



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

**Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE  
UNA UNIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO”**

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO QUÍMICO**

Presentado por:

NADIA DENISSE SOLÓRZANO SOLANO

KELVIN AMADOR TINOCO MIRANDA

GUAYAQUIL – ECUADOR

2016

# AGRADECIMIENTOS

II

Gracias a Dios por mantenernos con salud y vida durante todo este proceso estudiantil, gracias por darnos fortaleza y voluntad para nunca desistir.

Gracias a nuestros padres y familiares, quienes incondicionalmente nos brindaron su apoyo en todo momento.

Gracias a nuestros maestros y amigos, quienes también fueron parte, en todas las etapas de este proyecto, para que pueda realizarse con éxito. En especial a nuestro tutor de tesis Ing. Bernardo Mora por su constante apoyo.

# DEDICATORIA

III

Este proyecto se lo dedicamos a Dios, por permitirnos llegar hasta este punto tan importante en nuestras vidas.

Dedicado también a nuestra familia, a nuestros padres en especial, quienes han sido los que nos han guiado durante todo nuestro trayecto de vida, por los tantos sacrificios y esfuerzos que pusieron en nosotros.



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS

INGENIERÍA QUÍMICA

INFORME DEL PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA

Habiendo sido nombrado PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA

KELVIN AMADOR TINOCO MIRANDA  
NADIA DENISSE SOLORIZANO SOLANO

Con el tema del proyecto integrador “**Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de una Unidad de Intercambio Iónico**”, previa a la obtención del título de INGENIERO QUÍMICO, me permito informar que he leído el contenido y he revisado el formato del proyecto integrador, luego de lo cual indico que estoy de acuerdo en que el mismo se lo ha desarrollado conforme a los lineamientos de la Unidad de Titulación Especial de la ESPOL.

Guayaquil, 11/05/2016

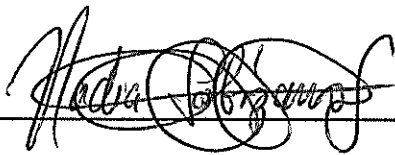
ING BERNARDO MORA  
PROFESOR DE LA MATERIA INTEGRADORA

# DECLARACIÓN EXPRESA

IV

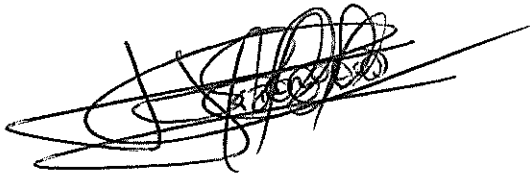
"La responsabilidad del contenido de este proyecto nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL."

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



---

Nadia Denisse Solórzano Solano



---

Kelvin Amador Tinoco Miranda

# RESUMEN

V

El presente proyecto tiene como principal objetivo la construcción de un equipo de Intercambio Iónico para la desmineralización de diferentes tipos de aguas, y para llevar a cabo esta tarea primero se hizo cálculos básicos para obtener el dimensionamiento y flujos a requerir en el diseño. En cuanto al diseño mecánico se tomó como base la altura de relleno de las resinas, el flujo de alimentación y el tiempo de retención, luego se procedió a calcular cada una de las dimensiones de los componentes del equipo, finalmente se elaboró los planos correspondientes para su posterior construcción y compra de recursos.

Finalmente se llevaron a cabo varios ensayos a fin de perfeccionar la Operación Unitaria de Intercambio Iónico y así lograr un buen Tratamiento del Agua mediante un equipo didáctico, y se estableció las condiciones de operación del equipo, y se implementó una guía de prácticas del mismo, ya que el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOPU) de la FCNM- ESPOL no cuenta con un equipo donde se pueda realizar dicha operación unitaria.

**Palabras claves:** Intercambio iónico, resinas, adsorción, altura de relleno, tiempo de retención, diseño mecánico.

# ÍNDICE GENERAL

VI

AGRADECIMIENTOS .....	II
DEDICATORIA .....	III
DECLARACIÓN EXPRESA .....	IV
RESUMEN .....	V
ÍNDICE GENERAL .....	VI
ABREVIATURAS .....	XII
SIMBOLOGÍA .....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XV
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	XIX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XXI
<b>CAPÍTULO I - ANTECEDENTES - .....</b>	<b>24</b>
1.1 Introducción .....	24
1.2 Mapa de Ubicación.....	25
1.3 Objetivos .....	26
1.3.1 Objetivo General .....	26
1.3.2 Objetivos Específicos .....	26
1.4 Problemática .....	27
1.5 Justificación .....	29
1.6 Hipótesis .....	30
<b>CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO- .....</b>	<b>31</b>
2.1 Contaminación del Agua .....	31
2.2 Fundamentos del Intercambio Iónico .....	33
2.3 Antecedentes Históricos del Intercambio Iónico .....	36

2.4 Cinética y Equilibrio del Intercambio Iónico .....	37
2.4.1 La Primera Aproximación.....	38
2.5 Resinas de Intercambio Iónico .....	41
2.5.1 Propiedades de las Resinas .....	43
2.5.1.1 Capacidad de Intercambio .....	43
2.5.1.2 Tasa de Equilibrio .....	44
2.5.1.3 Caudal .....	45
2.5.1.4 Grado de Reticulación o <i>Estrechamiento</i> .....	46
2.5.1.5 Envejecimiento de la Resina .....	47
2.6 Tipos de Resinas de Intercambio Iónico .....	49
2.6.1 Según su Estructura Física.....	49
2.6.1.1 Resinas tipo gel .....	49
2.6.1.2 Resinas Macroporosas .....	49
2.6.2 Según su Estructura Química .....	49
2.6.2.1 Resinas de Estireno .....	49
2.6.2.2 Resinas de Acrílico .....	50
2.6.3 Según su Grupo Funcional .....	50
2.6.3.1 Resinas Catiónicas de Ácido Fuerte .....	50
2.6.3.2 Resinas Catiónicas de Ácido Débil .....	50
2.6.3.3 Resinas Aniónicas de Base Fuerte .....	51
2.6.3.4 Resinas Aniónicas de Base Fuerte .....	51
2.7 Regeneración de Resinas de Intercambio Iónico .....	51
2.7.1 Retrolavado .....	52
2.7.2 Regeneración .....	52
2.7.3 Lavado Lento.....	52

2.7.4 Lavado Rápido .....	52
2.8 El Intercambio Iónico en el Tratamiento de Aguas .....	54
2.8.1 Ablandamiento de Aguas .....	55
2.8.2 Desmineralización del Agua .....	56
2.9 Ventajas y Desventajas de las Resinas de Intercambio Iónico .....	57
2.9.1 Ventajas .....	57
2.9.2 Desventajas .....	58
2.9.2.1 Incrustaciones de Sulfato de Calcio .....	58
2.9.2.2 Incrustaciones de Hierro .....	59
2.9.2.3 Adsorción de la Materia Orgánica .....	59
2.9.2.4 Contaminación Orgánica de la Resina .....	60
2.9.2.5 Contaminación Bacterial .....	60
2.9.2.6 Contaminación por Cloro .....	61
2.10 Implicaciones Ambientales .....	61
2.10.1 Neutralización de Efluentes .....	62
2.10.1.1 Neutralización de aguas Ácidas con Carbonato Cálcico .....	63
2.10.1.2 Neutralización de aguas Ácidas con Cal .....	63
2.10.1.3 Neutralización de aguas Ácidas con Sosa Cáustica .....	63
2.10.1.4 Neutralización de aguas Básicas con Ácido Sulfúrico .....	64
2.10.1.5 Neutralización de aguas Básicas con Ácido Clorhídrico .....	64
2.10.1.6. Neutralización de aguas Básicas con Gases de Combustión .....	64
<b>CAPÍTULO III – DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN- .....</b>	<b>65</b>
3.1 Cálculos para el Dimensionamiento de la Columna de Intercambio Catiónico. ....	66
3.1.1 Volumen de Resina Catiónica Fuerte ( $V_{cf}$ ) .....	66
3.1.2 Altura de Resina Catiónica .....	67

3.1.3	Altura de La Columna Catiónica .....	67
3.1.4	Volumen de Columna Catiónica .....	68
3.2	Cálculos para el Dimensionamiento de la Columna de Intercambio Aniónico	68
3.2.1	Volumen de Resina Aniónica Fuerte ( $V_{cf}$ ) .....	68
3.2.2	Altura de Resina Aniónica .....	69
3.2.3	Altura de La Columna Aniónica .....	69
3.2.4	Volumen de Columna Aniónica .....	69
3.3	Cálculos para la Determinación de Flujos y Tiempos para la Unidad de Intercambio Iónico ....	70
3.3.1	Cálculos de Caudal de Proceso .....	70
3.3.2	Cálculos de Caudal y Tiempo de Regeneraciones .....	71
3.3.3	Cálculos de Consumo de Agua de Lavados .....	71
3.3.4	Cálculos de Caudal y Tiempo de Lavado Lento para la Resina Catiónica..	72
3.3.5	Cálculos de Caudal y Tiempo de Lavado Rápido para la Resina Catiónica .....	73
3.3.6	Cálculos de Caudal y Tiempo De Retrolavado para la Resina Catiónica .....	75
3.3.7	Cálculos de Caudal y Tiempo de Lavado Lento para la Resina Aniónica .....	76
3.3.8	Cálculos de Caudal y Tiempo de Lavado Rápido para la Resina Aniónica .....	77
3.3.9	Cálculos de Caudal y Tiempo de Retrolavado para la Resina Aniónica .....	78
3.4	Consideraciones Económicas .....	80
3.4.1	Selección de Resinas .....	80
3.4.2	Selección de Materiales .....	82
3.4.3	Selección de Regenerantes .....	82
3.5	Construcción de la Unidad de Intercambio Iónico .....	85
3.5.1	Construcción de las Columnas .....	85
3.5.2	Montaje de la Unidad de Intercambio Iónico .....	87

