

**Implementación de un sistema para la obtención de agua desmineralizada para el  
laboratorio 210 PTG UIS.**

**Stiven Mauricio Lancheros Benítez y Cristian Fernando Franco Castro**

**Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Químico**

**Director**

**Carlos Jesús Muvdi Nova**

**Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.**

**Codirector**

**Juan Carlos González Téllez**

**Ingeniero Químico, M.Sc.**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Ingeniería Química**

**Ingeniería Química**

**Bucaramanga**

**2023**

### **Agradecimientos**

A Dios y a la vida por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos.

A mis padres por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento, sus consejos, su amor, por haberme formado como un hombre de bien y porque siempre serán mi ejemplo a seguir.

A mis hermanos por su apoyo incondicional, por sus voces de aliento y consejos para poder esforzarme y lograr esta meta tan importante en mi vida.

A mi compañero de tesis por todas las experiencias vividas, por los gratos momentos y el trabajo compartido.

A nuestro director Dr Carlos Jesús Muvdi Nova por su calidad de docente para guiarnos y hacer todo lo necesario en el proceso de desarrollo del trabajo de investigación, muchas gracias y bendiciones.

A la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, sus directivos, docentes y personal administrativo por el apoyo brindado durante mi carrera profesional.

*Stíven Maurício Lancheros B.*

En primer lugar, le agradezco a Dios porque siempre me acompaña y guía en cada paso que doy en mi vida.

A mis padres y hermanas que siempre me brindan su apoyo para lograr mis objetivos personales y académicos. Ellos con su apoyo incondicional, siempre me motivan a conseguir mis metas y no renunciar ante las adversidades.

Le agradezco profundamente a nuestro director Dr Carlos Jesús Muvdi Nova por su dedicación y en especial por su paciencia, sin sus consejos y correcciones no hubiese sido posible llegar a esta instancia tan esperada.

Agradezco a nuestro codirector Prof. Juan Carlos González Téllez por su ayuda en el transcurso de este trabajo.

A mi compañero de tesis ya que se ha convertido en mi amigo, cómplice y hermano, gracias por las horas compartidas, el trabajo realizado y las historias vividas.

A la Universidad Industrial de Santander por la exigencia y experiencias vividas en sus instalaciones por el tiempo que me ha permitido obtener mi título.

*Cristian Fernando Franco C.*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos.....	12
1.1. Objetivo general .....	12
1.2. Objetivos específicos.....	12
2. Marco conceptual .....	13
2.1. Parámetros físicos del agua .....	13
2.2. Parámetros químicos del agua.....	13
2.3. Desmineralización y calidad del agua.....	14
3. Estado del arte .....	15
4. Metodología.....	17
4.1. FASE 1: Diagnóstico inicial de la estructura disponible en el Laboratorio 210 PTG UIS para su uso en la desmineralización de agua. ....	18
4.2. FASE 2: Montaje del sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico. ..	18
4.3. FASE 3: Evaluación de las condiciones de operación que garanticen los parámetros de calidad del agua.....	19
5. Análisis y discusión de resultados .....	20
5.1. Diagnóstico inicial de la estructura disponible en el Laboratorio 210 PTG UIS para su uso en la desmineralización de agua. ....	20
5.2. Montaje del sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico. ....	28
5.3. Evaluación de las condiciones de operación que garanticen los parámetros de calidad del agua.....	33

DESMINERALIZACIÓN DE AGUA POR INTERCAMBIO IÓNICO	5
6. Conclusiones.....	37
7. Recomendaciones .....	38
Referencias bibliográficas.....	39
Anexos .....	42

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones de la normativa ASTM D1193 2011.....	15
Tabla 2. Elementos disponibles para el sistema de intercambio iónico.....	20
Tabla 3. Inventario de equipos y demanda de agua desmineralizada en el laboratorio 210 PTG	24
Tabla 4. Datos de pH, conductividad y turbidez por 10 días (05 de septiembre de 2021) .....	27
Tabla 5. Requerimientos, instalaciones efectuadas y descripción del montaje .....	29
Tabla 6. Datos de pH y conductividad en el tiempo al utilizar las resinas nuevas sin regeneración previa.....	31
Tabla 7. Datos de pH y conductividad en el tiempo al utilizar las resinas halladas en las columnas sin regeneración previa .....	32
Tabla 8. Variaciones de las condiciones de operación .....	35
Tabla 9. Resultados prueba final en el equipo de desmineralización con las condiciones de operación definidas: PO=12psi, Qs=1,72L/min .....	35
Tabla 10. Resultados del duplicado de la prueba final en el equipo de desmineralización con las condiciones de operación definidas: PO=12psi, Qs=1,72L/min.....	36

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama Metodológico.....	17
Figura 2. Montaje en jeringas de 60 ml .....	19
Figura 3. Equipo para desmineralización.....	21
Figura 4. a) Resina aniónica contenida en la columna y b) lámina perforada de material polimérico y malla para contención de resinas. ....	23
Figura 5. Caracterización del agua suministrada por la red, al laboratorio 210 PTG.....	27
Figura 6. Instalaciones efectuadas para el sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico.....	28
Figura 7. Montaje a escala pequeña del sistema de columnas de intercambio .....	30
Figura 8. Pruebas del equipo de desmineralización.....	34

**RESUMEN**

**Título:** Implementación de un sistema para la obtención de agua desmineralizada para el laboratorio 210 PTG UIS. \*

**Autores:** Cristian Fernando Franco Castro, Stiven Mauricio Lancheros Benítez. \*\*

**Palabras Clave:** Agua, desmineralización, intercambio iónico, resinas, regenerante, conductividad, turbidez, pH.

**Descripción:**

Con este Trabajo de grado se puso en marcha un sistema para la obtención de agua desmineralizada, que proporcione flexibilidad e independencia a los procesos que se desarrollan al interior del laboratorio. Dicho sistema de desmineralización de agua está fundamentado en resinas de intercambio iónico instaladas dentro de carcasas existentes en el laboratorio 210 del EDI PTG UIS. El agua obtenida se evaluó en base a la norma establecida por la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Se realizó un inventario de elementos disponibles para el sistema en el cual se detectó la necesidad de una válvula para la entrada de agua y la instalación de un filtro antes del sistema de desmineralización. Se determinó que las resinas al interior de las carcasas se encontraban en buenas condiciones para ser usadas; también se establecieron soluciones de NaOH al 4% p/p como regenerante para la resina catiónica y de HCl al 6% p/p para la resina aniónica. Además, se fijaron condiciones de operación después de una serie de pruebas; dichas condiciones son: presión de 12 psi y un caudal de salida de 1,72 L/min para un tiempo de funcionamiento aproximado de 7 min en el cual se logra obtener un agua con conductividad de 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , turbidez de 0,1 NTU y un pH de 7,2 dando así un agua tipo IV según la norma de la ASTM.

---

\* Trabajo de investigación – Pregrado en Ingeniería Química

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química

Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Ingeniero Químico. MSc., PhD.

Codirector: Juan Carlos González Téllez. Ingeniero Químico. MSc.

**ABSTRACT**

**Title:** Implementation of a system for obtaining demineralized water for the laboratory 210 PTG UIS. \*

**Authors:** Cristian Fernando Franco Castro, Stiven Mauricio Lancheros Benítez. \*\*

**Keywords:** Water, demineralization, ion exchange, resins, regenerant, conductivity, turbidity, pH.

**Description:**

With this degree work, a system for obtaining demineralized water was implemented, which provides flexibility and independence to the processes developed inside the laboratory. This water demineralization system is based on ion exchange resins installed inside existing housings in laboratory 210 of EDI PTG UIS. The water obtained was evaluated according to the standards established by the American Society for Testing and Materials (ASTM).

An inventory of elements available for the system was carried out, in which the need for a water inlet valve and the installation of a filter before the demineralization system was detected. It was determined that the resins inside the casings were in good conditions to be used; solutions of NaOH at 4% w/w as regenerant for the cationic resin and HCl at 6% w/w for the anionic resin were also established. In addition, operating conditions were set after a series of tests; these conditions are: pressure of 12 psi and an outlet flow rate of 1.72 L/min for an approximate operating time of 7 min in which water with a conductivity of 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , turbidity of 0.1 NTU and a pH of 7.2 is obtained, giving a type IV water according to the ASTM standard.

---

\* Research work - Undergraduate Degree in Chemical Engineering

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering

Director: Carlos Jesús Muvdi Nova. Ingeniero Químico. MSc., PhD.

Codirector: Juan Carlos González Téllez. Ingeniero Químico. MSc

## **Introducción**

### **Problemática**

En el Laboratorio 210 del Edificio de Investigaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (EDI PTG), existen equipos a escala piloto como: el piloto de membranas de cerámica, piloto de evaporación de película descendente al vacío, secador tipo aspersor, trituradora, piloto de hidrólisis enzimática, entre otros, utilizados para la investigación en líneas relacionadas con la industria de alimentos. Especialmente, los equipos destinados a procesos con membranas requieren cantidades importantes de agua desmineralizada para su correcto funcionamiento. Lo anterior se debe a que los minerales generalmente contenidos dentro del agua potable suministrada por el acueducto, generan problemas de colmatación de las membranas, reduciendo con ello su vida útil.

