un motor eléctrico, funcionamiento muy estable. Sin embargo, no puede proporcionar presiones elevadas individualmente, solo puede operar en un intervalo limitado de caudal y presión, necesitan válvulas de retención en la zona de aspiración y no se pueden manejar líquidos muy viscosos.

4.22. DIAGRAMA DE FLUJO CON BALANCE DE MATERIA



4.23. ANÁLISIS DE DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Cuadro 5: Análisis del Agua antes y después del Tratamiento

CALIDAD DE AGUA DE ALIMENTACIÓN						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	PROMEDIO
Dureza total	mg/L	451,97	570,34	447,64	442,48	478,11
CALIDAD DE AGUA DEL ABLANDADOR						
Parámetros	Unidad	M1	M2	M3	M4	Dato Cte.
Dureza total	mg/L	13,00	8,72	4,08	2,48	2,48

Fuente: Elaboración Propia

Los datos presentados en el Cuadro 5 reflejan la eficiencia de la resina catiónica, donde se logra una disminución de la dureza de 478,11 mg/L a 2,48 mg/L.

Cuadro 6: Resultados de los Ensayos

Tiempo (s)	Dureza (mg/L)
0	13
5	8,72
10	4,08
15	2,48
20	2,48
25	2,48
30	2,48

Fuente: Elaboración Propia

Resultados Experimentales del Análisis de la Muestra

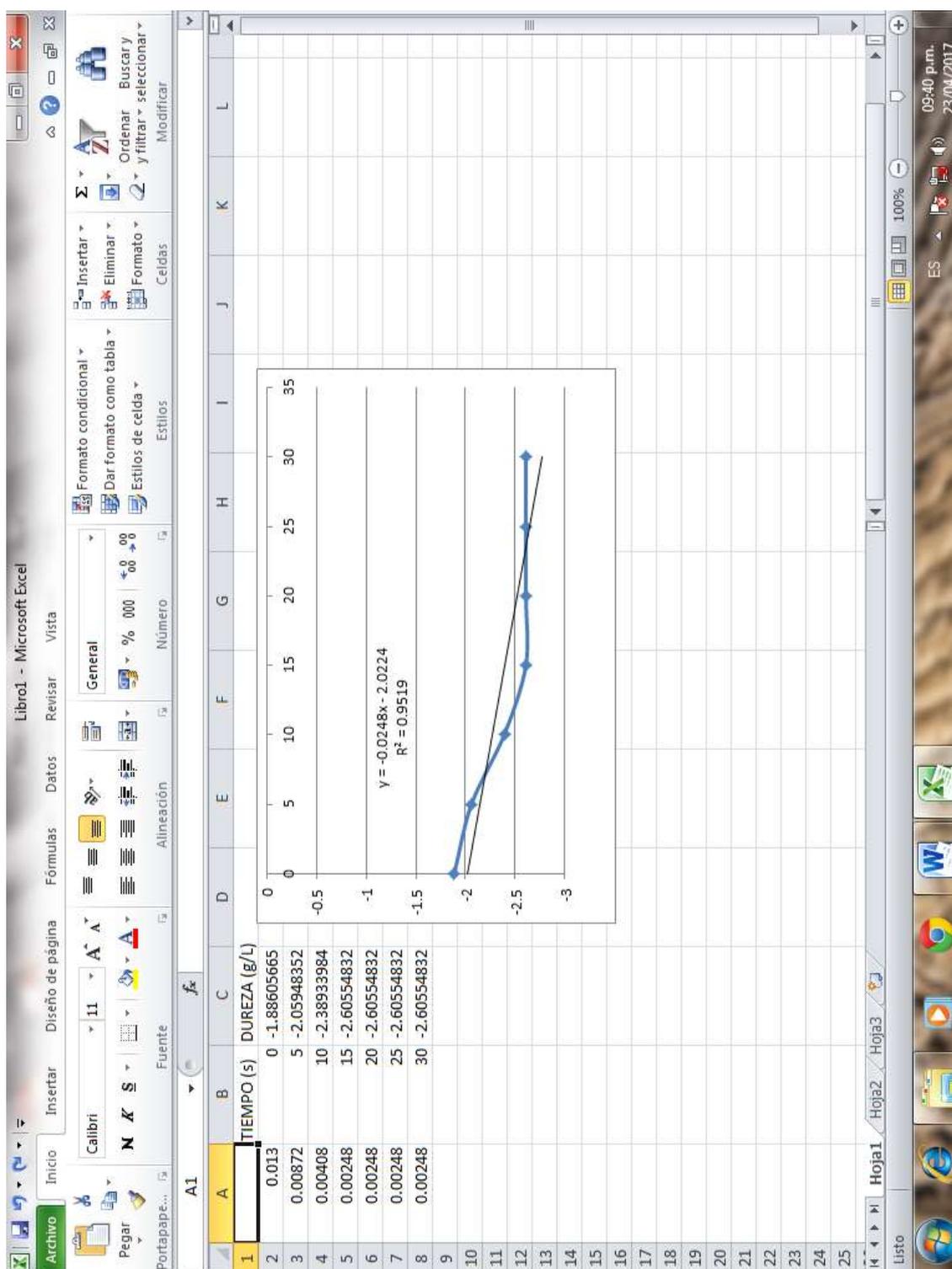


Figura 30 Corrida Experimental del seguimiento cinético

Cuadro 7 Tiempo Vs LN Dureza(g/L)

Tiempo (s)	LN Dureza (g/L)
0	-1.88605665
10	-2.38933984
15	-2.60554832
20	-2.60554832
25	-2.60554832
30	-2.60554832

Gráfico 1 Curva de la Cinética de la Reacción