<b>CAPÍTULO IV –MANUAL DE OPERACIÓN-</b> .....	<b>89</b>
4.1 Identificaciones .....	89
4.2 Equipos de Protección Personal .....	95
4.2.1 Zonas Afectadas .....	96
4.2.1.1 Cabeza .....	96
4.2.1.2 Ojos Y Nariz .....	97
4.2.1.3 Extremidades .....	98
4.3 Materiales, Equipos y Sustancias .....	99
4.4 Procedimientos de Operación .....	100
4.4.1 Procedimientos para la Desmineralización del Agua .....	102
4.4.2 Regeneración y Enjuague de Resinas .....	104
4.4.2.1 Procedimiento para la Regeneración de la Resina Catiónica ..	106
4.4.2.2 Procedimiento para los Lavados de la Resina Catiónica .....	108
4.4.2.3 Procedimiento para la Regeneración de la Resina Aniónica ..	111
4.4.2.4 Procedimiento para los Lavados de la Resina Aniónica .....	112
4.4.3 Neutralización de Efluentes .....	113
4.4.3.1 Procedimiento para la Neutralización de Efluentes.....	113
4.5 Memoria Técnica .....	113
4.5.1 Columnas de Intercambio Iónico .....	113
4.5.2 Bombeo de Agua .....	115
<b>CAPÍTULO V –RESULTADOS-</b> .....	<b>117</b>
5.1 Tabla y Gráficos de Resultados.....	117
5.2 Análisis de Resultados .....	125

<b>CAPÍTULO VI –CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES- .....</b>	<b>128</b>
6.1 Conclusiones .....	128
6.2 Recomendaciones.....	130
 BIBLIOGRAFÍA .....	 133
 ANEXOS .....	 135

# ABREVIATURAS

XII

FCNM	Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
LOPU	Laboratorio de Operaciones Unitarias
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
STD	Sólidos Totales Disueltos
DVB	Divinilbenceno
MSDS	Material Safety Data Sheet (Hoja de Seguridad)
COAs	Certificate of Analysis (Certificado de Calidad)
EPPs	Equipos de Protección Personal
% m/m	Porcentaje masa-masa
w.t %	Porcentaje en peso
Aprox.	Aproximadamente
BV	Bead Volumen (volumen de lecho de resina)
V	Volumen
$\vec{v}$	Velocidad lineal
Pág.	Página

# SIMBOLOGÍA

XIII

mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
ft	Feet= pie
in	Inches= pulgadas
cm <sup>3</sup>	Centímetro Cúbico
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
ft <sup>3</sup>	Pie Cúbico
L	Litro
°C	Grado Celsius
g	Gramo
Kg	Kilogramo
lb	Libra
gr	Grano
Ton	Tonelada
mEq	Mili equivalente químico
Eq	Equivalente químico
π	pi= 3.1416
h	Hora
min	Minuto
m/ h	Metro por hora
L/min	Litros por minuto

rpm	Revoluciones por minuto
V	Voltios
A	Amperios
HP	Horse power (fuerza de caballo)
Kw	Kilo-voltios
Hz	Herzios

# ÍNDICE DE FIGURAS

XV

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b>	
Mapa de ubicación del proyecto propuesto.....	25
<b>Figura 2.</b>	
Cadena de una Resina Catiónica con grupos de Ácido Sulfónico y Poliestireno.....	35
<b>Figura 3.</b>	
Cadena de una Resina Aniónica con grupos de Amonio Cuaternario.....	37
<b>Figura 4.</b>	
Diferentes Procesos de Sorción. ....	37
<b>Figura 5.</b>	
Representación Gráfica del Intercambio Iónico en una Resina. ....	42
<b>Figura 6.</b>	
Vista Expandida de una Resina de Poliestireno.....	43
<b>Figura 7.</b>	
Gráfica de Relación del Tamaño de Partícula respecto al Tiempo de Equilibrio en Resinas de Intercambio Iónico.....	45
<b>Figura 8.</b>	
Resina Monósfera en el que se aprecia Similar Tamaño de Partículas.....	50
<b>Figura 9.</b>	
Resina no Monósfera en el que se aprecia que el Tamaño de Partículas es Irregular.....	50

**Figura 10.**  
Proceso de Ablandamiento y Regeneración en un Sistema de Intercambio  
Iónico.....53

**Figura 11.**  
Esquema de un Desmineralizador de Agua.....57

**Figura 12.**  
Diagrama de Proceso de Desmineralización del agua en la Unidad de  
Intercambio Iónico.....84

**Figura 13.**  
Representación Gráfica de las Columnas de Acrílico.....86

**Figura 14.**  
Unidad de Intercambio Iónico construido, listo para ser puesto en marcha...88

**Figura 15.**  
Correcto uso de EPPs para Actividades de altura en el Equipo. ....96

**Figura 16.**  
Correcto uso de EPPs para Actividades de Manipulación y Preparación de  
Sustancias. ....97

**Figura 17.**  
Correcto uso de EPPs para Actividades de Manipulación y Preparación de  
Sustancias.....99

**Figura 18.**  
Diagrama de Flujo de Proceso para la Desmineralización del Agua en el  
Intercambiador Iónico (líneas color azul).....102

**Figura 19.**

Diagrama de Flujo de Proceso para la Regeneración de la Resina Catiónica (líneas color cian). .....105

**Figura 20.**

Diagrama de Flujo de Proceso para el Lavado Lento-Rápido de la Resina Catiónica (líneas color púrpura). .....106

**Figura 21.**

Diagrama de Flujo de Proceso para el Retrolavado de la Resina Catiónica (líneas color verde). .....108

**Figura 22.**

Diagrama de Flujo de Proceso para la Regeneración de la Resina Aniónica (líneas color café). .....109

**Figura 23.**

Diagrama de Flujo de Proceso para Lavado Lento-Rápido de la Resina Aniónica (líneas color gris). .....110

**Figura 24.**

Diagrama de Flujo de Proceso para Retrolavado de la Resina Aniónica (líneas color amarillo). .....112

**Figura 25.**

Imagen de cada una de las Columnas de la Unidad de Intercambio Iónico construida.....115

**Figura 26.**

Imagen de la Bomba utilizada para la Unidad Intercambio Iónico.....116

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

XVII

## Página

### **Gráfico 1.**

Variación de la Dureza del agua de la Muestra 1 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.....119

### **Gráfico 2.**

Variación del pH del agua de la Muestra 1 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....119

### **Gráfico 3.**

Variación de Cloruros del agua de la Muestra 1 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....120

### **Gráfico 4.**

Variación de STD del agua de la Muestra 1 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....120

### **Gráfico 5.**

Variación de la Dureza del agua de la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....122

### **Gráfico 6.**

Variación del pH del agua de la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....123

### **Gráfico 7.**

Variación de Cloruros del agua de la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....123

**Gráfico 8.**

XIX

Variación de STD del agua de la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico. ....124

**Gráfico 9.**

Variación de la Remoción de Iones obtenidos por la Unidad de Intercambio Iónico para ambas muestras tratadas.....124

# ÍNDICE DE TABLAS

XX

## Página

### **Tabla I.**

Indicadores Fisicoquímicos importantes en la Calidad del Agua. ....32

### **Tabla II.**

Contenido de Humedad versus el Nivel de Reticulación en Resinas Sintéticas de Intercambio Iónico. ....46

### **Tabla III.**

Efecto del Envejecimiento en las Propiedades Físicas de una Resina Sintética de Intercambio Iónico. ....48

### **Tabla IV.**

Dimensionamiento teórico de la Unidad de Intercambio Iónico.....70

### **Tabla V.**

Dimensionamiento real de la Unidad de Intercambio Iónico. ....70

### **Tabla VI.**

Condiciones de Operación para la Unidad de Intercambio Iónico.....80

### **Tabla VII.**

Características de los Regenerantes recomendados por el Proveedor y utilizados en este Proyecto. ....81

### **Tabla VIII.**

Algunas Propiedades Fisicoquímicas y Especificaciones Técnicas y de Operación de la Resina Catiónica LEWATIT MonoPlus S 108. ....81

### **Tabla IX.**

Algunas Propiedades Fisicoquímicas y algunas Especificaciones Técnicas y de Operación de la Resina Aniónica LEWATIT MonoPlus M 500. ....82

**Tabla X.**

Algunas Especificaciones de Operación utilizando HCl como Regenerante para la Resina Catiónica LEWATIT MonoPlus S 108. ....83

**Tabla XI.**

Algunas Especificaciones de Operación utilizando NaOH como Regenerante para la Resina Aniónica LEWATIT MonoPlus M 500. ....83

**Tabla XII.**

Identificación de los principales Componentes de la Unidad de Intercambio Iónico. ....89

**Tabla XIII.**

Identificación de los principales Riesgos Laborales y de Seguridad involucrados en el manejo de la Unidad de Intercambio Iónico. ....91

**Tabla XIV.**

Condiciones de Operación para la Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.....101

**Tabla XV.**

Condiciones de Operación para de Lavado Lento en la Columna Catiónica.....104

**Tabla XVI.**

Condiciones de Operación para Lavado Rápido en la Columna Catiónica.....107

**Tabla XVII.**

Condiciones de Operación de proceso de Retro-Lavado en la Columna Catiónica. ....107

**Tabla XVIII.**

Condiciones de Operación para Lavado Lento en la Columna Aniónica.... 109

**Tabla XIX.**

Condiciones de Operación para Lavado Rápido en la Columna Aniónica..111

**Tabla XX.**

Condiciones de Operación para Retrolavado en la Columna Catiónica.....112

**Tabla XXI.**

Especificaciones Técnicas del material de Acrílico utilizado para las Columnas de Intercambio.....114

**Tabla XXII.**

Especificaciones Técnicas de la Bomba utilizada en el Equipo de Intercambio Iónico. ....116

**Tabla XXIII.**

Resultados Iniciales obtenidos de la primera muestra de agua.....117

**Tabla XXIV.**

Resultados obtenidos de la primera muestra luego del paso por la Columna Catiónica de la Unidad de Intercambio Iónico. ....117

**Tabla XXV.**

Resultados obtenidos de la primera muestra luego del paso por la Columna Aniónica de la Unidad de Intercambio Iónico. ....118

**Tabla XXVI.**

Resultados Iniciales obtenidos de la segunda muestra de agua.....121

**Tabla XXVII.**

Resultados obtenidos de la segunda muestra luego del paso por la Columna Catiónica de la Unidad de Intercambio Iónico. ....121

**Tabla XXVIII.**

Resultados obtenidos de la segunda muestra luego del paso por la Columna Aniónica de la Unidad de Intercambio Iónico. ....122

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto se basa en el diseño y construcción de una Unidad de Intercambio Iónico en el que se desmineralizará diferentes tipos de agua utilizando un sistema de lecho adsorbente de resinas tanto catiónicas como aniónicas. La combinación de ambos lechos son los más utilizados industrialmente para desionizar aguas ya sea como parte del proceso productivo o como un sistema tratamiento de aguas.