### **Justificación**

En gran parte de los laboratorios se requiere del uso de agua con un mínimo de impurezas debido a que su uso como disolvente es muy común, además de reducir el sesgo en los resultados de una investigación y aumentar su confiabilidad; por eso en el Laboratorio 210 del Edificio de Investigaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará (EDI PTG) se requiere el uso de agua desmineralizada para los equipos a escala piloto que allí se encuentran, los cuales son usados para la investigación en líneas relacionadas con la industria de alimentos.

El agua desmineralizada se necesita para el correcto funcionamiento de las unidades presentes en el laboratorio, especialmente para aquellas que realizan operaciones con membranas. Esto se debe a que los minerales contenidos en el agua generan problemas de colmatación en las membranas reduciendo así su vida útil. En este trabajo, el cual se realizó con

las limitaciones de ingreso a los laboratorios del PTG UIS debido a la pandemia causada por el COVID-19, se pone en marcha un sistema para la obtención de agua desmineralizada que proporciona el agua necesaria para los procesos al interior de este laboratorio. Este sistema es basado en el uso de resinas de intercambio iónico las cuales son instaladas dentro de un equipo de desmineralización existente en el laboratorio, al cual no se le estaba dando uso.

Dentro de este trabajo de grado se cuestionó el uso de instrumentación adicional con el fin de obtener un agua con la menor cantidad de impurezas posible, además de las mejores condiciones de operación: presión, caudal y tiempo de trabajo, para tener al final del proceso un agua desmineralizada con propiedades químicas que serán evaluadas según la norma ASTM.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Implementar un sistema basado en resinas de intercambio iónico para la obtención de agua desmineralizada, necesaria para el laboratorio 210 del Edificio de Investigaciones del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

### **1.2. Objetivos específicos**

- Realizar el diagnóstico del estado de la estructura disponible en el Laboratorio 210 EDI PTG UIS, para el establecimiento de las especificaciones del sistema de desmineralización de agua.
- Configurar el sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico para el cumplimiento de los requerimientos de calidad.
- Determinar las condiciones de operación que garanticen la obtención de agua desmineralizada requerida para las distintas unidades de proceso del Laboratorio 210 EDI PTG UIS.

## 2. Marco conceptual

La calidad del agua se ha valorado a partir de características físicas y químicas las cuales permiten obtener información de su naturaleza y composición. Por ello, para el agua desmineralizada, se deben conocer los siguientes parámetros físicos y químicos:

### 2.1. Parámetros físicos del agua

Turbidez: Es la dificultad que presenta el agua para transmitir la luz debido a la presencia de materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos. Dichos materiales son complicados de filtrar y decantar, y pueden provocar la formación de depósitos en conducciones y equipos. Se mide comparando la turbidez inducida en otras sustancias. La turbidez se elimina mediante procesos de filtración, coagulación y decantación (Chang, 1999).

Conductividad: Es la capacidad del agua para conducir electricidad y representa la cantidad de iones que contiene dicha agua. Sus unidades de medida son  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

### 2.2. Parámetros químicos del agua

pH: Mide la naturaleza alcalina o ácida de una disolución. Expresa la concentración de iones hidrógeno. El instrumento empleado para la medición es el pHmetro o papeles indicadores de pH. Es importante tener en cuenta la temperatura, pues el pH varía con ella. Se modifica el pH neutralizando los iones presentes en la disolución. (Chang, 1999)

Dureza: Es una medida de la capacidad del agua para formar incrustaciones en conducciones o equipos. Se debe a la presencia de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua (Romero & Niño, 2017).

Cloruros: Son sales de ion cloruro muy solubles, generalmente asociadas al ion sodio. Mientras que las aguas dulces contienen entre 10 y 250 mg/L de cloruros, las aguas salobres pueden llegar a contener miles de ppm. El agua de mar contiene aproximadamente 20.000 mg/L.

Las aguas con cloruros pueden ser muy corrosivas debido al pequeño tamaño del ion, el cual puede penetrar en la capa protectora de la interfase óxido - metal, reaccionando con el hierro estructural. Se elimina por intercambio iónico, y debido a que es más difícil de separar que otros iones, para aguas tratadas como la requerida en este proyecto (Arnau Segarra, 2015).

### **2.3. Desmineralización y calidad del agua**

El proceso de desmineralización consiste en la eliminación total o parcial de los iones presentes en el agua, tanto de origen catiónico como de origen aniónico. Los tratamientos más utilizados para este fin están basados en operaciones de evaporación/destilación, membranas (nanofiltración, ósmosis inversa), precipitación química (cal en caliente) y por intercambio iónico (a través de resinas o de membranas de intercambio) (Chang, 1999). El tratamiento por intercambio iónico presenta ventajas con respecto a las demás técnicas considerando el corto tiempo de contacto resina/agua, la afectación generada por cambios en la carga de material del agua de alimentación, además de una extensa variedad de resinas en el mercado. Es importante aclarar que este proceso no elimina microorganismos ni materia orgánica, pero remueve las sales minerales del agua, logrando disminuir las afectaciones generadas en equipos de distintos procesos tales como colmataciones irreversibles y obstrucción de flujo (Araujo Ulloa, 2015).

Los sistemas de intercambio iónico separan los contaminantes iónicos de una solución a través de un proceso fisicoquímico donde los iones no deseados son reemplazados por iones de la misma carga eléctrica. Estos sistemas operan habitualmente con la ordenación de lecho, fijo o móvil, contenido en un depósito adecuadamente configurado para favorecer la circulación del agua en su interior. Los equipos de tratamiento consisten en una o varias vasijas cilíndricas cerradas, en cuyo interior la resina entra en contacto con el agua a tratar y la solución regenerante (Sánchez Ruíz, 2015). Para la configuración de su operación, se deben tener en cuenta el tipo de

resina y capacidad de intercambio, el factor de flujo, la duración de tratamiento, el volumen de resina, el caudal a tratar, entre otros (Pirela Salazar, 2008).

Las características iniciales del agua a tratar: turbiedad, conductividad y pH deben ser ajustadas para el cumplimiento de normativas y estándares de uso (Morales Sanabria, 2020). La normativa ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D1193 2011 “Especificaciones estándares para agua reactiva”, clasifica el agua en cuatro tipos (I, II, III y IV). En las Tabla 1 se muestran los valores y especificaciones para cada tipo de agua (ASTM International, 2001).

**Tabla 1**

*Especificaciones de la normativa ASTM D1193 2011.*

<b>Parámetros</b>	<b>Tipo I *</b>	<b>Tipo II **</b>	<b>Tipo III ***</b>	<b>Tipo IV</b>
Conductividad a 25 °C ( $\mu\text{S/cm}$ )	0,056	1	0,25	5
Resistividad ( $\text{M}\Omega$ )	18	1	4	0,2
Sílice ( $\text{mg/L}$ )	3	3	500	---
pH	---	---	---	5 - 8
Materia oxidable Oxígeno máximo ( $\text{mg/L}$ )	10	50	200	---

\* Requiere filtro de membrana de 0,2  $\mu\text{m}$ . \*\* Preparado por destilación. \*\*\* Requiere filtro de membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ .

*Nota.* Adaptado de (ASTM International. (2001). Designation: D 1193 «Standard Specification for Reagent Water»).

### 3. Estado del arte

En este apartado se describen algunas de las investigaciones más importantes respecto de la implementación de un sistema para la obtención de agua desmineralizada que se han ejecutado previamente y que sirven como soporte al actual informe.

El estudio desarrollado por Alemán y Hernández (2021), plantean el diseño de un sistema de purificación de agua del cual tiene como fin obtener agua para uso farmacéutico a nivel

industrial. Se inicia el diseño estableciendo los tipos de agua que se quieren obtener; por lo cual se procede a la investigación de los parámetros de calidad que deben cumplir los distintos tipos de agua que requiere una farmacéutica; los tipos de agua más utilizados son agua destilada, agua desmineralizada y agua ultrapura. Establecidos los tipos de agua se procedió a la investigación de las operaciones unitarias; que mediante su aplicación generan el tipo de agua que se requiere (Alemán & Hernández, 2021).

Por otro lado, Romero y Niño (2017), desarrollaron un estudio titulado “validación del sistema de purificación de agua de la empresa Tecmol Farmaceutica S.A.S”, donde si bien no ejecutan toda la implementación, si hacen el estudio correspondiente a la verificación y actualización del mismo, con la intención de que el agua que se tiene disponible para los diversos procesos que se ejecutan en la operación, se encuentre en óptimas condiciones y disminuir el aporte de impurezas y elementos que no son necesarios a su mínima expresión (Romero & Niño, 2017).