En el Gráfico 1, se muestra la curva de la cinética de la reacción de primer orden tomando en cuenta la ecuación lineal con 95,19% de confianza, por tanto, demuestra que es una reacción cuya velocidad depende de la concentración de la dureza en el agua elevando a la primera potencia, reacción de primer orden del tipo: A \rightarrow Productos.

Mediante el cálculo partiendo de la ecuación $-r_A = kC_A$ se demuestra que, $\ln \frac{[C_A]_0}{[C_A]} = kt$ obteniéndose la constante de orden de reacción $k = -0,0248 \text{ s}^{-1}$. De manera que esto nos indica que la reacción dependerá de la dureza del agua en tratamiento.

4.24. COSTOS DE EQUIPO

Proyecto : Instalación y Evaluación del Ablandador y un Filtro de Sedimentos de Agua para el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química

Fecha : enero del 2017

Cuadro 8: Costos del Equipo

01 MATERIALES							
	RUBRO	DETALLE	UND.	VIDA UTIL	CANTIDAD AD	PRECIO UNITARIO	COSTO SI.
1.1	filtro de sedimentos de 100 micras	filtro con malla de acero inoxidable para retener sólidos en suspensión mayores de 20 micras nominales	unidad	08 años	1	578,5	578,5
1.2	equipo ablandador TWIN	material de polietileno reforzado con hilo de fibra de vidrio	tanque	10 años	2	6337,5	12675
1.3	tablero de control para dos bombas	unidad	tablero	10 años	1	910	910
1.4	controladores de nivel	controladores de nivel para tanques de agua	unidad	10 años	2		
1.5	Presostatos	para las dos electrobombas	unidad	10 años	2		
						SUB TOTAL	14163.5
02 INSTRUMENTOS Y EQUIPO							
2.1	bomba	centrifuga 1/2 HP	Pza	05 años	2	145	290
2.2	tanques almacenamiento de agua		Pza	10 años	2	250	500
2.3	base metálica	plancha metálica	Pza	10 años	1	750	750
						SUB TOTAL	1540