Mediante el intercambio iónico entre las resinas y el agua se logra el ablandamiento y remoción parcial o total de los sólidos disueltos. A medida que el agua pasa a través de las resinas, los iones presentes en este desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos de las resinas.

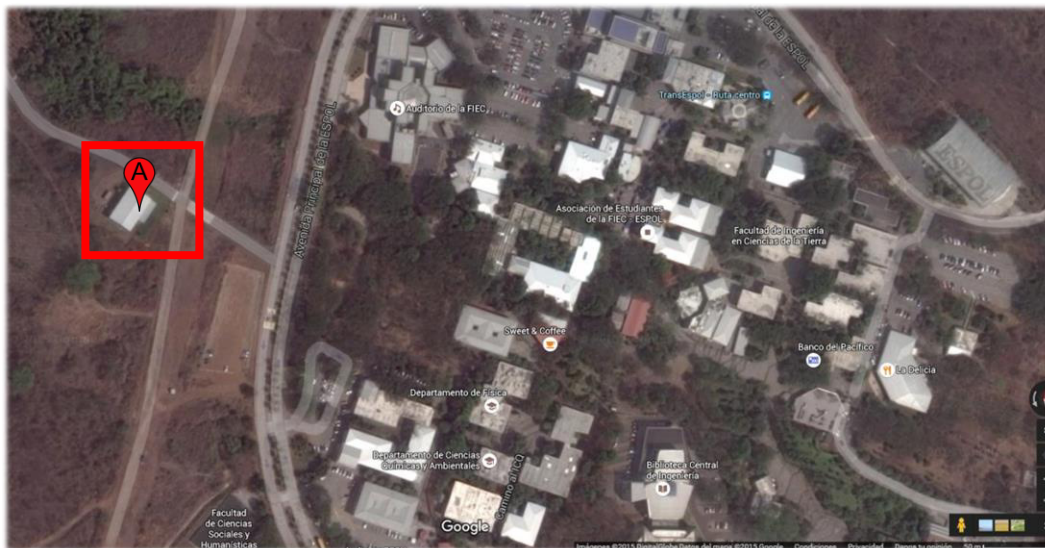
Con este equipo, los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Química de la ESPOL podrán hacer uso de mismo para fines prácticos en complementación a los conocimientos teóricos adquiridos en las diferentes materias en el que se aprende este principio químico.

## 1.2 Mapa de Ubicación

25

La construcción del equipo propuesto, como ya se mencionó, se llevará a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias ubicado a un extremo de la avenida principal dentro de la ESPOL, este laboratorio pertenece al Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales de la Facultad de Ciencias Químicas y Matemáticas de la ESPOL, ubicada en el Km 30 ½ de la vía Perimetral, Guayaquil EC090150 (sector Prosperina).

**Figura 1.** Mapa de ubicación del proyecto propuesto.



Fuente: Google Maps. Sitio web:  
<https://www.google.com.ec/maps/place/ESPOLTEL+S.A/@-2.1460544,-79.9606284,924m/data=!3m2!1e3!4b1!4m2!3m1!1s0x902d72f925e5bfbdb:0x327cdb9f7f4ba3b2!6m1!1e1>.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

Construir un equipo piloto para la experimentación del Intercambio Iónico como parte de un proceso de equipamiento del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FCNM-ESPOL.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Diseñar un equipo de Intercambio Iónico con las dimensiones y condiciones necesarias para tratar diferentes tipos de aguas.
- Adquirir y utilizar los recursos necesarios, a partir de un flujo de caja, para la construcción y ensamblaje del equipo diseñado.
- Realizar las experimentaciones mínimas necesarias para asegurar el correcto funcionamiento del equipo.
- Cuantificar la remoción de iones por métodos fisicoquímicos y determinar la eficiencia del equipo.
- Presentar resultados y las condiciones de operación a escala piloto para el Intercambio de Iones del agua a tratar.

## 1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

27

En la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas-ESPOL, el Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales cuenta con la Carrera de **Ingeniería Química**, de apenas 10 años implementada en la universidad. LOPU, abreviatura para el **Laboratorio** de Operaciones Unitarias, es un laboratorio integral creado para los estudiantes de la carrera con el fin de poner en práctica las diferentes **operaciones unitarias** que forman parte del pensum académico.

Tal laboratorio, no se encuentra del todo equipado adecuadamente, en cuanto a **equipos** e implementaciones de seguridad integral, lo que evita que la Carrera de Ingeniería Química no cuente con la acreditación ABET.

Para tal acreditación, todos los laboratorios con los que cuente la carrera DE Ingeniería Química, deben estar correctamente equipados bajo las normativas y estándares aplicables.

De todas las materias con las que se cuenta en la malla curricular, el 50% de estas están programadas para ser dictadas de manera teórica y práctica, de las cuales muchas de ellas no se logran realizar su respectiva práctica experimental por falta de recurso o tiempo.

Un ejemplo de este caso es la materia **Tratamientos de Aguas** cód. ICQ00877 cuyo syllabus exige un complemento práctico del tema de **Intercambio Iónico por Resinas**, y solo se lo explica teóricamente ya que

no existe equipo alguno (a escala de laboratorio o escala piloto) para practicar este principio.

28

¿Es necesaria la implementación de una Unidad de Intercambio por Resina Iónica que remueva todos los iones del agua, y que además complemente los conocimientos académicos del estudiante de Ingeniería Química?

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

El Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FCNM-ESPOL debe contar con los equipos suficientes y necesarios para complementar los conocimientos teóricos de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

Ante la falta de equipos, se propone el Diseño, Construcción y Puesta en Marcha de un equipo en la que ponga en práctica los principios fisicoquímicos para el Tratamiento de Aguas, el cual es parte del pensum académico dictada en diferentes materias que forman parte de la malla curricular de la carrera.

No existe tal equipo para las experimentaciones y con la implementación de uno, se logrará un entendimiento más didáctico al estudiante y a su vez se equipara el Laboratorio de Operaciones Unitarias con equipos integrales para futuras generaciones de estudiantes de la carrera.

## **1.6 HIPÓTESIS**

30

La Unidad de Intercambio Iónico removerá la mayor cantidad de cationes y aniones del agua a tratar, y dicha remoción podrá ser cuantificada mediante análisis fisicoquímicos.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

Los suelos naturales contienen sólidos con sitios activos que intercambian iones de ciertos minerales tales como la zeolita que también son buenos intercambiadores. El intercambio iónico se da en paredes celulares, membranas celulares y otras estructuras que tengan carga.

En el caso de aguas naturales, también contiene sales disueltas en forma de partículas cargadas llamadas iones. Estas impurezas iónicas pueden llevar a problemas en sistemas de enfriamiento y calentamiento, generación de vapor, y manufacturas. En aguas naturales y aguas residuales, existen muchos iones que requieren ser removidos porque alteran la composición del mismo.

### 2.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Se dice que un agua está contaminada cuando se han modificado sus características físicas, químicas y microbiológicas de tal manera que se vuelve no apta para el consumo de un ser vivo y otras actividades de usos industriales, uso agrícola, entre otros. La contaminación puede darse por medio naturales, pero el término *contaminación* está más ligado a actividades antropogénicas.

Las aguas superficiales son en general más vulnerables a la contaminación de origen antropogénicas que las aguas subterráneas, por su exposición directa a la actividad humana. Sin embargo, una fuente superficial puede

restaurarse más rápidamente que una fuente subterránea a través de ciclos de escorrentía estacionales, es por eso que los efectos sobre la calidad serán distintos para lagos y embalses que para ríos, y diferentes para acuíferos de roca o arena y grava.

**Tabla I.** Indicadores Fisicoquímicos importantes en la Calidad del Agua.

Indicadores Físicos	Indicadores Químicos
— Turbidez	— pH
— Color	— Acidez
— Olor y sabor	— Alcalinidad
— Temperatura	— Dureza
— Sólidos disueltos	— Oxígeno disuelto
— Conductividad	— Aceites y grasas
— Sólidos suspendidos	— Demanda bioquímica de oxígeno
	— Demanda química de oxígeno
	— Metales pesados

**Nota:** tomada de apuntes catedráticos Tratamientos del Agua. ESPOL, Octubre 2014.

A continuación se detalla alguno de éstos parámetros:

**a) pH:** cualquier tipo de agua debe estar a un pH de 5-9. El agua potable está a un pH entre 6.5 y 7.5.

**b) Conductividad:** capacidad que tiene el agua para transportar electricidad. Está asociada con la concentración de iones que tenga el agua. Se puede medir indirectamente a partir de los STD mediante la relación:

$$2 \mu\text{S} \approx 1 \text{ ppm STD} = 1 \text{ mg/L STD}$$

**c) Sólidos totales disueltos (STD):** suma de todos los iones positivos y negativos presentes en el agua.

**d) Sólidos totales suspendidos (STS):** materia orgánica que tienden a *nadar* en la superficie del agua y que no precipitan. Influyen directamente en

la turbidez del agua. Los sólidos sedimentables son partículas grandes y precipitan fácilmente, éstos no aportan turbidez al agua.

$$\text{Sólidos Totales (ST)} = \text{STD} + \text{STS}$$

**e) Acidez:** capacidad del agua para neutralizar bases, o también conocido como la capacidad para neutralizar  $\text{OH}^-$ . La causa más común de la acidez es el  $\text{CO}_2$  proveniente de la atmósfera o de residuos químicos resultados de las PTAR.

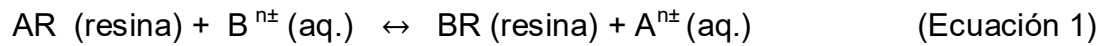
**f) Alcalinidad:** capacidad del agua para neutralizar ácidos, reacciona con iones hidrogeno. Existe tres formas de alcalinidad debido a tres especies químicas: bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^-$ ), e hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ).

**g) Dureza:** concentración de calcio y magnesio en el agua. Los que aportan con mayor dureza al agua son los iones metálicos divalentes. A mayor dureza se generara menor espuma mientras que a menor dureza se generara mayor espuma.