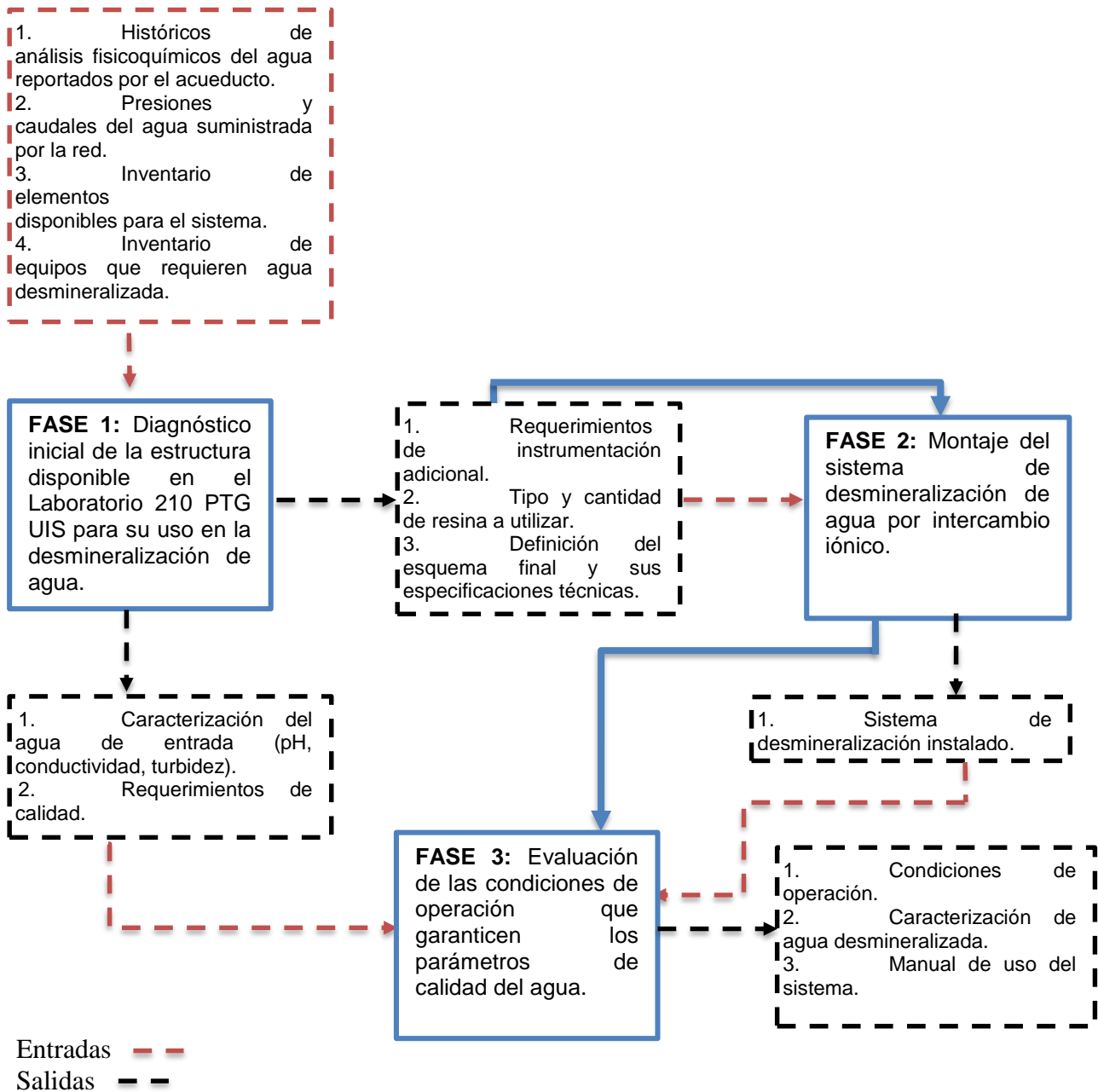
Esto muestra la importancia de generar estos procesos de tratamiento de agua tan específicos a partir de las necesidades del laboratorio, ya que el agua es un compuesto que se utiliza en todos los procesos de la vida y las actividades tanto comerciales como de investigación no son la excepción. Es necesario contar con procesos que permitan disponer del recurso en óptimas condiciones, ya que las impurezas y excesos pueden generar cambios importantes en el producto final.

### 4. Metodología

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, donde se muestran las fases a desarrollar durante el proyecto de investigación.

**Figura 1**

*Diagrama Metodológico.*



#### **4.1. FASE 1: Diagnóstico inicial de la estructura disponible en el Laboratorio 210 PTG UIS para su uso en la desmineralización de agua.**

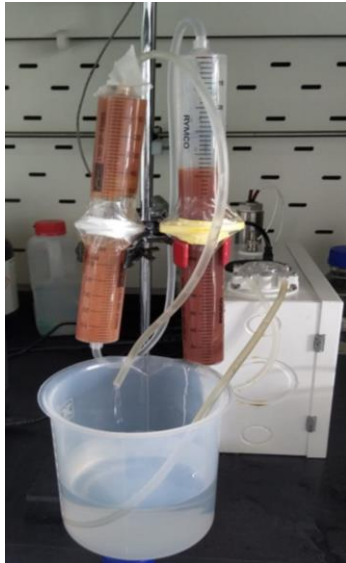
En esta etapa se realizó un inventario de elementos que se encontraban disponibles para el sistema, en dicho inventario se detectó el requerimiento de instrumentación adicional con la cual se definió el esquema final con sus especificaciones técnicas. Las resinas por utilizar se determinaron a través de un estimado de las propiedades requeridas del agua a emplear en cada equipo, además de un estimado de gasto calculado para cada equipo y de la caracterización del agua entrante. Dicha caracterización se obtuvo a partir de reportes históricos de análisis fisicoquímicos del agua, los cuales fueron informados por el acueducto y también por mediciones tomadas en el laboratorio; a su vez, se determinaron los requerimientos de calidad teniendo en cuenta las características del agua adecuadas para cada unidad del laboratorio.

#### **4.2. FASE 2: Montaje del sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico.**

En esta etapa se realizaron unas pruebas en un montaje a pequeña escala con un sistema de jeringas de 60 ml mostrado en la Figura 2, en donde se simuló el sistema de desmineralización por intercambio iónico. Posteriormente, con ayuda de la instrumentación adicional previamente identificada, el tipo y la cantidad de resina y el esquema final de desmineralización se configuró el sistema de desmineralización en la carcasa existente en el laboratorio 210. Se efectuaron pruebas de arranque con la finalidad de tener una caracterización inicial del sistema y detectar averías, daños e irregularidades. A partir de estas pruebas se implementaron los ajustes necesarios para el correcto funcionamiento del equipo de desmineralización.

**Figura 2**

*Montaje en jeringas de 60 ml.*

**4.3. FASE 3: Evaluación de las condiciones de operación que garanticen los parámetros de calidad del agua.**

En esta etapa se evaluaron condiciones de operación de variables manipulables tales como el caudal de entrada al sistema, la presión del sistema, el tiempo que dura el agua recorriendo el equipo y la cantidad de resina dentro de las columnas, mediante la realización de pruebas experimentales. Estas pruebas permitieron ajustar los parámetros de operación de modo que se alcanzó el mayor grado de desmineralización posible bajo las condiciones previamente analizadas. La caracterización del agua inicial entregada por la red de suministro se utilizó como referencia en los resultados obtenidos de la operación del sistema de desmineralización. Finalmente, se elaboró el manual de uso del sistema incluyendo los protocolos de funcionamiento y regeneración.

## 5. Análisis y discusión de resultados

### 5.1. Diagnóstico inicial de la estructura disponible en el Laboratorio 210 PTG UIS para su uso en la desmineralización de agua.

Esta fase inició con la realización del inventario de piezas existentes en el sistema de intercambio iónico, con el fin de identificar los elementos requeridos para su puesta en marcha. En la Tabla 2, se evidencian los elementos del piloto disponibles en el Laboratorio 210 PTG.

**Tabla 2**

*Elementos disponibles para el sistema de intercambio iónico.*

Descripción	Cantidad
Columna cilíndrica en PVC diámetro nominal 4 in de 132 cm de alto para desmineralización de agua.	2
Manómetro Rango 0 - 100 PSI (0 – 7 kg/cm <sup>2</sup> )	1
Carcasa estándar de 10 in x 2,5 in para filtro de agua	1
Válvula de bola de 1 in	7
Codos de 90° en PVC para tubería de 1 in	12
TEE sanitaria en PVC para tubería de 1 in	5
Unión macho roscado en PVC de 1 in	5
Unión universal en PVC para tubería de 1 in	9
Tubería en PVC de 1 in	3
Acople roscado para manguera	4
Soporte metálico	1
180 cm de alto X 85 cm de ancho X 30 cm de profundo	

A partir del inventario anterior, se identificaron 5 requerimientos principales necesarios para el buen funcionamiento de las columnas de intercambio mostrados en la Figura 3.

### Figura 3

*Equipo para desmineralización.*



- 1 Instalación de una entrada de agua proveniente de la red del laboratorio al equipo de desmineralización.
- 2 Cartucho para el sistema de filtración frontal, el cual cuenta con la carcasa a la entrada del sistema.
- 3 Sellado de una de las salidas disponibles en la columna aniónica (al final del sistema).
- 4 Conexión de salida (manguera) para el agua obtenida del equipo.
- 5 Tanque de almacenamiento.

El diagnóstico del sistema involucró la revisión interna y externa de las columnas de intercambio. La parte externa estaba en buena condición, mientras que en la parte interna se encontraron resinas aniónica y catiónica, las cuales llenaban las columnas en su totalidad, y habían permanecido humectadas por un largo periodo de tiempo, tal como se muestra en la Figura 4a. En la Figura 4b se evidencia una lámina perforada de material polimérico y una malla de diámetro de orificio menor al diámetro de las resinas, la cual tiene como fin la contención de las resinas en la parte superior e inferior de las columnas de intercambio iónico. Es importante mencionar que este equipo fue recibido de un grupo de investigación UIS, el cual no le había podido dar uso.