Fuente: Elaboración Propia

03 ACCESORIOS							
3.1	Válvulas de bola compacta	Diam. 3/4 globo	Pza	3 años	1	10	10
3.2	Válvulas de bola compacta	Diam. 1/2 globo	Pza	3 años	2	10	20
3.3	codo 90"	Diam. 1"	Pza	3 años	2	1,5	3
3.4	codo 90"	Diam. 1/2"	Pza	3 años	11	1,8	19,8
	codo 90"	Diam. 3/4	Pza	4 años	7	1,8	12,6
3.5	unión universal	Diam. 1"	Pza	3 años	1	1,5	1,5
3.6	Unión universal	Diam. 1/2"	Pza	3 años	4	1,5	6
3.7	unión universal	Diam. 3/4	Pza	3 años	5	1,5	7,5
3.8	niples	Diam. 1"	Pza	3 años	1	1	1
3.9	niples	Diam. 1/2"	Pza	3 años	4	1	4
3.10	niples	Diam. 3/4	Pza	3 años	5	1	5
3.11	Válvulas de check	Diam. 3/4	Pza	10 años	2	10	20
3.12	Tubo de agua	Diam. 1"	Pza	5 años	1	10	10
3.13	Tubo de agua	Diam. 1/2"	Pza	5 años	3	15	45
3.14	Caños	Diam. 1/2	Pza	10	4	10	40
3.15	Selladores		unidad		3	25	75
						SUB TOTAL	280.4
04 MANO DE OBRA							
4.1	Técnico	Gasfitero	2		2	200	400
4.2	Técnico	Mecánico eléctrico	2		2	100	200
						SUB TOTAL	600
05 MATERIALES DE ESCRITORIO							
5.1	Materiales de escritorio			0	500	500	500
						SUB TOTAL	500
06 INSTALACION Y PUESTA EN MARCHA							
6.1	Instalación y puesta en marcha				1	1137.5	1137.5
						SUB TOTAL	1137.5
						TOTAL	18221.4

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

En el desarrollo del siguiente trabajo de investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

Con la instalación y evaluación del equipo ablandador de agua, se logró disminuir la dureza total que contiene el agua de pozo que suministra al Laboratorio de Control de Calidad de la FIQ UNA Puno, con el uso de la resina catiónica LEWATIT, para tratamiento de agua en un sistema continuo. Mediante las pruebas de laboratorio se determinó los parámetros de operación, el caudal promedio de trabajo es de 8 gal/min y el máximo es de 10 gal/min, el ciclo de trabajo fue de 3 horas.

El tanque de ablandamiento con resina catiónica LEWATIT, tiene una capacidad de tratamiento óptimo. Con pruebas de carga efectuadas por medio de una bomba centrífuga de ½ HP, se obtuvo la eliminación de dureza de 478,11mg/L a 2,48 mg/L lo que representa un rendimiento del 99,48 % y la efectividad de la resina. La cinética de la reacción es de primer orden tomando en cuenta la ecuación lineal con 95,19% de confianza, por tanto, demuestra que es una reacción cuya velocidad depende de la concentración de la dureza en el agua elevando a la primera potencia, reacción de primer orden del tipo: A Productos. Mediante el cálculo partiendo de la ecuación $-r_A = K C_A$ demuestra que, $\ln \frac{[C_A]_0}{[C_A]} = kt$ obteniéndose la constante de orden de reacción $k = 0,0248 \text{ s}^{-1}$. De manera que esto nos indica que la reacción dependerá de la dureza del agua en tratamiento.

RECOMENDACIONES

Se dan las siguientes recomendaciones para el buen uso del equipo ablandador con resina catiónica.

La operación y mantenimiento del equipo ablandador catiónico debe ser realizado por personal debidamente capacitado ya que se encuentra programado para operar automáticamente. Teniendo en cuenta que la capacidad máxima de trabajo del equipo es de 80 psi o la resina podría ser evacuada por el tubo del desagüe

En el momento del lavado se recomienda lavar la resina con agua blanda y evitar con agua cruda por los contaminantes existentes en el agua que suministra al Laboratorio de Control de Calidad de la FIQ UNAP. Verificar la concentración de la salmuera para un buen rendimiento de la resina catiónica y evitar contratiempos, diluir el grano de sal industrial evitando taponeos en el tanque de salmuera y tener una mala regeneración de la resina.

Los ensayos se realizaron en diferentes épocas del año, lo que representa una variación de la dureza, es por ello que se trabajó con datos en época de estiaje obteniéndose un promedio de dureza de ingreso al ablandador de 478,11 mg/l ya que en las épocas de lluvias la dureza aumenta y se tienen que recalcular los volúmenes de regeneración.