## 2.2 FUNDAMENTO DEL INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico es básicamente una serie de reacciones químicas entre los iones en la solución y los iones en una fase sólida insoluble de la resina. Las técnicas que se usan en el intercambio de iones se parecen tanto a las que se utilizan en la operación unitaria de adsorción, que para la mayoría de los fines de ingeniería, el intercambio de iones se puede considerar como un caso especial de adsorción.

En el intercambio de iones, el sólido elimina ciertos iones pero para conservar su electro neutralidad entonces libera iones de reemplazo a la solución.



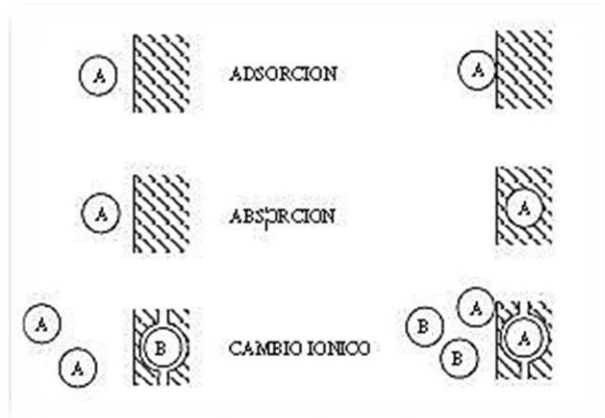
Se han desarrollado varios tipos de adsorbentes para obtener un tipo específico de separaciones. Generalmente, los adsorbentes tienen forma de esferas cuyo tamaño va de cerca de 0.1 mm a 12 mm, y las partículas más grandes se usan en los lechos empacados. La partícula de una sustancia adsorbente tiene una estructura muy porosa, con numerosos poros muy finos, cuyo volumen alcanza hasta el 50% del volumen total de la partícula.

La adsorción suele ocurrir como una **mono capa** sobre la superficie de los poros, pero a veces se forman varias capas. La adsorción física, o de Van der Waals, por lo general sucede entre las moléculas adsorbidas y la superficie interna sólida del poro, y es fácilmente reversible.

El proceso de adsorción global consta de una serie de pasos:

1. Cuando el fluido pasa alrededor de la partícula en un lecho fijo, el soluto primero se difunde desde el volumen del fluido hacia toda la superficie exterior de la partícula.
2. Luego, el soluto se difunde hacia el interior del poro hasta la superficie del mismo.
3. Por último, el soluto se adsorbe sobre la superficie. Así, el proceso de adsorción global es una serie de pasos.

**Figura 2.** Diferentes Procesos de Sorción.



**Nota:** Appelo and Postma, 1993. Tomado de la página oficial *BioProcesos*, disponible en <http://procesosbio.wikispaces.com/Adsorci%C3%B3n>

Existen varios adsorbentes comerciales y algunos de los principales se describen en seguida. Todos se caracterizan por grandes áreas superficiales de los poros, que van desde 100 hasta más de 2000 m<sup>2</sup>/g.

- a) **Carbón activado:** este es un material micro cristalino que proviene de la descomposición térmica de madera, cortezas vegetales, carbón, etc., y tiene áreas superficiales de 300 a 1200 m<sup>2</sup>/g con un promedio de diámetro de poro de 10 a 60 Å. Las sustancias orgánicas generalmente se adsorben carbón activado.
- b) **Gel de sílice:** este adsorbente se fabrica tratando con ácido una solución de silicato de sodio y luego secándola. Tiene un área superficial de 600 a 800 m<sup>2</sup>/g y un promedio de diámetro de poro de 20 a 50 Å. Se utiliza principalmente para deshidratar gases líquidos y para fraccionar hidrocarburos.
- c) **Alúmina activada:** para preparar este material se activa el óxido de aluminio hidratado calentándolo para extraer el agua. Se usa ante todo

para secar gases y líquidos. Las áreas superficiales fluctúan entre 200 y 500 m<sup>2</sup>/g con un promedio de diámetro de poro de 20 a 140 Å.

- d) Zeolitas tipo tamiz molecular:** estas zeolitas son aluminosilicatos cristalinos porosos que forman una red cristalina abierta que tiene poros de uniformidad precisa. Por tanto, el tamaño uniforme del poro es diferente al de otros tipos de adsorbentes que tienen una gama de tamaños de poro. Las diversas zeolitas tienen tamaños de poro que van de cerca de 3 a 10 Å. Las zeolitas se usan para secado, separación de hidrocarburos y de mezclas y muchas otras aplicaciones.
- e) Polímeros o resinas sintéticas:** se fabrican polimerizando dos tipos principales de monómeros. Los que se generan a partir de compuestos aromáticos como el estireno y el divinilbenceno se usan para adsorber compuestos orgánicos no polares de soluciones acuosas. Los que provienen de ésteres acrílicos se utilizan para solutos más polares en soluciones acuosas.

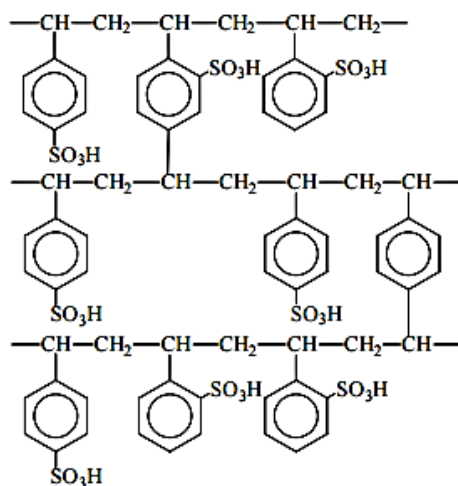
## 2.3 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL INTERCAMBIO IÓNICO

En 1850 se documenta por primera vez estudios acerca del fenómeno de intercambio iónico por dos químicos agrícolas. Luego en 1858 se prueba que las reacciones de intercambio iónico en el suelo eran reversibles. Ya en 1905 un científico alemán desarrolló el proceso de ablandamiento del agua usando aluminosilicatos de sodio sintético a las cuales llamó *zeolitas*.

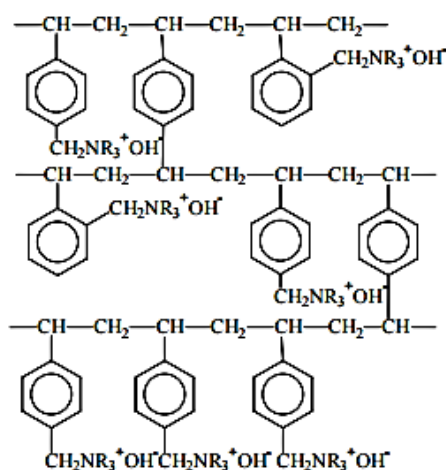
Ya en 1940's se desarrollaron resinas en base de la copolimerización de estireno y divinilbenceno (DVB), los cuales si eran capaz de desmineralizar

completamente el agua. Estos dos últimos son los más usados hoy en día con diferencias en porosidad, macroporosidad, uso de acrílicos, etc.

**Figura 3.** Cadena de una Resina Catiónica con grupos de Ácido Sulfónico y Poliestireno.



**Figura 4.** Cadena de una Resina Aniónica con grupos de Amonio Cuaternario.



**Nota:** tomado de *Ion Exchange Resins*. Artículo de Service Chemist, Drew New Zealand.

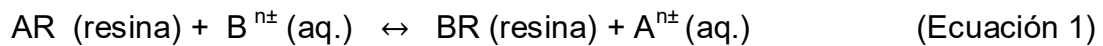
Disponible en <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/water/13D.pdf>

## 2.4 CINÉTICA Y EQUILIBRIO DEL INTERCAMBIO IÓNICO

La mayoría de las explicaciones dadas a este fenómeno ha sido a una primera aproximación en donde el principio fundamental que gobierna la cinética y equilibrio de intercambio iónico están satisfactoriamente establecidos pero sigue existiendo problemas en cuanto a la predicción cuantitativa de las afinidades de los iones y las tasas de intercambio. La simple teoría del equilibrio implica que ambas fases, fase acuosa y fase de la resina se comportan como solución ideal a pesar de que se haya reconocido que las soluciones electrolíticas son no ideales.

### 2.4.1 La Primera Aproximación

El principal proceso que se da cuando una resina se pone en contacto con una solución electrolítica es el intercambio estequiométrico de cantidades de equivalentes de cationes y aniones, de acuerdo a la siguiente ecuación:



Siendo la reacción reversible, a primera estancia la reacción avanza relativamente rápido, luego disminuye su velocidad hasta que finalmente alcanza el equilibrio.

Las velocidades de las reacciones de intercambio de iones son limitadas por las velocidades de difusión del contraión en la solución externa y en los poros de las partículas de la resina. Se supone que existe un equilibrio en cualquier punto dentro de cada partícula, y para predecir las variaciones de concentración con el tiempo se necesitará la solución de las ecuaciones de la difusión en estado no estacionario. Para las aplicaciones de ingeniería, la velocidad de transferencia de masa puede aproximarse utilizando un coeficiente global de  $K_c$  y una fuerza impulsora basada sobre la concentración en la solución y la concentración  $[c]$  que estará en equilibrio con la concentración promedio de la partícula.

Se ha demostrado que los grupos electrolíticos en una resina son intercambiables y que la posición de equilibrio es independiente del tamaño de partícula de la resina. De acuerdo a la ecuación:

$$\frac{[BR][A]}{[AR][B]} = K_c \quad \text{(Ecuación 2)}$$

El valor de  $K_c$  expresa la afinidad relativa de una resina para dos iones y puede ser por lo tanto referida como un coeficiente de selectividad. A pesar que los coeficientes de selectividad son obtenidos para iones de la misma valencia, nada preciso se puede decir considerando afinidades relativas de iones univalentes que iones divalentes para la misma resina.

Cambios en la composición o concentración de la solución generalmente tiene pequeños efectos en el valor de  $K_c$  pero variaciones en la composición de la resina usualmente cambia el valor de  $K_c$  considerablemente. Así, si dos iones están *compitiendo por la resina* (ión A e ión B) su respectivo valor de  $K_c$  depende de si la resina es grande de la forma del ión A o la forma del ión B o intermedio. Así mismo el valor de  $K_c$  tiene una muy marcada dependencia en la estructura de la resina y particularmente en el grado de reticulación.