Las resinas por utilizar en el sistema de desmineralización deben ser aniónicas fuertemente básicas y catiónicas fuertemente ácidas. Mediante estas resinas se busca eliminar todos los aniones (carbonatos y silicatos) y los cationes, intercambiando sodios o protones del agua de la red; siendo estas características, las necesarias para la obtención de agua desmineralizada.

Se analizó la posibilidad de adquisición de resinas aniónica y catiónica nuevas, anticipando un posible estado de deterioro e inutilización de las resinas encontradas al interior de las columnas, o en su defecto como reservas para un posterior cambio.

**Figura 4**

a) Resina aniónica contenida en la columna y b) lámina perforada de material polimérico y malla para contención de resinas.

a)



b)



El volumen que ocupa la resina en el equipo no debe ser mayor del 80% del volumen total de la columna de intercambio iónico. Esto permite que la resina se expanda libremente en el proceso de retrolavado (Agamez Salvador, 2014). El volumen de la columna se calculó por medio de la siguiente ecuación.

$$V = A * h \text{ (Ec.1)}$$

Donde:

$V =$  Volumen de la columna

$A =$  Area de la superficie total de la columna

$h =$  Altura de la columna

Dando un volumen de la columna aproximado de 12,77 L. El volumen de la resina es el 80% del volumen total de la columna, es decir, 10,22 L.

El laboratorio 210 PTG UIS (Laboratorio de procesos sin microorganismos) se caracteriza por la transformación de subproductos agrícolas, empleando equipos a escala piloto. Por ello, el agua requerida para las distintas operaciones corresponde primordialmente a la necesaria para el lavado de dichas unidades y preparación de volúmenes de proceso. Para el cálculo de los requerimientos se realizó un inventario de los equipos existentes en el laboratorio, especificando su funcionalidad, capacidad, demanda de agua y frecuencia de uso mensual. En la Tabla 3 se muestra el inventario anteriormente descrito.

**Tabla 3**

*Inventario de equipos y demanda de agua desmineralizada en el laboratorio 210 PTG.*

No.	Nombre del equipo	Descripción y parámetro	Capacidad	Demanda de agua (L)	Frecuencia de uso mensual
1	Unidad de hidrólisis	Unidad para hidrolizar distintas materias primas de tipo agroindustrial. Está compuesta por 2 tanques con resistencias eléctricas. El agua requerida está destinada al lavado y a la preparación de soluciones.	10 L	20	2 días
2	Tanque enchaquetado	Utilizado para realizar extracciones y desnaturalización proteica. El agua requerida es principalmente para el lavado del tanque.	60 L	30	8 días
3	Piloto de filtración por membrana	Piloto para trabajar con membranas tubulares de material cerámico, utilizado para la clarificación, concentración y purificación de soluciones agroindustriales. El agua requerida está destinada para pruebas de permeabilidad, preparación de soluciones de limpieza y de lavado de las membranas.	10 L	40	5 días

Continuación Tabla 3.

4	Fermentador de café	Equipo destinado a la fermentación de subproductos del proceso del beneficio del café. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	20 kg	20	2 días
5	Piloto de sistema de secado	Equipo destinado al secado de café aplicando los diferentes principios utilizados a nivel industrial. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	46 kg	20	2 días
6	Evaporador de película descendente al vacío	Piloto utilizado para la concentración de soluciones a presiones inferiores a la atmosférica. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	30L	30	15 días
7	Secador por aspersión	Equipo utilizado para el secado de soluciones concentradas provenientes de esquemas de procesamiento de materias primas agroindustriales. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	50 L	30	8 días
8	Biorreactor instrumentado	Equipo utilizado para el desarrollo de bioprocesos, en especial de tipo fermentativo. Este piloto es modulable, adaptable para volúmenes de 1 L, 5 L y 10 L. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	10 L	15	8 días
9	Picadora, trituradora	Equipo utilizado para la trituration de residuos agroindustriales utilizados como materia prima. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	10 kg	10	2 días
10	Baño termostático	Equipo utilizado para el calentamiento o enfriamiento de fluidos destinados a la transferencia de energía a soluciones de trabajo.	12 L	12	8 días

*Continuación Tabla 3.*

11	Filtro prensa	Equipo utilizado para separar insolubles de una mezcla líquida. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	20 L	20	2 días
12	Descremadora	Equipo separador centrífugo, utilizado para el descremado de leche y lactosuero. El agua requerida es principalmente para el lavado del equipo.	Operación en continuo	10	2 días
13	Tamizador	Instrumento para separar partículas sólidas, provenientes de un triturado, según su tamaño. El agua requerida para este equipo es principalmente para su lavado.	Operación en continuo	5	2 días
Demanda total de agua mensual (L)				<b>1426</b>	

La caracterización del agua entrante al sistema se obtuvo mediante una comparación de mediciones promedio de pH, conductividad y turbidez. Dichas mediciones fueron tomadas dentro del laboratorio y de reportes históricos de análisis fisicoquímicos del agua, informados por la empresa Piedecuestana de Servicios Públicos de Piedecuesta para los cuatro primeros meses del año 2021 (Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P, 2021) (ver **Anexo 1**). En un reporte reciente del año 2022, los rangos reportados en los que se encuentra la calidad del agua se mantienen iguales a los rangos informados para el año 2021. En la Tabla 4 se presentan las mediciones tomadas del agua de la red por 10 días, y en la Figura 5 se presenta la comparación entre los datos reportados y los medidos en el laboratorio.

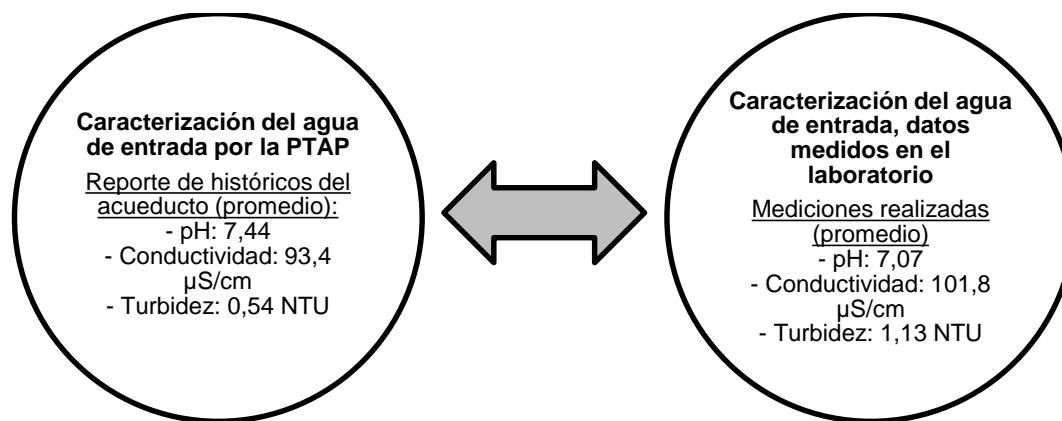
**Tabla 4**

Datos de pH, conductividad y turbidez tomados por 10 días (05 de septiembre de 2021).

Día	pH	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	Turbidez (NTU)
1	7,28	105	1,20
2	7,01	107	1,25
3	6,96	102	1,28
4	6,94	99	1,16
5	6,81	101	1,16
6	7,37	105	0,90
7	6,86	99	1,05
8	7,04	90	1,10
9	6,97	103	0,96
10	7,41	107	1,25
<b>PROMEDIO</b>	<b>7,07</b>	<b>101,8</b>	<b>1,13</b>

**Figura 5**

Caracterización del agua suministrada por la red, al laboratorio 210 PTG.



Partiendo de la caracterización del agua de entrada, los requerimientos hallados para el funcionamiento del sistema y de las propiedades del agua necesarias para lavado de los equipos, se decidió que el agua obtenida debe cumplir al menos con los requerimientos de calidad del agua tipo IV evidenciados por la norma Designación D 1193 "Standard Specification for Reagent Water" de ASTM (American Society for Testing and Materials) (ASTM International, 2001).

Dichos requerimientos corresponden a valores establecidos para una conductividad máxima final de  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  y un rango de pH entre 5 y 8. A su vez se estableció un tercer requerimiento que correspondió a fijar la turbidez en un valor menor o igual a 0,2 NTU.

## 5.2. Montaje del sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico.

Se inició el montaje del sistema de desmineralización a partir de los requerimientos de instrumentación adicional hallados en la Fase 1. Las adecuaciones efectuadas se evidencian en la Figura 6 y en la Tabla 5 se describe el montaje realizado.