BIBLIOGRAFIA

- Agamez, C. (2014) Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho para la potabilización de agua en el corregimiento de Málaga (Bolívar)
- Aranda, R. (2010) Mantenimiento E Instalación de un equipo suavizador
- Araujo, D. (2015) Diseño de Unidades de Desmineralización del Agua como Medio de Enfriamiento. tesis de pre grado de la Universidad Central del Ecuador.
- AWWA, A. W. (1990). *Calidad de Agua y Manual de Tratamiento*. Nueva York: McGraw Hill.
- Blanco, B (1994). La descalcificación del agua por resinas intercambiadoras de iones. España. Astramatic
- Cardenas León Gorge (2005) Calidad de Aguas en Ciencias Ambientales, Edit. U.D. Cldas fondo de Publicaciones Colombia
- Cervantes, L. Diseño y Construcción de un Ablandador de Agua Mediante el Empleo de Resinas DE Intercambio Iónico para Abastecer los Equipos Térmicos del Laboratorio de Termodinámica.
- Degrémont (1979) Manual técnico del agua. Cuarta edición Bilbao.
- Fetter, C. W. (1993). *Contaminant Hydrogeology*. Second Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River. 500 p
- Giles, R. (1996) Mecanica de fluidos e hiraulica. Serie de compedios Schaum Editorial McGraw Hill España.
- Hidalgo, F. E. y Guamán, M. V. (2006) Diseño y Construcción de un Desmineralizador de Lecho Multiple.

- Kirchmer, Cliff J. (2008) Asesor Regional en Laboratorio y Química Ambiental Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – CEPIS
- Leon Hanco, W. (2008). impacto en la salud por consumo de agua dura en la población de las irrigaciones de la parte baja de rio chili-arequipa. Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano.
- Luterl, E. (1940), “*Carbones activados*” Editorial círculo militar Argentina.
- Mott, R. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Cuarta edición.
- Morales, J. (1998). Diseño y construcción de un banco de pruebas paramedir pérdidas de carga en líquidos. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico UTFSM. Valparaíso - Chile
- Owens, D (1995), Practical principles of ion Exchange water treatment, USA. Tall OAKS PUBLISHING INC.
- PERRY .R. MANUAL DE INGENIERO QUÍMICA. Destilación. Vol. II.
- Ramos, J. (2012) Optimización del número de regeneraciones en el área de tratamiento de agua, por medio del arreglo ideal de los suavizadores en función de las propiedades físicas de la resina. Tesis de pre grado de la Universidad San Carlos de Guatemala
- Rohn and Hass Company (1988). Ion Exchange in water treatment. USA
- Spósito, G. (2008) The Chemistry of Soils. 2nd Edition, Oxford University Press. London.

- Ticona Flores, H (2004). Adsorción de Contaminantes Químicos del Agua Mediante Piedra Puzolánica, Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano.
- Valdez Cruz, V. (2014). Instalación y evaluación de un módulo de tratamiento de agua para la planta piloto de alimentos de facultad de Ingeniería Química-UNA. Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano.)
- Vargas Moran, F. (2011), evaluar el funcionamiento de reactores filtro de arena verde a presión para remoción de hierro y manganeso y de un ablandador catiónico de zeolita para remoción de dureza de agua” Tesis pregrado, Universidad Nacional del Altiplano.
- Vergara Yayón, F. (1984). Tratamiento de aguas Industriales. Lima: Kavi Editores S.A.

ANEXOS

- Anexo 1 Ficha Técnica de la Resina Catiónica Fuerte Lewatit S 1567
- Anexo 2 Análisis de Control de Calidad del Agua Suministrado al Laboratorio
de Control de Calidad de la FIQ
- Anexo 3 Tabla 9: Clasificación de Dureza
- Anexo 4 Tabla 10: Regenerantes para el Intercambio Iónico
- Anexo 5 Tabla 11: Propiedades Físicas de Intercambiadores Catiónicos Típicos
- Anexo 6 Tabla 12: Densidad de Soluciones de NaCl
- Anexo 7 Tabla 13: Valores de K para diversos accesorios
- Anexo 8 Tabla 14: Tanque Vertical Especial
- Anexo 9 Tabla 15: Características de las Tubería de PVC
- Anexo 10 Tabla 16: Características Tubería de PVC
- Anexo 11 Diagrama Modificado de Moody, para Obtener el Factor de Fricción
- Anexo 12 Panel Fotográfico