Para soluciones diluidas, a mayor valencia del ión mas fuerte este será tomada por la resina. Dentro de un grupo de iguales valencias, sin embargo un considerable esparcimiento de afinidades es encontrado así que una alta afinidad de iones univalentes puede bien ser tomados más fuerte desde una concentración dada que desde un ión bivalente de baja afinidad.

Si una solución de altas concentraciones está siendo tratada, esto puede acelerar el grado de reacción. El grado de DVB reticulado determina la porosidad del lecho y por lo tanto la movilidad de los iones dentro del lecho.

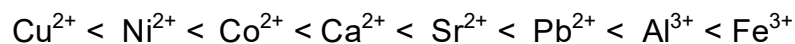
Con iones de diferente valencia, la posición de equilibrio no es independiente de la concentración de la solución empleada. El efecto de diluir la fase acuosa es causar más del ión de mayor valencia que pase

hacia la resina. La diferencia de entropía durante el intercambio entre los números de iones en las dos fases, puede traer consigo que iones bivalentes o multivalentes pueden ser extraídos eficientemente de una solución diluida usando una resina de catión univalente.

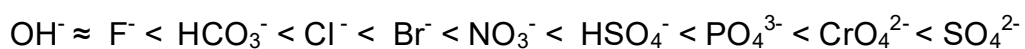
Consecuentemente los iones de la misma valencia demuestran coeficientes de actividad similar en soluciones diluidas pero marcadas coeficientes de actividad diferentes en soluciones concentradas.

En el caso de la afinidad de ácidos sulfónicos en los cationes, este aumenta con el tamaño del ión y la carga del catión. Generalmente la afinidad es alta para iones grandes de alta valencia. Para soluciones diluidas, la afinidad de algunos cationes comunes sigue el siguiente orden.

Dentro de un grupo de iguales valencias,



De igual manera, para aniones sigue el orden:



Este orden establecido no muestra una correlación exacta con alguna propiedad simple del ión, tal como el peso atómico, radio de cristal, etc. A pesar de que si hay una correlación inversa parcial para iones similares de su radio iónico hidratado.

Mientras los iones estén en contacto, éstos se comportan sustancialmente como puntos de carga que obedecen a las leyes de Coulomb y sus propiedades no son específicas. Pero cuando los iones están en contacto,

su interacción depende en la distancia de aproximación más cercana, reflejado al tamaño y deformidad de los iones y también una importante contribución de las fuerzas no-Coulombicas. En el caso de iones muy grandes, el tamaño de poro de la resina juega un rol decisivo, y de cómo los iones son enteramente excluido de la resina.

Como se mencionó al inicio de esta sección, reconociendo a ambas fases puedan ser no-ideales, una de ellas debe insertar un factor de coeficiente de actividad que convierta la concentración a actividades, de acuerdo a la siguiente reacción:

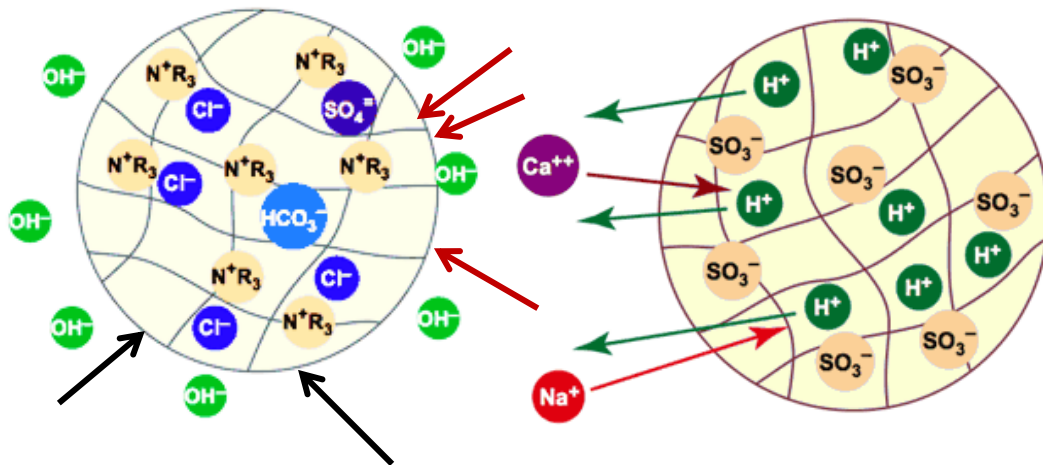
$$\frac{[\overline{B^+}] \overline{f}_B}{[\overline{A^+}] \overline{f}_A} \times \frac{[A^+] f_A}{[B^+] f_B} = K_a \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde  $f_A$  y  $f_B$  son coeficientes de actividades en la solución y  $\overline{f}_A$  y  $\overline{f}_B$  son los coeficientes de actividad en la resina y  $K_a$  es el coeficiente de equilibrio termodinámico. En la práctica, corregir las actividades en la solución tiene a producir pocas o casi ninguna mejora en la constante  $K_a$ . Esto demuestra que la no idealidad es más pronunciada en la resina.

## 2.5 RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Una resina es un polímero con sitios activos cargados eléctricamente en donde un ion puede ser reemplazado por otro. Estos intercambios se dan sin que haya alteración física alguna con el material de intercambio iónico. El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie, ya que más del 99% de la capacidad del material de intercambio iónico está su interior.

**Figura 5.** Representación Gráfica del Intercambio Iónico en una Resina.



**Nota:** tomado de la página oficial TU&CO, disponible en <http://www.tuandco.com/aprendeymejora/como-funciona-un-descalcificador>

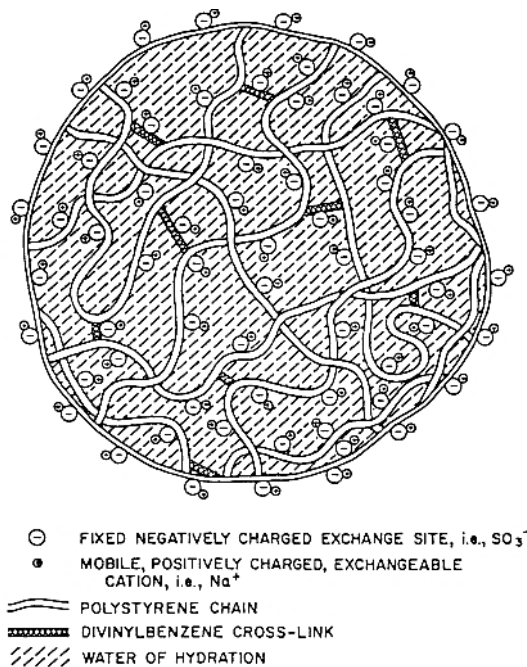
Las resinas son preparadas como lechos esféricos entre 0.5-1.0 mm de diámetro, aparentemente sólidos pero que en una vista molecular tienen una estructura bastante separadas unas de otras, lo que significa que una solución que pase a través del lecho de la resina puede fluir a través del mismo atrayéndolo hacia un contacto íntimo con los sitios activos de intercambio. Tienen usualmente paredes porosas con una considerable superficie externa y permeable en donde los iones pueden ser atrapados. Donde sea que allá una gran área superficial, la adsorción juega un rol.

Estas resinas son insolubles en ácidos o bases, las cuales tienen sales que a su vez son insolubles, y es esto lo que le permite intercambiar ya sea iones positivos (intercambio catiónico) o iones negativos (intercambio aniónico). Son insolubles bajo condiciones normales de operación y resistentes a fracturas.

Debido a su composición, el DVB es un agente de reticulación que da a los lechos su fuerza física mientras que el estireno hace que no sea soluble en

agua. Altos contenidos de DVB hacen del lecho muy resistente a la contracción y dilatación de durante la normal operación.

**Figura 6.** Vista expandida de una Resina de Poliestireno.



**Nota:** tomado de *Ion Exchange Resins*. Artículo de Service Chemist, Drew New Zealand.

Disponible en <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/water/13D.pdf>

## 2.5.1 PROPIEDADES DE LAS RESINAS

### 2.5.1.1 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO

La capacidad total de un ión de intercambio está definida como el número total de equivalentes químicos disponibles para el intercambio por unidad de peso o unidad de volumen de resina. La capacidad puede ser expresada en términos de miliequivalentes por gramo seco de resina o en términos de miliequivalentes por mililitros de resina húmeda.

Uno de los factores que influye en la capacidad de intercambio en las resinas es el tamaño de partícula. El tamaño físico de la resina es controlado durante la polimerización.

### **2.5.1.2 TASA DE EQUILIBRIO**

Las reacciones de intercambio iónico son reacciones reversibles con condiciones de equilibrio diferentes para cada ión. El tamaño de partícula de las resinas influye en el tiempo requerido para establecer las condiciones de equilibrio. En sí, una disminución en el tamaño de partícula acorta el tiempo requerido para el equilibrio.

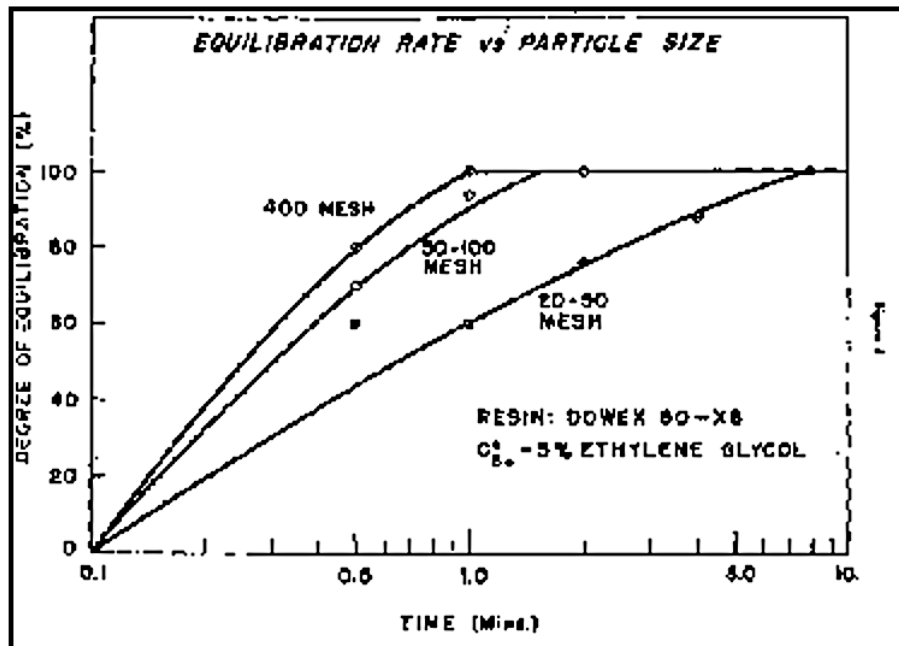
Hay dos tipos de difusión que pueden ser considerados durante el equilibrio en el intercambio iónico:

La primera es la llamada *difusión de película* que es el movimiento de iones desde los alrededores de la solución hacia la superficie de la partícula de intercambio iónico. Usualmente ésta difusión es la reacción de control en soluciones diluidas.