### Figura 6

*Instalaciones efectuadas para el sistema de desmineralización de agua por intercambio iónico.*



**Tabla 5***Requerimientos, instalaciones efectuadas y descripción del montaje.*

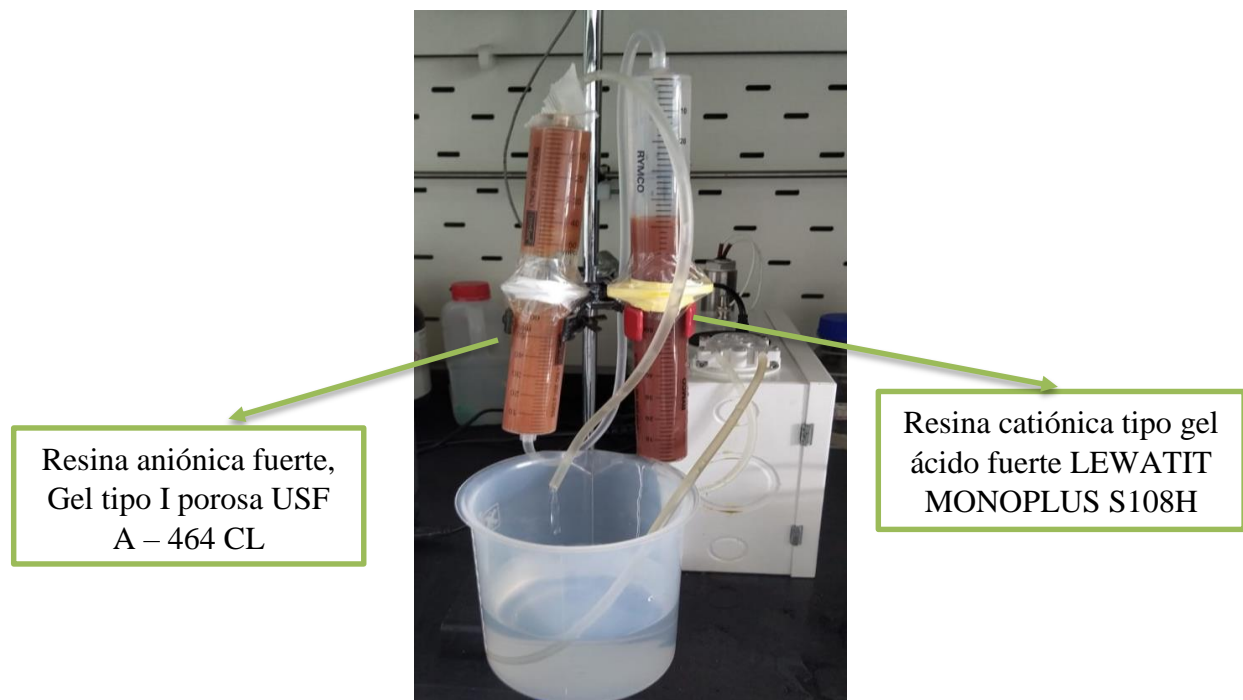
<b>Requerimientos hallados</b>	<b>Instalaciones efectuadas</b>	<b>Descripción del montaje realizado</b>
Instalación de una entrada de agua proveniente de la red del laboratorio al equipo de desmineralización.	Instalación del punto de entrada de 1 in de agua proveniente de la red y con una válvula tipo bola, el cual se conectó a las columnas de intercambio iónico.	Se realizó la instalación del punto de entrada de agua mediante solicitud a Planta Física PTG UIS.
Cartucho para el sistema de filtración frontal, el cual cuenta con la carcasa a la entrada del sistema.	Implementación de un filtro cartucho de sedimentos PP (Polipropileno Termofusionado) de 5 µm dentro de la carcasa disponible para el sistema. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro: 2,5 in</li> <li>• Altura: 20 in</li> <li>• Nivel de filtración: 5 µm</li> <li>• Flujo nominal: 2 – 8 gpm</li> <li>• Peso: 0,20 kg</li> </ul>	Se realizó la compra de 3 cartuchos de filtración con filtros AYZ de marca PURIKOR, puesto que estos filtros presentan alta retención de sólidos, buena resistencia química y muy baja migración de fibra siendo características esenciales para la mitigación de daño o contaminación en el sistema.
Sellado de una de las salidas disponibles en la columna aniónica (al final del sistema).	Tapón roscado PVC de 1 in para sellar una de las salidas del sistema.	En una de las salidas del sistema se anexó un tapón roscado de material PVC obtenido a través del personal de mantenimiento PTG.
Conexión de salida (manguera) para el agua obtenida del equipo.	Conexión de una manguera de PVC flexible de ½ in a la salida del sistema con uno de los tanques de almacenamiento de agua desmineralizada.	Se instaló una manguera de material PVC Flexible de ½ in de diámetro y 3 m de largo en la salida del sistema. Ésta fue hallada en el material disponible para los equipos del laboratorio 210.
Tanque de almacenamiento.	Obtención e instalación de tanques de almacenamiento de 20 y 60 L.	Se obtuvo 1 tanque de almacenamiento de 60 L por medio de las compras realizadas para el grupo de investigación CICTA UIS, y de 2 bidones de 20L c/u obtenidos por medios propios.

Por otra parte, se adquirieron 20 L de resina aniónica fuerte, Gel tipo I porosa USF A – 464 CL y 20 L de resina catiónica tipo gel ácido fuerte LEWATIT MONOPLUS S108H para ser utilizadas en el sistema, y como reserva, anticipando una posible inutilización de las resinas encontradas al interior de las columnas.

Se realizaron pruebas de arranque a pequeña escala mediante un montaje con jeringas de 60 ml interconectadas entre sí y una bomba peristáltica con el fin de simular el sistema de columnas de intercambio iónico, tal y como se evidencia en la Figura 7. Estas pruebas se realizaron para verificar la activación de las resinas halladas en las columnas y de las resinas nuevas adquiridas y definir si era necesaria su regeneración antes de la puesta en marcha del sistema.

### Figura 7

*Montaje a escala pequeña del sistema de columnas de intercambio iónico.*



En las Tablas 6 y 7 se muestran los datos obtenidos de pH y de conductividad en el tiempo, al utilizar las resinas nuevas y las resinas encontradas en las columnas sin regeneración previa en el montaje.

**Tabla 6**

*Datos de pH y conductividad en el tiempo al utilizar las resinas nuevas sin regeneración previa.*

Numero de muestras	Tiempo (min)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )
1	2	9,48	27
2	4	9,28	23
3	6	9,23	21
4	8	9,12	21
5	10	9,08	21
6	12	9,03	19
7	14	9,02	17
8	16	8,90	17
9	18	8,68	16
10	20	8,23	15
11	22	7,37	14
12	24	6,49	13
13	26	6,56	16
14	28	6,21	16
15	30	6,04	17
16	32	5,92	17
17	34	5,92	18
18	36	5,70	18
19	38	5,71	19
20	40	5,58	21

**Tabla 7**

*Datos de pH y conductividad en el tiempo al utilizar las resinas halladas en las columnas sin regeneración previa.*

<b>Numero de muestras</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>
1	2	9,20	38
2	4	8,50	31
3	6	8,25	29
4	8	8,10	24
5	10	7,80	18
6	12	7,75	16
7	14	7,74	16
8	16	7,65	15
9	18	7,68	14
10	20	7,70	14
11	22	7,65	12
12	24	7,58	11
13	26	7,59	10
14	28	7,58	9
15	30	7,62	9
16	32	7,60	8
17	34	7,58	8
18	36	7,60	7
19	38	7,60	7
20	40	7,59	7

Al observar los datos obtenidos, se evidenció la necesidad de realizar la regeneración de las resinas antes de la puesta marcha del sistema. Para ello, se realizaron pruebas para determinar el agente regenerante para las resinas catiónica y aniónica, el porcentaje de concentración óptimo con el cual se debe preparar la solución de activación de resinas, el tiempo de contacto resina – regenerante, el caudal de enjuague y tiempo de operación del proceso.

Según la empresa Equipos y Laboratorio de Colombia, para regenerar las resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles se emplea ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, a su vez para las resinas aniónicas de bases fuertes y resinas aniónicas de bases débiles se utiliza hidróxido de sodio o hidróxido de amonio (Equipos y laboratorios de Colombia S.A.S, 2021). Para la resina aniónica presente en el laboratorio se manejó una solución regenerante de hidróxido de sodio (NaOH) al 4% p/p, y en la resina catiónica se usó una solución regenerante de ácido clorhídrico (HCl) con 6% p/p, ambas concentraciones se tuvieron en cuenta bajo las fichas técnicas de las resinas (Vásquez, 2010).

Por lo anterior, se definió un protocolo de regeneración de resinas en donde se muestran las actividades y variables que hacen parte del proceso de intercambio iónico como lo son: los parámetros de control para iniciar la regeneración, la preparación de soluciones de regeneración y la guía detallada para dicha operación (ver **Anexo 2**).

Al final de esta etapa se efectuaron pruebas de arranque en la unidad de desmineralización con la finalidad de detectar averías, daños e irregularidades. Se evidenció un correcto funcionamiento del manómetro, uniones, válvulas y demás componentes del sistema de desmineralización, dejando en evidencia la buena operación del equipo.

### **5.3. Evaluación de las condiciones de operación que garanticen los parámetros de calidad del agua.**

Esta fase se inició con la realización de pruebas que simulen la puesta en marcha del equipo de desmineralización, con el fin de evaluar las condiciones de operación que garanticen

los parámetros requeridos en el laboratorio, como se muestra en la Figura 8. Se realizaron pruebas variando las condiciones de operación del sistema: Grado de apertura para las válvulas de entrada y salida del sistema y la presión de operación a la cual se debe mantener el equipo para evitar fugas y poder garantizar el intercambio de iones en las columnas. Dichas variaciones se evidencian en la Tabla 8.