Anexo 13 Ficha Técnica de la Resina Catiónica Fuerte Lewatit S 1567

La **Lewatit S 1567** es un nuevo desarrollo, de resina de intercambio iónico fuertemente ácida, de grado alimentario, de bolas de distribución uniforme (monodispersas), a base de un copolímero de estireno divinilbenceno. La **Lewatit S 1567** está fabricada sin la utilización de disolventes. Las bolas monodispersas son química y osmóticamente muy estables y pueden ser desinfectadas de forma efectiva en los procesos de agua potable. La optimizada cinética conduce a una clara mejora de la capacidad útil en comparación con las resinas de intercambio iónico equivalentes de distribución granulométrica heterodispersa.

La **Lewatit S 1567** es especialmente apropiada para:

- ❖ ablandamiento en sistemas especiales con desinfección regular
- ❖ ablandamiento de agua potable

La **Lewatit S 1567** confiere a los lechos de los filtros las siguientes características especiales:

- ❖ una alta velocidad de intercambio en la regeneración y la carga
- ❖ una buena utilización de la capacidad total
- ❖ un bajo consumo de agua de lavado
- ❖ una distribución homogénea de los regenerantes, agua y soluciones, formando por ello, una homogénea zona de trabajo
- ❖ un gradiente de pérdida de carga prácticamente lineal en toda la altura del lecho, por ello es posible trabajar con mayores alturas de lecho

Descripción general

Forma de suministro	Na ⁺
Grupo funcional	Ácido sulfúrico
Matriz	Poliestireno reticulado
Estructura	Gel
Aspecto	aspecto Pardo oscuro, translúcido

Propiedades físico-químicas

		Unidades	
métricas			
Coefficiente de Uniformidad*		máx.	1,1
Tamaño medio del grano*		mm	0,60 (+/- 0,05)
Densidad aparente	(+/- 5 %)	g/l	840
Densidad aparente	(+/- 5 %)	g/l	1,28
Contenido en agua		% en peso	44 - 50
Capacidad total*		min. eq/l	2,0
Variación de VOLUMEN vol	Na ⁺ --> H ⁺	máx. %	10
Estabilidad	rango de pH		0 - 14
Almacenaje años	del producto	máx.	1
Almacenaje	rango de temperatura	°C	-20 - +40

Recomendaciones de puesta en marcha*
(Solo para agua potable y aplicaciones alimentarias)

Lavado	Agua desionizada	agua cruda
Velocidad lineal	aprox. m/h	5 - 8
Consumo de agua de lavado	aprox. BV	20
Temp. del agua de lavado	Temperatura de operación	Temperatura de trabajo
Regeneración	con el doble de cantidad normal, g/l	ver condiciones de operación
Lavado	con el doble de cantidad normal, BV	ver condiciones de operación

Condiciones de funcionamiento recomendadas*

		Unidades métricas	
Temperatura de trabajo		Máx. °C	120
Rango de pH de trabajo			0 - 14
Altura de lecho		Min. Mm	800
Pérdida de presión específica	(15 °C)	aprox. kPa*h/m ²	1,0
Pérdida de presión		máx. kPa	200
Velocidad lineal	carga	máx. m/h	60
Velocidad lineal	contra lavado (20 °C)	aprox. m/h	10 - 12
Expansión del lecho	(20 °C, por m/h)	aprox. % vol.	4
Zona libre	contra lavado (externo / interno)	% vol.	60
Regenerante			NaCl
Regeneración a contra corriente	nivel	aprox. g/l	70 - 20
Regeneración a contra corriente	concentración	% en peso	8 - 10
Regeneración a contra cocorrente	nivel	aprox. g/l	200
Velocidad lineal	regeneración	aprox. m/h	5
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Consumo de agua de lavado	lento / rápido	aprox. BV	4

Información adicional y regulaciones

Medidas de precaución

Los oxidantes fuertes, p. Ej. El ácido nítrico, en contacto con las resinas de intercambio iónico puede provocar reacciones violentas.