La segunda es la llamada *difusión interna* que es el movimiento de iones desde la superficie hacia el interior del lecho de la resina. Usualmente ésta difusión es la reacción de control en soluciones concentradas.

La reticulación también tiene una influencia definida en el tiempo requerido para cada ión para que alcance el equilibrio. Un ión de resina de intercambio iónico es bastante resistente a la difusión de varios iones a través de este y por lo tanto, el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio es mucho más largo.

**Figura 7.** Gráfica de relación del Tamaño de Partícula respecto al Tiempo de Equilibrio en Resinas de Intercambio Iónico.



**Nota:** tomado de Scott Wierzchowski, (Nov. 1995). Term projects of Ion Exchangers. Disponible en: <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/IONEX/biomain.htm>

En general, cuanto mayor sea el ión o molécula de difusión en una partícula de intercambio iónico, o mientras más altamente reticulado el polímero sea, más tiempo se llevara para alcanzar las condiciones de equilibrio.

### 2.5.1.3 CAUDAL

Los procesos de intercambio iónico pueden ser con flujo hacia arriba o flujo hacia abajo a través de las columnas en donde residen las resinas. La forma esférica de las resinas resiste a los flujos del líquido a través y alrededor de ellos. A menor tamaño de partícula, mayor será la resistencia en contra el cual un fluido debe fluir. Esta resistencia aumenta rápidamente cuando se emplean partículas de resinas menores a malla 100.

#### 2.5.1.4 GRADO DE RETICULACIÓN O ESTRECHAMIENTO

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 cambiabiles. Mientras más alta sea la reticulación en la resina, más difícil será la introducción de grupos funcionales adicionales. Algo de hinchamiento es deseable para incrementar las velocidades de difusión dentro de las partículas, pero el hinchamiento también disminuye la capacidad de la resina por unidad de volumen del lecho.

Por ejemplo, los grupos de amonio cuaternario en las resinas aniónicas, son introducidos después de que la polimerización se haya completado y éstos también son introducidos ambos dentro de la partícula como en la superficie. Menos grupos funcionales pueden ser introducidos dentro de las partículas cuando son altamente reticulados, y por lo tanto la capacidad total en una base seca cae ligeramente.

**Tabla II.** Contenido de Humedad versus el Nivel de Reticulación en Resinas Sintéticas de Intercambio Iónico.

Reticulación (%)	% Humedad (%)	Capacidad (mEq/mL)
<b>2</b>	<b>71</b>	<b>1.2</b>
4	61	1.5
6	53	1.8
8	46	2.0
<b>10</b>	<b>42</b>	<b>2.2</b>
12	37	2.4
14	34	2.6
16	32	2.8

**Nota:** recuperado de Michaud, C.F. The role of Crosslinking in Ion Exchange Resins. June, 2011.

Esta situación se invierte cuando un volumen de base húmeda es usado para medir la capacidad de la resina. A pesar de que pocos grupos

funcionales son introducidos en resina altamente reticulada, estos grupos están espaciados más cerca en un volumen de base porque el volumen de agua es reducido por la reticulación adicional. Así, la capacidad de un volumen húmedo incrementa conforme la reticulación incrementa también.

La cantidad de reticulación depende de las proporciones de los diferentes monómeros usados durante la polimerización. Prácticos rangos son del 4% al 16%. Una propiedad física de las resinas de intercambio iónico que cambia con los cambios en la reticulación, es el contenido de humedad en la resina. Por ejemplo, los grupos cuaternarios de amonio en las resinas aniónicas suelen retener agua en el interior de cada resina.

Una importante conclusión que se obtiene, es que a marcadas selectividades en iones simples en porque está asociada con un alto grado de reticulación en la resina. Con resinas altamente expandidas y de baja reticulación muestran bajas preferencias para pequeñas iones más que otros.

#### **2.5.1.5 ENVEJECIMIENTO DE LA RESINA**

El envejecimiento de la resina provoca la ruptura de la reticulación del DVB en la resina y su expansión por la ganancia de agua (humedad). La capacidad total de secado no cambia mucho porque los grupos reactivos en las resinas usadas para el ablandamiento del agua, son muy fuerte y resistentes a la degradación.

La pérdida de capacidad en la resina se liga a la expansión del mismo, lo que significa que no hay menores sitios reactivos un determinado volumen.

Casi todos los lechos desaparecerían si no hay una correcta limpieza de la distribución superior de la columna. La fuerza de los lechos individuales se deterioran acerca de un 75% por la oxidación y el resultado es que se duplica la caída de presión.

En el caso de resinas catiónicas para ablandamiento son más estables y no tienden a deteriorarse con el tiempo. Sin embargo una oxidación en la resina significaría una menor capacidad por unidad de volumen de resina. Además, la oxidación debilita a la resina tanto física como químicamente por lo que requerirá más regeneraciones.

**Tabla III.** Efecto del Envejecimiento en las Propiedades Físicas de una Resina Sintética de Intercambio Iónico

Edad (años)	Humedad (%)	Capacidad Total		Pérdida de capacidad de volumen (%)	Densidad gm s/mL	Expansión por (%)	
		Seco (mEq/gm)	Húmedo (mEq/ml)			Oxid.	Ca>Na
0	48.7	4.55	1.94	--	0.837	--	1.8
1	49.0	4.55	1.94	--	0.832	0.8	2.3
3	50.5	4.5	1.85	4.64	0.824	5.6	6.3
9	57.1	4.45	1.54	21.1	0.806	16.0	8.6
11	61.1	4.48	1.38	29.4	0.793	32.0	10.5
13	66.9	4.56	1.13	41.8	0.749	33.2	12.7

**Nota:** recuperado de Michaud, C.F. The role of Crosslinking in Ion Exchange Resins. June, 2011.

## 2.6 TIPOS DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

### 2.6.1 SEGÚN SU ESTRUCTURA FÍSICA

**2.6.1.1 Resinas tipo gel:** son polímeros homogéneamente reticulados, tiene sitios de intercambio distribuidos en todo su lecho. El contenido de reticulación de DVB determina a fuerza relativa de los lechos. En las resinas catiónicas comerciales más usadas en ablandadores tienen 8% de DVB. Este tipo de resinas tienen la mayor eficiencia de operación y cuestan menos.

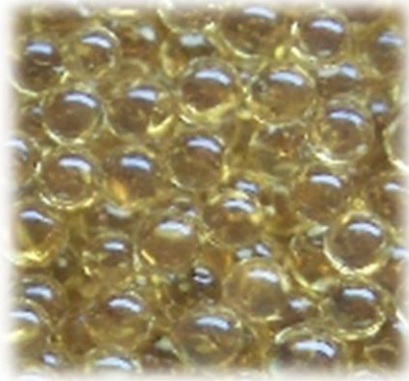
**2.6.1.2 Resinas Macroporosas:** son manufacturadas por un proceso que deja una malla o *sendero* en todo su lecho. Este tipo de estructura *esponjosa* permite una porción activa de lecho para que contengan altos niveles de reticulación de DVB sin afectar la cinética de intercambio. Pesto, infortunadamente, significa que la resina tenga menor capacidad por contener menos sitios de intercambio. Estos poros pueden llegar a ocupar un espacio que va desde 10 a 30% del polímero.

### 2.6.2 SEGÚN SU ESTRUCTURA QUÍMICA

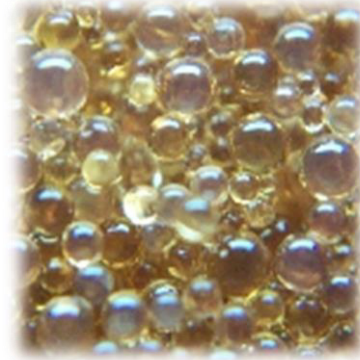
**2.6.2.1 Resinas de estireno:** están basados en hidrocarburos aromáticos, y sus sitios de intercambio no forman parte de su estructura física. El estireno es derivado del petróleo y es una combinación de benceno y etileno lo cual es catalíticamente deshidratado, el producto de esta deshidratación del etileno tiene como producto a grupos vinílicos también llamado como *vinilbenceno*

**2.6.2.2 Resinas de acrílico:** tienen cadenas de hidrocarburos lineales basados en poliacrílicos y polimetacrilados. El DVB es aún usado como reticulante en este tipo de resinas y lo que difiere de las resinas de estireno es que los sitios de intercambio son parte de la estructura física. A medida que está resina se oxida se expande y se vuelve gelatinoso.

**Figura 8.** Resina Monósfera en el que se aprecia Similar Tamaño de Partículas.



**Figura 9.** Resina no Monósfera en el que se aprecia Tamaño de las Partículas Irregulares.



**Nota:** tomado de la página oficial de *Desmineralizadores*. Disponible en <http://www.desmineralizadores.com/tipos.html>

### 2.6.3 SEGÚN SU GRUPO FUNCIONAL

**2.6.3.1 Resinas catiónicas de ácido fuerte:** derivan su funcionalidad de los grupos sulfónicos, y operan a cualquier nivel de pH, repelen sales y requieren de grandes cantidades de regenerantes. Es la más usada para ablandamiento de aguas.

**2.6.3.2 Resinas catiónicas de ácido débil:** tienen grupos carboxílicos como sitios de intercambio, y son altamente eficiente. Son sujetas a reducir

su capacidad si se incrementa el flujo, disminuye la temperatura, o tiene una tasa de dureza-alcalinidad menor a 1.

**2.6.3.3 Resinas aniónicas de base fuerte:** derivan su funcionalidad de sitios de intercambio de amonio cuaternario. Las dos principales resinas de base fuerte son Tipo 1 las cuales son efectivos para la remoción total de aniones en todo tipo de aguas, y Tipo 2 tiene el mismo efecto pero es menos efectivo en la remoción de sílice y dióxido de carbono de aguas.