### Figura 8

*Pruebas del equipo de desmineralización.*



**Tabla 8**

*Variaciones de las condiciones de operación.*

Volumen de resina en cada columna (L)	Apertura de válvula (°)		Presión de operación (Psi)
	Entrada al sistema	Salida del sistema	
10	30	90	12
10	30	45	20
10	45	45	40
10	45	30	60
10	90	30	75

Por lo anterior, se definieron las siguientes condiciones de operación del sistema:

1. Apertura de válvula de entrada al sistema: 30°
2. Apertura de válvula de salida del sistema: 90°
3. Presión de operación: 12 psi.
4. Caudal promedio de salida obtenido: 1,72 L/min.

Luego de definir las condiciones de operación, se procedió a tomar muestras para evidenciar el cambio de conductividad respecto al tiempo del sistema. Estas muestras se tomaron 2 min después de iniciado el sistema, obteniéndose los resultados evidenciados en las Tablas 9 y 10.

**Tabla 9**

*Resultados prueba final en el equipo de desmineralización con las condiciones de operación definidas:  $P_o=12psi$ ,  $Q_s=1,72L/min$ .*

Tiempo (s)	pH	Conductividad ( $\mu S/cm$ )	Turbidez (NTU)
0	9,20	52	3,61
20	9,16	52	0,63
40	9,07	42	0,59

Continuación Tabla 9.

Tiempo (s)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Turbidez (NTU)
60	8,71	19	0,25
80	8,65	18	0,19
100	8,40	12	0,17
120	8,38	11	0,16
140	8,28	10	0,17
160	8,20	7	0,16
180	7,86	5	0,14
200	7,79	5	0,14
220	7,74	4	0,14
240	7,60	3	0,15
260	7,57	3	0,10
280	7,64	3	0,10
300	7,22	3	0,08
320	7,28	3	0,10
340	7,27	3	0,10

**Tabla 10**

Resultados del duplicado de la prueba final en el equipo de desmineralización con las condiciones de operación definidas:  $P_0=12\text{psi}$ ,  $Q_s=1,72\text{L}/\text{min}$ .

Tiempo (s)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Turbidez (NTU)
0	9,20	55	3,50
20	9,18	53	0,61
40	9,09	42	0,57
60	8,82	19	0,26
80	8,65	18	0,18
100	8,45	11	0,17
120	8,38	10	0,17
140	8,28	10	0,16
160	8,19	7	0,16
180	7,83	6	0,15
200	7,72	6	0,14
220	7,71	5	0,14
240	7,59	4	0,14
260	7,57	3	0,12
280	7,64	3	0,11
300	7,27	3	0,10
320	7,25	3	0,10
340	7,25	3	0,10

Los resultados evidenciados en las Tablas 9 y 10 muestran una disminución considerable en la conductividad y turbidez en el agua después de pasar por el equipo de desmineralización. A partir de dichos resultados, se evidencia que el agua obtenida presenta características establecidas por la norma ASTM para agua tipo IV.

Para facilidad a la hora de operar la unidad de desmineralización, ya sea en alguna de sus etapas (empaquetamiento, acondicionamiento, carga o regeneración), se elaboró un instructivo de manejo (ver **Anexo 3**) en el cual muestra una guía paso a paso de cada una de las etapas, especificando soluciones, caudales y recomendaciones necesarias para el proceso.

## 6. Conclusiones

Mediante la realización del diagnóstico interno y externo del sistema de intercambio iónico, se lograron identificar requerimientos adicionales necesarios para la puesta en marcha del equipo en el laboratorio. Estos requerimientos fueron: instalación de un punto de entrada para hacer uso del equipo, compra e implementación de un filtro en el inicio de la unidad, taponamiento de una de las salidas del sistema, conexión lateral para la salida del agua desmineralizada y adición de tanques de almacenamiento.

Gracias a las pruebas en pequeña escala realizadas mediante la implementación del sistema de jeringas de 60 ml, se comprobó que las resinas al interior del equipo y las resinas nuevas eran útiles para el proceso de desmineralización, obteniendo una tasa de reducción de la conductividad superior al 90%. Además, se confirma que estas deben ser regeneradas con

soluciones de HCl al 6 % p/p y de NaOH al 4% p/p para las resinas catiónica y aniónica, respectivamente.

Con las condiciones de presión de operación no mayor a 12 psi, apertura de 30° en la válvula de entrada al sistema, apertura de 90° en la válvula de salida y un caudal de salida promedio de 1,72 L/min, permitió que se alcanzara un funcionamiento correcto del sistema con un tiempo de espera inicial de 5 min logrando la obtención de agua desmineralizada tipo IV con características de pH entre 5 y 8, conductividad de 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y turbidez de 0,1 NTU; a partir de dichos resultados se elaboró un manual de regeneración para las resinas y un instructivo de uso del equipo.

Finalmente, la implementación de la unidad de desmineralización generó un impacto positivo al interior del laboratorio 210 EDI PTG UIS permitiendo obtener más de 200 L de agua desmineralizada en 2 h de operación, siendo ésta utilizada para la limpieza de instrumentación, preparación de mezclas y la correcta realización de las actividades de investigación en cada uno de los equipos a escala piloto que se encuentran dentro del laboratorio.

## 7. Recomendaciones

Para una mejor operación del equipo se sugieren los siguientes aspectos:

- Instalación de sensores de conductividad y caudal para el mejoramiento del control y seguimiento de la operación del sistema de intercambio iónico.
- Evaluación de la posibilidad de mejoras en el equipo de intercambio iónico para la obtención de agua con características cercanas al agua tipo III según la norma ASTM.

### Referencias bibliográficas

- Agamez Salvador, C. (2014). Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Malagana (Bolívar). Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena.
- Alemán, G., & Hernández, S. (2021). Diseño de un sistema de purificación de agua para uso en la industria farmacéutica. Universidad De El Salvador, Facultad De Ingeniería Y Arquitectura. Escuela De Ingeniería Química E Ingeniería De Alimentos.
- Araujo Ulloa, D. (2015). Diseño de unidades de desmineralización del agua como medio de enfriamiento, Quito.
- Arnau Segarra, C. (2015). Diseño de una planta de producción de agua de proceso para una central térmica de ciclo combinado. Universitat Jaume I. Escola Superior de Tecnologia i Ciències Experimentals Grau en Enginyeria Química.
- ASTM International. (2001). Designation: D 1193 «Standard Specification for Reagent Water».
- Chang, R. (1999). Química (Sexta edición). McGraw Hill Compañías S.A.
- Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P. (2021). Calidad fisicoquímica promedio mensual del agua tratada en tanques de almacenamiento y red de distribución. [Informe de Laboratorio de control y calidad de aguas].

Equipos y laboratorios de Colombia S.A.S. (2021). Regeneración de resinas catiónicas y resinas aniónicas.

Evoqua. (2014). Resin Technical Data Sheet A-464 Anion Resin.

Lanxess Energizing Chemistry. (2012). Información de producto LEWATIT, MonoPlus S 108 H. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-MonoPlus-S-108-H-SP-L.pdf>

Lenntech. (s. f.). (s. f.). IonExchangeResinProductsandServices. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Siemens-AF-RESIN-BR-L.pdf>

Morales Sanabria, F. (2020). Acta de entrega, Empresa piedecuestana de Servicios Públicos Domiciliarios E.S.P., Piedecuesta.

Pirela Salazar, A. (2008). Evaluación del sistema de generación de agua desmineralizada de la planta de tratamiento de aguas blancas para la alimentación de las calderas de una cervecería, Maracaibo.


Romero, M., & Niño, S. (2017). Validación del sistema de purificación de agua de la empresa Tecmol Farmaceutica S.A.S, fundación universidad de américa, facultad ingenierías, programa de ingeniería química.

Sánchez Ruíz, C. (2015). Intercambio iónico (FT-TER-2006), Coruña. INDITEX.

Vásquez, F. (2010). Evaluación del índice de calidad del agua en el área de influencia del botadero municipal de Tarapoto sector Yacucatina – San Martín – Perú. Programa de maestría en ciencias con mención en gestión ambiental.

Anexos

**Anexo 1.** Reportes históricos de análisis fisicoquímicos del agua, informados por la empresa Piedecuestana de Servicios Públicos, Piedecuesta, Santander (Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P, 2021).