Toxicidad

Ver la hoja de seguridad antes de utilizar el producto. Contiene datos adicionales sobre la descripción del producto, transporte, almacenamiento, manipulación, seguridad y ecología.

Eliminación

En la Comunidad Europea los intercambiadores iónicos se tienen que eliminar según el correspondiente decreto de residuos, que puede ser consultado en la página de Internet de la Unión Europea.

Almacenaje

Se recomienda almacenar las resinas de intercambio iónico a temperaturas superiores al punto de congelación del agua, bajo techo, en lugar seco y sin exposición directa al sol. Si la resina se ha congelado, debe descongelarse lentamente a temperatura ambiente antes de su uso o manipulación. No debe provocarse el proceso de descongelación de forma acelerada.

**Anexo 14 Análisis de Control de Calidad del Agua Suministrado al
Laboratorio de Control de Calidad de la FIQ**

INTERESADO	Tesistas
MOTIVO	Control de calidad
MUESTREO	17/06/2016
ANÁLISIS	17/06/2016
CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS	
Aspecto	Límpido transparente
Color	Incoloro
olor	Inodoro
Sabor	Insípido
pH	7.41
C.E.	1189 Ms/cm
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
Dureza total (como CaCO₃)	570,91 mg/L
Alcalinidad	252,34 mg/L
Cloruros (com Cl⁻)	187,44 mg/L
Nitratos (como NO₃)	70,00 mg/L
Calcio (como Ca⁺⁺)	25,21 mg/L
Magnesio (como Mg ⁺⁺)	96,92 mg/L
Sólidos totales	758,35 mg/L
STD	586,00 mg/L
Salinidad	0,6

Anexo 15 Tabla 9: Clasificación de Dureza

Clasificación Dureza mg CaCO₃/l	
Blandas	0 – 100
Moderadamente duras	101 – 200
Duras	200 – 300
Muy duras	>300

Fuente: Cárdenas, (2005)

Anexo 16 Tabla 10: Regenerantes para el Intercambio Iónico

TIPO DE RESINA	REGENERANTE	Dosaje Reg. Lb/pie ³	Capacidad Operativa Resina en Kg/pie ³	Concentración % Regenerante	Tiempo Contacto Min.	Flujo En Gal.pie ² /min
Catiónica Sódica Alta Capacidad	NaCl (salmuera)	6 – 8	20 – 24	3 – 10	10 – 20	1 – 2
		10 – 15	25 – 30	3 – 10	10 – 20	1 – 2
Catiónica Hidrógeno Alta capacidad	Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄	4 – 6	10 – 12	10 – 15	10 – 30	0,5 – 2,0
		8 – 10	14 – 16	10 – 15	10 – 30	0,5 – 2,0
	Ácido clorhídrico HCl	4 – 6	16	10 – 15	10 – 30	0,5 – 2,0
		8 – 10	25	10 – 15	10 – 30	0,5 – 2,0

Fuente: Vergara (1988)

Conversiones para el intercambio iónico

$1 \text{ kg/pie}^3 = 64,5 \text{ gr CaCO}_3/\text{pie}^3 \text{ (dureza)}$
 $1,000\text{g CaCO}_3/\text{pie}^3 = 35,31 \text{ g CaCO}_3/\text{l} = 15,50 \text{ kg/pie}^3$
 $1 \text{ meq./l} = 21,70 \text{ g CaCO}_3/\text{pie}^3$
 $1 \text{ kg/pie}^3 \text{ CaCO}_3 = 46,0 \text{ meq/l}$

Anexo 17 Tabla 11: Propiedades Físicas de Intercambiadores Catiónicos Típicos

INTERCAMBIADORES CATIÓNICOS SÓDICOS	TAMAÑO (MALLA)	PESO (lb/pie ³)	COLOR
Resina de poliestireno alta capacidad	16 – 50	53	Ambar
Carbonáceas	16 – 50	24 – 30	Negro
Zeolitas sintéticas (tipo gelatinoso)	16 – 50	51	Blanco o blanco amarillo
Greensand alta capacidad	16 – 50	80	Negro
Greensand estándar	16 – 50	85	verde