**2.6.3.4 Resinas aniónicas de base débil:** contienen grupos funcionales de poliamidas los cuales actúan como adsorvedores ácidos para acidez mineral libre. Este tipo de resinas suelen ser usadas en aguas con alto contenido de sulfatos- cloratos o donde la remoción de alcalinidad y sílice no son requeridas.

## **2.7 REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Una resina se considera que está agotada cuando la resinas tiene muchos iones en su lecho, removidos de la solución tratada. En el caso de desmineralizadores, un incremento de la conductividad del efluente ser indicativo del agotamiento de las resina debido al rompimiento iónico.

Suponiendo que el ión B tiene mayor afinidad que el ión A, y la resina contiene al ión A y el ión B es contenido en un agua diluida que pasa a través de la resina, entonces el intercambio se da de acuerdo a la ecuación 1, cuando la capacidad de una resina se agota, entonces habrá más de la forma BR, según la ecuación 2.

Esta expresión indica que si una solución concentrada que contenga al ión A pasa a través del lecho agotado, la resina se regenerará produciendo más AR y así la resina estará lista para su reutilización, mientras que el ión B se eluye en agua.

Cada cierto tiempo la resina debe limpiarse, esto implica pasar agua influente a través de la resina para eliminar todos los sólidos en suspensión. La regeneración es un proceso de 4 pasos para el caso de desmineralizadores:

**2.7.1 Retrolavado:** es el primer paso durante la regeneración, y consiste en hacer pasar agua por la parte inferior de la columna de manera de remover todo tipo de partícula suspendida en la resina y al mismo tiempo *soltar* el lecho de la resina. Este paso generalmente dura no más de 10 minutos hasta que el agua se torne clara.

**2.7.2 Regeneración:** con ácido o sosa caustica (dependiendo del tipo de resina) a un flujo medianamente lento para asegurar el adecuado contacto entre la resina y el regenerante y la eficiencia de regeneración.

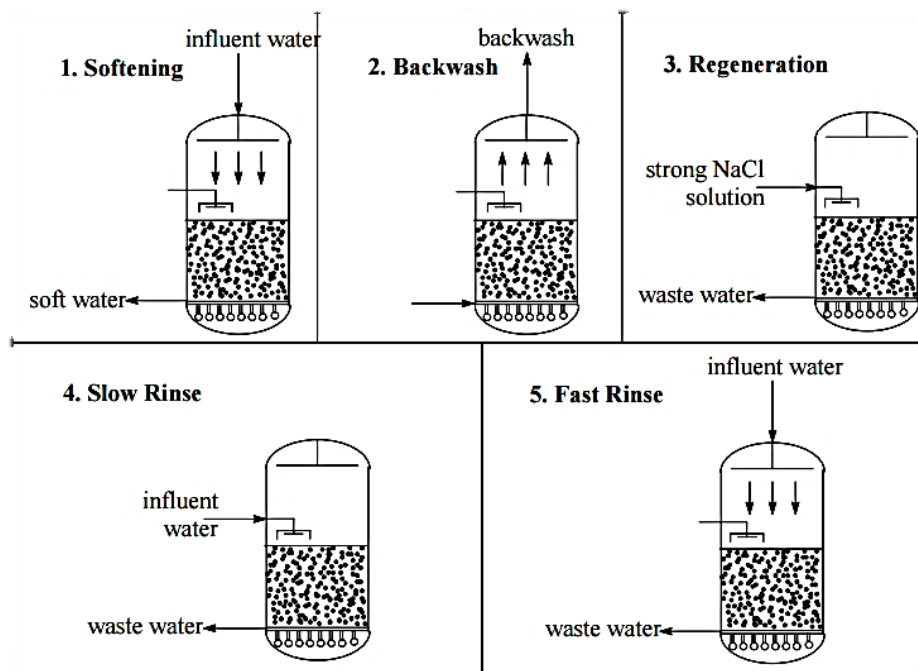
**2.7.3 Lavado lento:** para remover exceso de regenerante sobre todo en la parte inferior de la columna. Esto permite una completa regeneración debido a que se asegura el contacto con la parte inferior del lecho.

**2.7.4 Lavado rápido:** para remover sedimentos, partículas de resinas fuera de su tamaño normal.

Todas las aplicaciones a gran escala de las resinas de intercambio iónico implican tales ciclos tanto de agotamiento como de regeneración. La

regeneración es importante en las resinas porque la reducción del nivel del regenerante disminuye la calidad del agua, permitiendo que una pequeña proporción de los iones que deberían ser absorbidos por la resina, pasen a través de este sin intercambio.

**Figura 10.** Proceso de Ablandamiento y Regeneración en un Sistema de Intercambio Iónico.



**Nota:** tomado de *Ion Exchange Resins*. Artículo de Service Chemist, Drew New Zealand. Disponible en <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/water/13D.pdf>

En el caso de ablandamiento de aguas, el regenerante es una solución fuerte de cloruro de sodio mientras que en el caso de las resinas aniónicas se utiliza hidróxido de sodio como regenerante.

El uso excesivo de regenerante para una supuesta regeneración completa es poco práctico. Comúnmente las resinas se regeneran solamente cerca de los 2/3 de su capacidad total.

Algunas impurezas tales como sílice sólo pueden ser eliminadas por una resina fuertemente básica. Por ejemplo, el sílice disuelto es un componente importante en la mayoría de las aguas. Normalmente este está presente como un polímero neutral, y se carga negativamente sólo a niveles altos de pH. Esto significa que puede solamente ser removido del agua en un ambiente altamente alcalino usando una resina de base fuerte en la forma de hidroxilo.

La regeneración así mismo conlleva dos importantes implicaciones, una de ellas es el gasto económico en los regenerantes y la otra es la generación de residuos altamente ácidos o alcalinos producto de la regeneración y a esto se suma la acumulación de aguas con concentraciones altas de metales eliminados del agua que se trató. Previo a su disposición final, se debe realizar algún tipo de tratamiento para esas aguas tales como una neutralización u otros.

## **2.8 EL INTERCAMBIO IÓNICO EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS**

Las resinas de intercambio iónico se utilizan más para la purificación de agua que para cualquier otro propósito. En la purificación del agua, el principal objetivo es ablandar el agua o desmineralizarla al mismo tiempo.

- El ablandamiento del agua: la sustitución de iones "duros" como el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Na}^+$  y,
- La desmineralización: la eliminación completa de los minerales disueltos.

Una columna de resinas de intercambio iónico se puede también utilizar para acumular cierto mineral *valioso* del agua y que más tarde puede ser recuperado de la resina. Ejemplos de la eliminación de iones no deseados son:

- La eliminación de metales pesados de residuos de metales comerciales.
- La desmineralización del suero utilizado para la fabricación de productos lácteos especializados.
- La eliminación de sales de zumos de frutas.
- Entre otros.

### **2.8.1 Ablandamiento Del Agua**

En el ablandamiento del agua, una resina catiónica en la forma de sodio se utiliza para eliminar los iones de metal duro (calcio y magnesio) del agua junto con otras trazas de metales *problemáticos* de hierro y manganeso, que a menudo también están presentes.

El agua es ablandada usando resinas que contengan cationes de sodio pero que unen calcio y magnesio más fuerte que los iones de sodio. Conforme el agua pasa a través de la resina, la resina ocupará iones de calcio y magnesio mientras que un ión de sodio es liberado haciendo del agua más *suave*.

Estos iones se reemplazan por una cantidad equivalente de sodio, por lo que el contenido total de sólidos disueltos del agua se mantiene sin cambios al igual que el pH y su contenido aniónico.

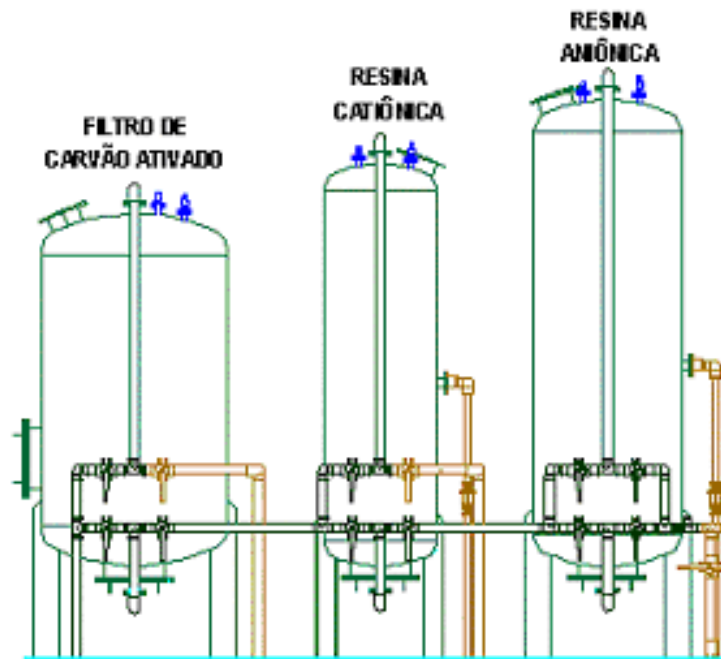
### 2.8.2 Desmineralización del Agua

Prácticamente toda la materia disuelta en el agua naturales están presentes como iones cargados. Para una desionización completa (es decir, desmineralización) se puede lograr mediante el uso de dos lechos de resinas.

El agua se hace pasar primero a través de un lecho de resina de intercambio catiónico que contengan iones en forma de hidrógeno, éstos producidos por el uso de un ácido fuerte regenerante (ya sea ácido clorhídrico o ácido sulfúrico). Durante el proceso de regeneración catiónico, los cationes en el agua son absorbidos por la resina mientras que los iones de hidrógeno son liberados. Por lo tanto el efluente de este primer lecho es una mezcla de ácidos débiles.

Luego, el agua pasa ahora a través de una segunda resina de intercambio aniónico que contiene iones en forma de hidróxido de sodio. Aquí los aniones son intercambiados por iones hidróxido, que a su vez reaccionan con los iones hidrógeno para formar agua.

Juntos, estos dos empaques de resinas reducirán el contenido de sólidos totales del agua a una cantidad aproximada de  $1-2 \frac{mg}{L}$ . Cuando se cuenta con concentraciones elevadas de STD, es habitual hacer pasar el agua que sale de la unidad de intercambio catiónica a través de una torre de desgasificación. Esto eliminará la mayor parte del ácido carbónico que se produce a partir de dióxido de carbono y bicarbonato en el agua de alimentación.