		CALIDAD FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA PROMEDIO MENSUAL DEL AGUA TRATADA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO Y RED DE DISTRIBUCION LABORATORIO DE CONTROL Y CALIDAD DE AGUAS DE LA EMPRESA PIEDECUESTANA DE SERVICIOS PÚBLICOS E.S.P.				Código:																					
						Versión:																					
						Página:																					
PERIODO REGISTRADO:	Enero - Abril	MUNICIPIO:	PIEDECUESTA	AÑO:	2021																						
Parámetros Mes	Parámetros Fisicoquímicos											Parámetros Microbiológicos															
	No. Muestras Fisicoquímicas	Clor	Sabor	Acceptable = 0	Acceptable = 1	Cloro Residual Libre	pH	Unidades de pH	Turbiedad	Color Aparente	Unidades Pt-Co	Conductividad	Alcalinidad Total	Dureza Total	Dureza Total	Sulfatos	Aluminio	Hierro Total	Nitatos	Nitros	mg NO <sub>3</sub> /L	mg NO <sub>2</sub> /L	No. Muestras Microbiológicas	Rcto Heterótrofo en Placa	Conformes Totales	E. Coli	% IRCA Mensual
Enero	39	0	0	0	0	1.77	7.42	0.34	5	94.5	36.11	22.0	28.43	0.02	<0.02	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	29	0	0	0	3	0.06
Febrero	60	0	0	0	0	1.56	7.44	0.48	4	94.6	30.04	20.2	29.76	0.07	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	60	0	0	0	22	0.08	
Marzo	66	0	0	0	0	1.40	7.41	0.63	6	92.4	39.75	24.3	27.30	0.05	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	66	0	0	0	18	1.25	
Abril	60	0	0	0	0	1.62	7.43	0.32	5	95.3	31.16	22.2	26.18	0.03	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	0	PNE	PNE	PNE	4.30		
Mayo	63	0	0	0	0	1.95	7.46	0.47	4	94.2	37.52	26.1	22.55	0.06	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	60	1	0	0	10	0.04	
Junio	60	0	0	0	0	1.24	7.45	0.38	4	92.5	34.77	25.4	23.94	0.04	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	60	0	0	0	4	0.02	
PROMEDIO	62	0	0	0	0	1.59	7.44	0.54	5	93.4	35.06	23.9	26.35	0.05	<0.02	<0.10	<1	<0.01	<1	<0.01	51	2	0	0	12	0.96	
Valores Máx. Acceptables RESOLUCIÓN 2115/2007	Mín. 3/día	ACEP	ACEP	0.3 - 2.0	6.5 - 9.0	2	15	≤1000	200	250	300	250	0.2	0.3	10	0.1	Mín. 3/día	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0 - 5
Abreviaturas y Unidades de Medida		*UNT = Unidades Nefelométricas de Turbiedad. *Pt-Co = Unidades de Platino Cobalto. *mg/L = miligramo por litro. *IRCA = Índice De Riesgo De Calidad Del Agua. *PNE = Parámetro No Evaluado.											Con base en los ensayos analíticos establecidos por la Resolución 2115 de 2007 y practicados en el Laboratorio de Control y Calidad de Aguas de la Empresa Piedecuestana de Servicios Públicos E.S.P. Se determina lo siguiente: El IRCA promedio mensual calculado a la fecha y durante lo transcurrido de la vigencia 2021, clasificó el agua "sin riesgo" = "agua apta para consumo humano".														
CLASIFICACIÓN IRCA (%) = 0 - 5		NIVEL DE RIESGO = SIN RIESGO																									

Equipo Analítico: Laboratorios - Memensens  
 Puesto y Aprobado: P.U. - Jefe Planta de Tratamiento de Agua Potable



**Anexo 2.** Protocolo de regeneración de resinas de intercambio iónico.

**PROTOCOLO DE REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO.**

*Stiven Mauricio Lancheros Benítez*

*Cristian Fernando Franco Castro*

*Escuela de Ingeniería Química*

*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas*

*Universidad Industrial de Santander*

*Bucaramanga*

<b>Código</b>	<b>Resinas</b>	<b>Cantidad</b>
W2T133322	Resina aniónica fuerte. Gel tipo I porosa USF A – 464 CL. Para desionización y remoción de Sílice	20 L
S108H	Resina catiónica tipo gel ácido fuerte LEWATIT MONOPLUS	20 L

**Resina aniónica fuerte. Gel tipo I porosa USF A – 464 CL. (W2T133322):** Anión de gel de base fuerte poroso tipo I utilizado en la desmineralización con buena eliminación de sílice. Formas iónicas: Cl y OH. Regenerantes: NaCl y NaOH (Lenntech. (s. f.), s. f.).

**Resina catiónica tipo gel ácido fuerte LEWATIT MONOPLUS (S108H):** Es una resina de intercambio catiónica, geliforme, fuertemente ácida, con una distribución granulométrica uniforme (mono dispersa), a base de un copolímero de estireno divinilbenceno, en forma totalmente regenerada (min. 99% H). Debido a un especial proceso de fabricación este tipo de

resina es extremadamente resistente a agentes químicos, y las fatigas osmótica y mecánica. Forma iónica:  $H^+$ . Regenerantes:  $HCl$  y  $H_2SO_4$  (Lanxess Energizing Chemistry, 2012).

Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan en forma de esferas o perlas de 0,3 a 1,2 mm de tamaño efectivo, aunque también las hay en forma de polvo. Están compuestas de una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, incorporados a una matriz de un polímero sintético y actúan tomando iones de las soluciones (generalmente agua) y cediendo cantidades equivalentes de otros iones.

La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante.

### **DISMINUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Después de una serie de ciclos de intercambio iónico las resinas sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales de la resina, disminuyendo su capacidad de intercambio.

Las resinas catiónicas fuertes primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos (Equipos y laboratorios de Colombia S.A.S, 2021).

La mayoría de los autores de la especialidad asignan una vida útil esperada de las resinas de intercambio iónico entre los 5 y los 10 años. Según la Empresa Lenntech, las resinas aniónicas tienen una vida útil teórica de 70 a 300  $m^3$  de agua tratada por litro de resina y las resinas catiónicas de 200 a 1500  $m^3$  de agua tratada por litro de resinas; en ambos casos dependerá de la calidad del agua a tratar (Lanxess Energizing Chemistry, 2012).

**FACTORES QUE AFECTAN LAS OPERACIONES DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Hay diversos factores que pueden afectar las operaciones de intercambio iónico:

- ✓ Agentes regenerantes de mala calidad: El Ácido Clorhídrico (HCl) y el hidróxido de sodio deben ser originarios de proveedores con certificación legal.
- ✓ Variaciones de la calidad del agua a ser tratada.
- ✓ Canalizaciones en los lechos de resinas.
- ✓ Presencia de agentes oxidantes, tales como oxígeno, cloro, ozono u otros.
- ✓ Cambios bruscos de temperatura, que pueden provocar variaciones de las condiciones hidráulicas y en la cinética de las reacciones; si estos se producen, se deben efectuar ajustes de los flujos.
- ✓ Distribución defectuosa del flujo, en la producción y/o en la regeneración.
- ✓ Características de las resinas.
- ✓ Rotura de las resinas.
- ✓ Despolimerización por oxidantes y consecuente hinchamiento (se vuelve ligera de densidad y se pierde durante los retro lavados).
- ✓ Envenenamiento por materias orgánicas e inorgánicas.
- ✓ Pérdidas de resinas, por ser demasiado pequeñas o por baja densidad.
- ✓ Regeneraciones inadecuadas: concentraciones y/o gastos inadecuados.

**PARÁMETRO DE CONTROL PARA INICIAR LA REGENERACIÓN**

La regeneración de las resinas de intercambio iónico debe hacerse cuando la medición de conductividad del agua saliente del sistema es mayor a 9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

**PREPARACIÓN SOLUCIONES DE REGENERACIÓN****❖ Solución de Regeneración Aniónica:**

Concentración 4% p/p

Teniendo en cuenta que en el equipo hay 10 L de resina, se necesitan 30 L de solución, se debe preparar una solución al 4% p/p entre agua destilada e hidróxido de sodio (Soda Cáustica).

**❖ Solución de la resina Catiónica:**

Concentración 6% p/p

Teniendo en cuenta que en el equipo hay 10 L de resina, se necesitan 30 L de solución, se debe preparar una solución al 6% p/p entre agua destilada y ácido clorhídrico (HCl).

**GUÍA PARA LA REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO.****1. Retrolavado Resina Aniónica**

Duración: 10 min

Caudal: 0,070 m<sup>3</sup>/h – 70 L/h

**2. Retrolavado Resina Catiónica**

Duración: 10 min

Caudal: 0,070 m<sup>3</sup>/h – 70 L/h

Los retrolavados deben efectuarse por un tiempo estándar de 10 min, teniendo la posibilidad de prolongarse hasta los 45 min en caso de que se quiera eliminar finos que estén ocasionando altas

caídas de presión, durante la producción de agua desmineralizada. Se debe tener cuidado de no tener velocidades altas o retro lavados excesivos, que provocan altas pérdidas de resinas.

El agua para los retro lavados debe ser agua potable proveniente de la PTAP.

El caudal de retro lavado debe ser de  $0,070 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### **3. Inyección de solución regenerante aniónica Hidróxido de sodio.**

Duración: 40 min

Concentración: 4% p/p

Caudal:  $0,056 \text{ m}^3/\text{h} - 56 \text{ L/h}$

El regenerante de las resinas aniónicas fuertes debe ser pasado en un tiempo no menor de 40 min a una concentración entre 3 - 5% p/p (Evoqua, 2014).

El caudal de inyección de solución debe ser de  $0,056 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### **4. Inyección de solución regenerante catiónica Ácido Clorhídrico.**

Duración: 35 min

Concentración: 6% p/p

Caudal:  $0,063 \text{ m}^3/\text{h} - 63 \text{ L/h}$

El regenerante de las resinas catiónicas fuertes debe ser pasado en un tiempo no menor de 35 min a una concentración entre 4 - 6% p/p (Lanxess Energizing Chemistry, 2012).

El caudal de inyección de solución debe ser de  $0,063 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### **5. Enjuague Resina Aniónica**

Duración: 25 min

Caudal: 0,143 m<sup>3</sup>/h – 143 L/h

Después del enjuague verificar que el pH al salir de la columna sea de 10,5

Para el enjuague de las resinas aniónicas debe usarse agua tratada (agua desmineralizada).