Fuente: Owen (2008)

Anexo 18 Tabla 12: Densidad de Soluciones de NaCl

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	1,98 · 10 ⁶	1,781 · 10 ⁻³	1,785 · 10 ⁻⁶	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	2,05 · 10 ⁶	1,518 · 10 ⁻³	1,519 · 10 ⁻⁶	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	2,10 · 10 ⁶	1,307 · 10 ⁻³	1,306 · 10 ⁻⁶	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	2,15 · 10 ⁶	1,139 · 10 ⁻³	1,139 · 10 ⁻⁶	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	2,17 · 10 ⁶	1,102 · 10 ⁻³	1,003 · 10 ⁻⁶	0,0728	2,34

Fuente: Perry J. 1996

Anexo 19 Tabla 13: Valores de K para diversos accesorios

Piezas	Descripción	Diámetro de los accesorios, pulg		
		1/2	1	1 1/4
	Codo de 90°	0,32	0,28	0,26
	Válvula de bola	0,08	0,07	0,07
	Te	0,9	0,9	0,9

Anexo 20 Tabla 14: Tanque Vertical Especial

TANQUE VERTICAL ESPECIAL			
DESCRIPCIÓN	A	B	C
TVC – 250 L	0,70 m	0,80 m	18 pulg.
TVC – 450 L	0,85 m	0,99 m	18 pulg.
TVC – 600 L	0,96 m	1,10 m	18 pulg.
TVC – 750 L	1,10 m	1,07 m	18 pulg.
TVC – 11000 L	1,10 m	1,39 m	18 pulg.

Fuente: Ficha Técnica De Tanques De Almacenamiento

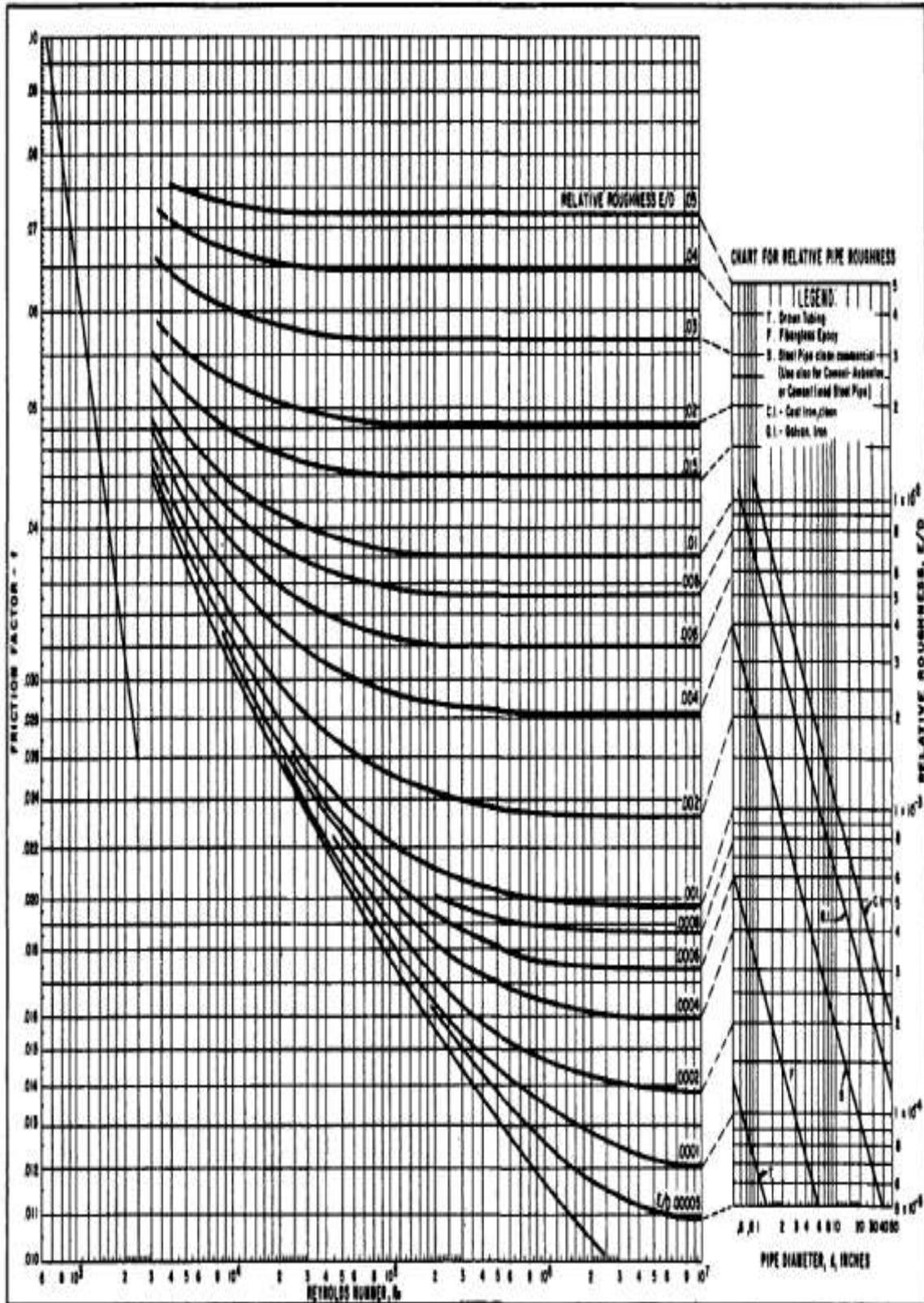
Anexo 21 Tabla 15: Características de las Tubería de PVC

PROPIEDAD	VALOR
Coeficiente de rugosidad	Manning 0.009 Hazen Williams 150
Módulo de elasticidad	28,100 kg/cm ²
Hermeticidad	total

Anexo 22 Tabla 16: Características Tubería de PVC

Diámetro Nominal mm	Diámetro Exterior mm	Tolerancia +-		Espesor de la Pared mm	Tolerancia (+) mm
40	40	0,2	0,3	1,8	0,4
50	50	0,2	0,3	1,8	0,4
75	75	0,3	0,3	1,8	0,4
110	110	0,3	0,4	2,3	0,4
160	160	0,4	0,5	3,3	0,5
200	200	0,4	0,6	4,0	0,6

Anexo 23 Diagrama Modificado de Moody, para Obtener el Factor de Fricción



Anexo 24 Panel Fotográfico

	
<p>Fotografía 1: Llenado de resina al ablandador</p>	<p>Fotografía 2: Desempaque del cabezal Twin del tanque ablandador</p>
	
<p>Fotografía 3: Ajuste del cabezal Twin</p>	<p>Fotografía 4: Conexiones eléctricas</p>
	
<p>Fotografía 5: Ensamble del filtro de sedimentación.</p>	<p>Fotografía 6: filtro de sedimentación.</p>



Fotografía 7: tanques ablandadores



Fotografía 8: tanque de sal muera



Fotografía 9: vista trasera del cabezal twin



Fotografía 10: Capacitación por parte de la Empresa HIDROMATIC



Fotografía 11: equipo ablandador de agua



Fotografía 12: tanque de almacenamiento para el agua blanda

	
<p>Fotografía 13: tanque de almacenamiento para el agua cruda</p>	<p>Fotografía 14: vista de entrada de agua cruda y salida de agua blanda</p>
	
<p>Fotografía 15: BOMBA DE 1/2 HP</p>	<p>Fotografía 16: resina catiónica LEWATIT</p>
	
<p>Fotografía 17: Controlador eléctrico de las 2 bombas</p>	<p>Fotografía 18: Sal industrial</p>

	
<p>Fotografía 19: vista del equipo completo</p>	<p>Fotografía 20: salida de agua de regeneración</p>
	
<p>Fotografía 21: ejecutores del trabajo de investigación tecnológica</p>	<p>Fotografía 22: integrantes realizando pruebas de análisis</p>
	
<p>Fotografía 23: muestra de la dureza del agua</p>	<p>Fotografía 24: muestra del ablandamiento del agua</p>