### **6. Enjuague Resina Catiónica**

Duración: 25 min

Caudal: 0,100 m<sup>3</sup>/h – 100 L/h

Después del enjuague verificar que el pH al salir de la columna sea 3,5

Para las resinas catiónicas puede usarse agua sin tratar (agua proveniente de la PTAP).

### **OBSERVACIÓN:**

Cuando los enjuagues terminan con conductividad mayor de 9 µS/cm, se debe prolongar esta operación por 10 a 20 min.



**PLANILLA DE REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO LABORATORIO 210PTGUIS**

REGENERACIÓN	CAUDAL	HORA INICIAL	HORA FINAL	DURACIÓN (min)	PARÁMETRO DE CONTROL	OBSERVACIONES
<b>RETRO LAVADO RESINA ANIÓNICA</b> Duración: 10 min	0,070 m <sup>3</sup> /h				-	
<b>RETROLAVADO RESINA CATIONICA</b> Duración: 10 min	0,070 m <sup>3</sup> /h				-	
<b>INYECCIÓN DE SOLUCIÓN REGENERANTE ANIÓNICA HIDRÓXIDO DE SODIO.</b> Duración: 40 min Concentración: 4% p/p	0,056 m <sup>3</sup> /h				Solución al 4% P/P	
<b>INYECCIÓN DE SOLUCIÓN REGENERANTE CATIONICA ÁCIDO CLORHÍDRICO.</b> Duración: 35 min Concentración: 6% p/p	0,063 m <sup>3</sup> /h				Solución al 6% P/P	
<b>ENJUAGUE RESINA ANIÓNICA</b> Duración: 25 min	0,143 m <sup>3</sup> /h				pH ≈ 10,5	
<b>ENJUAGUE RESINA CATIONICA</b> Duración: 25 min	0,100 m <sup>3</sup> /h				pH ≈ 3,5	

<b>FECHA DE REGENERACIÓN</b>	<b>Día</b>	<b>Mes</b>	<b>Año</b>
------------------------------	------------	------------	------------

**Anexo 3.** Instructivo de uso para el equipo de desmineralización por intercambio iónico.

**INSTRUCTIVO DE USO PARA EL EQUIPO DE DESMINERALIZACION POR  
INTERCAMBIO IÓNICO.**

*Stiven Mauricio Lancheros Benítez*

*Cristian Fernando Franco Castro*

*Escuela de Ingeniería Química*

*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas*

*Universidad Industrial de Santander*

*Bucaramanga*

**1. Intercambio Iónico**

Los procesos de intercambio iónico se basan en los equilibrios de intercambio entre los iones de una disolución y los iones de su mismo signo que se encuentran en la superficie de un sólido esencialmente insoluble.

**2. Intercambio Iónico en Columna**

Esta configuración es la que se emplea más a menudo en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador (resina aniónica o catiónica) se coloca en el interior de una columna vertical, a través de la cual fluye la disolución a tratar.

## **2.1. Etapas del Proceso de Intercambio Iónico en Columna**

### **a. Empaquetamiento de la Columna**

Consiste en:

1. Introducir las resinas de intercambio iónico en el interior de la columna evitando la formación de bolsas de aire entre sus partículas para obtener un lecho uniforme.
2. Lavar el intercambiador preferiblemente con agua destilada, con el fin de eliminar posibles impurezas.

**Nota:** Llenar el intercambiador en un 70-80% dejando un espacio libre de resina al interior de la columna previniendo una posible expansión del lecho.

### **a. Acondicionamiento del Intercambiador**

Gran parte de las resinas comerciales se venden en una forma iónica que no suele ser la adecuada para el tratamiento que se desea realizar. Por eso en esta etapa se suele cambiar el contraión de la resina poniéndola en contacto con una disolución concentrada del ion que se desea tener.

#### **Disoluciones:**

- **Solución de la resina Aniónica:**

Concentración 4% p/p

Teniendo en cuenta que en el equipo hay 10 L de resina, se necesitan 30 L de solución, se debe preparar una solución al 4% p/p entre agua destilada e hidróxido de sodio (Soda Cáustica).

- **Solución de la resina Catiónica:**

Concentración 6% p/p

Teniendo en cuenta que en el equipo hay 10 L de resina, se necesitan 30 L de solución, se debe preparar una solución al 6% p/p entre agua destilada y ácido clorhídrico (HCl).

**Nota:** Los caudales y tiempos de operación se muestran en la etapa **d** numerales **3 y 4**.

Una vez se ha conseguido la resina en la forma iónica deseada, debe eliminarse el exceso de esta disolución lavando la resina preferiblemente con agua destilada hasta los siguientes valores de pH: columna de resina aniónica  $\approx 10,5$  y columna de resina catiónica  $\approx 3,5$ .

### **b. Etapa de Carga**

En esta etapa tiene lugar el intercambio de iones entre la disolución a tratar (agua del acueducto) y el intercambiador. La disolución por tratar se introduce en la columna y fluye gradualmente a través del intercambiador.

Para este intercambiador se establecieron las siguientes condiciones de operación:

- Abra a una apertura de  $30^\circ$  la válvula de entrada de la red
- Gire a una apertura total la válvula de salida del sistema
- Mantenga la Presión del manómetro en 12 psi
- Procure que el caudal promedio de salida sea de 1,72 L/min
- Después de un tiempo de espera de aproximadamente 5 min puede empezar a almacenar el agua desmineralizada saliente del equipo.

**Nota:**

- ✓ Verificar que las válvulas del sistema estén cerradas o abiertas dependiendo del recorrido deseado.

- ✓ Durante el tiempo de espera revisar que no se presenten fugas de agua en las uniones o entradas de tuberías o columnas del intercambiador.

Cuando el intercambiador comienza a estar saturado con los iones de la disolución que entra, se observa un aumento de la concentración de dichos iones en la solución que sale de la columna. Esta concentración de iones se puede verificar con un seguimiento a la conductividad eléctrica del agua saliente del equipo, si la conductividad tiende a elevarse, indica que el tratamiento de la disolución por el intercambiador ya no está siendo efectivo.

Una vez la conductividad en la disolución de salida iguala a la de entrada, el intercambiador ha agotado toda su capacidad de intercambio, por tal motivo es necesario realizar una regeneración de las resinas.

### **c. Etapa de Regeneración**

La etapa de regeneración consiste en devolver el intercambiador saturado a su forma iónica inicial, empleando una disolución concentrada en el ion originariamente asociado al intercambiador. Esta etapa es importante en el proceso de intercambio iónico ya que el buen funcionamiento del intercambiador en sucesivos procesos de carga depende de una regeneración eficiente.

#### **1) Retrolavado Resina Aniónica**

Duración: 10 min

Caudal: 0,070 m<sup>3</sup>/h – 70 L/h

**2) Retrolavado Resina Catiónica**

Duración: 10 min

Caudal: 0,070 m<sup>3</sup>/h – 70 L/h

Los retrolavados deben efectuarse por un tiempo estándar de 10 min, pudiendo prolongarse hasta los 45 min en caso de que se quiera eliminar finos que estén ocasionando altas caídas de presión, durante la producción de agua desmineralizada. Se debe tener cuidado de no tener velocidades altas o retro lavados excesivos, que provocan altas pérdidas de resinas.

El agua para los retro lavados debe ser agua potable proveniente de la PTAP.

El caudal de retro lavado debe ser de 0,070 m<sup>3</sup>/h.

**3) Inyección de solución regenerante aniónica Soda Cáustica.**

Duración: 40 min

Concentración: 4% p/p

Caudal: 0,056 m<sup>3</sup>/h – 56 L/h

Las soluciones regenerantes para la resina aniónica y catiónica se preparan con las mismas sustancias que en la etapa de acondicionamiento del intercambiador.

El regenerante de las resinas aniónicas fuertes debe ser pasado en un tiempo no menor de 40 min a una concentración entre 3 - 5% p/p (Evoqua, 2014).

El caudal de inyección de solución debe ser de 0,056 m<sup>3</sup>/h.

**4) Inyección de solución regenerante catiónica Ácido Clorhídrico.**

Duración: 35 min

Concentración: 6% p/p

Caudal: 0,063 m<sup>3</sup>/h – 63 L/h

El regenerante de las resinas catiónicas fuertes debe ser pasado en un tiempo no menor de 35 min a una concentración entre 4 - 6% p/p (Lanxess Energizing Chemistry, 2012).

El caudal de inyección de solución debe ser de 0,063 m<sup>3</sup>/h.

### **5) Enjuague Resina Aniónica**

Duración: 25 min

Caudal: 0,143 m<sup>3</sup>/h – 143 L/h

Después del enjuague verificar que el pH al salir de la columna sea de 10,5

Para el enjuague de las resinas aniónicas debe usarse agua tratada (agua desmineralizada).

### **6) Enjuague Resina Catiónica**

Duración: 25 min

Caudal: 0,100 m<sup>3</sup>/h – 100 L/h

Después del enjuague verificar que el pH al salir de la columna sea 3,5

Para las resinas catiónicas puede usarse agua sin tratar (agua proveniente de la PTAP).

**OBSERVACIÓN:** Cuando los enjuagues terminan con conductividad mayor de 9 µS/cm, se debe prolongar esta operación por 10 a 20 min.