**Nota:** tomado de la página oficial de TECNOSAN, disponible en <http://www.tecnosan.com.br/esp/prod15.php>

Una desgasificación reduce la carga de aniones en el agua ya que sin desgasificar el ácido carbónico, este sería tomado por el lecho aniónico después de su conversión a carbonato.

## 2.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

### 2.9.1 VENTAJAS

Las ventajas de los procesos de intercambio de iones son los costos de funcionamiento muy bajos. Se requiere muy poca energía, y los productos químicos de regeneración son baratos.

- Si los lechos de resina son bien cuidados pueden durar muchos años antes de necesitar reemplazo.
- Las resinas tienen altas capacidades para iones que incluso se encuentren en muy bajas concentraciones.
- Son estables, y fáciles de regenerar.
- Los efectos en la resina por la temperatura son insignificantes.

El proceso de intercambio iónico es útil tanto para grandes o pequeñas instalaciones.

### **2.9.2 DESVENTAJAS**

Hay, sin embargo, una serie de limitaciones que deben tenerse en cuenta durante las etapas de diseño de un intercambiador iónico. A continuación se detallan las más significativas.

#### **2.9.2.1 Incrustaciones de Sulfato de Calcio**

El ácido sulfúrico es el regenerante más barato utilizado para la regeneración de la resina catiónica y se utiliza cuando sea posible. Algunas aguas contienen una alta concentración de calcio y cuando se usa este ácido, éstos reaccionan durante la regeneración y se forma un producto que precipita en forma de sulfato de calcio.

Esto provoca obturaciones en las tuberías con una acumulación progresiva. Es por eso que, bajo tales circunstancias, el ácido clorhídrico debe ser usado en reemplazo del ácido sulfúrico.

### **2.9.2.2 Incrustaciones de Hierro**

Las aguas subterráneas casi siempre contienen hierro soluble en el estado  $Fe^{2+}$ . Pequeñas cantidades se eliminan fácilmente durante los ciclos de ablandadores de sodio, pero se debe tomar en cuenta evitar el contacto con aire antes del tratamiento.

La aireación permite la oxidación del hierro de  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  y consecuentemente provoca la precipitación de hidróxido férrico que obstruye los lechos de resina y evita el intercambio iónico. Las incrustaciones de hierro es la causa más común de insuficiencia en ablandadores.

### **2.9.2.3 Adsorción de la Materia Orgánica**

Uno de los problemas más comunes es la presencia de materia orgánica en el agua. El agua no tratada de lagos y ríos por lo general contiene materia orgánica disuelta proveniente de la vegetación en descomposición que le provee un color amarillo/ marrón.

Estas sustancias pueden llegar a ser adsorbidos irreversiblemente dentro de las resinas aniónicas, reduciendo su capacidad de intercambio y que conduce a una disminución de la calidad del agua tratada.

La eliminación de compuestos orgánicos del agua, previo a su desmineralización se consigue normalmente mediante floculación con alúmina o sal férrica seguida de una filtración el cual remueve el hidróxido metálico y los compuestos orgánicos coprecipitados. Este tratamiento

también elimina cualquier otro sedimento fino el cual representa otra fuente de incrustaciones en la resina.

Ambas incrustaciones tanto orgánicas como de hierro a altas concentraciones se pueden limpiar químicamente, pero la completa eliminación de impurezas es inusual y el rendimiento de resina luego de éste tratamiento disminuye.

#### **2.9.2.4 Contaminación Orgánica de la Resina**

Las resinas en sí pueden ser una fuente de contaminación orgánica no ionizada. Las resinas comerciales nuevas a menudo contienen remanentes orgánicos que quedan después de su manufactura, mientras que las resinas desgastadas arrojan fragmentos orgánicos de su misma estructura porque que el polímero se abre muy lentamente.

Tal contaminación puede ser disgregada para muchos usos, pero si se va a realizar algún tipo de tratamiento, es necesario que el agua desmineralizada pase pasar a través de una membrana de ultrafiltración.

#### **2.9.2.5 Contaminación Bacterial**

Los lechos de resina no actúan como filtros para la eliminación de bacterias u otros microorganismos. Más bien, las resinas tienden a favorecer la contaminación en el agua por bacterias ya que aportan con trazas de materia orgánica que constituyen una fuente de nutrientes para el continuo crecimiento bacterial.

Cuando se requiere un agua estéril, esto se puede obtener mediante el tratamiento del agua desmineralizada por medios no químicos tales como el calor, la irradiación ultravioleta o filtraciones muy finas.

Las resinas pueden ser descontaminadas con desinfectantes como el formaldehído, pero el uso fuentes térmicas u desinfectantes oxidantes tales como el cloro no deben ser utilizados ya que generan daños a la resina.

#### **2.9.2.6 Contaminación por Cloro**

Como se mencionó anteriormente, el cloro daña la resina. Esto significa que incluso el agua potable de la ciudad es una alimentación inadecuada para un desmineralizador debido a las trazas de cloro que contiene. Para ello, es habitual un tratamiento previo a estos tipos de aguas, haciéndolas pasar a través de carbón activado ya que elimina el cloro de manera muy eficiente.

### **2.10 IMPLICACIONES AMBIENTALES**

El agua residual del desmineralizador contiene todos los minerales extraídos del agua además de las sales provenientes de los regenerantes. Estos son concentrados a un volumen equivalente al 1-5% de los caudales de agua tratada. La disposición final no suele ser un problema, ya que esta carga en los sistemas de tratamiento de residuos es baja en comparación con la de muchos otros procesos industriales, aun así es algo que se debe tener consideración en el diseño de todo sistema de tratamiento de aguas.

## 2.10.1 NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES

Según la teoría de Arrhenius, se define la neutralización como una reacción química en el que un ácido y una base reaccionan para dar una sal y agua.

Todas las descargas industriales son del grado ácido o alcalino en su mayoría incompatibles con las normas ambientales aplicables. El objetivo de la neutralización de efluentes es en parte disminuir o eliminar cierto grado de toxicidad del agua que facilite su vertido al alcantarillado público o a algún proceso posterior.

Se debe tener en cuenta los siguientes aspectos durante el proceso de neutralización:

- La variación de pH no necesariamente sigue una linealidad con el flujo de neutralizante agregado.
- En ciertos efluentes industriales, la variación de pH puede variar hasta en 1 unidad por minuto.
- Para lograr la neutralización, suele pasar que se debe añadir solamente cantidades relativamente pequeñas a un flujo enorme de efluente para lograr el pH requerido.

La neutralización debe realizarse en tanques resistentes a la corrosión y con una constante agitación para homogenizar la solución y que ocurra la reacción de forma homogénea. El tiempo de residencia en el reactor varía entre 5-15 minutos para garantizar la efectividad de la reacción de neutralización. En el caso de observar productos precipitados e insolubles en el tanque, se deberá realizar algún proceso físico de filtración-sedimentación.

Se pueden utilizar varios tipos de neutralizantes:

#### **2.10.1.1 Neutralizar aguas ácidas con carbonato cálcico**

Éstos son la caliza, dolomitas, etc. los cuales se encuentra en la naturaleza como piedra y debe su nombre al poseer grandes cantidades de  $\text{CaCO}_3$ , este al disolverse en agua produce una solución altamente alcalina. Se lo utiliza en el proceso de neutralización como un lecho filtrante del mismo. En este caso, se debe controlar la concentración de ácido sulfúrico en el agua, y en el caso de tenerla no debe superar 0.6% pues de lo contrario se formaría una capa excesiva de sulfato de calcio es cual es insoluble y precipita e impide el contacto físico entre el agua a tratar y el agente neutralizante. Unos de los productos de la reacción de neutralización es el  $\text{CO}_2$ , el cual debe ser también controlado pues su concentración excesiva produce un efecto tampón.

#### **2.10.1.2 Neutralizar aguas ácidas con cal**

La cal es el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  también llamada “cal viva”, utilizada comúnmente por su bajo costo. Otros tipos de cal son el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o el  $\text{NH}_4\text{OH}$ . El grado de neutralización depende de la cal utilizada. Presenta ciertas desventajas tales como velocidades bajas de reacción, baja solubilidad y formación de precipitados (sulfato de calcio).

#### **2.10.1.3 Neutralizar aguas ácidas con sosa cáustica**

La sosa cáustica es el  $\text{NaOH}$  considerado como el neutralizante más efectivo, el cual es uno de las sustancias mayormente usadas debido a sus altas velocidades de reacción, a pesar de sus costos elevados. Se los

puede utilizar en altas concentraciones y no requiere de grandes equipos de dosificación.

#### **2.10.1.4 Neutralizar aguas básicas con ácido sulfúrico**

Cuando el efluente es básico se puede neutralizar con cualquier ácido fuerte, el más utilizado es el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por sus bajos costos en comparación con otros ácidos, sin embargo en las aguas neutralizadas se le deberá controlar la concentración de sulfatos para que cumpla con los reglamentos ambientales. Se deberá tener las debidas precauciones en los tanques reactores debido a su grado corrosivo a bajas concentraciones.

#### **2.10.1.5 Neutralizar aguas básicas con ácido clorhídrico**

Es un reactivo de elevados costos y tóxico a cualquier concentración a la que este se encuentre. Se deberá tener las precauciones en cuanto a la emanación de gases tóxicos.

#### **2.10.1.6 Neutralizar aguas básicas con gases de combustión**

Se utilizan para neutralizar aguas alcalinas, debidos a que los gases de combustión contienen altos grados de concentración de  $\text{CO}_2$  de hasta el 15%, y este en contacto con el agua produce  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (ácido carbónico) que acidifica la solución reduciendo el pH. Este mecanismo consiste en hacer burbujear éstos gases en el agua, o realizando un contacto entre éstos mediante un lecho empacado (absorción).

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del desmineralizador fue necesario tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Determinar la disponibilidad, calidad y volumen de agua de los suministros a tratar.
- Seleccionar el tipo de pre-tratamiento al suministro de agua, en el caso de ser necesario.
- Decidir el mecanismo para la desmineralización y el tipo de resina.
- Decidir el tiempo de proceso, tipo de regenerante y disponibilidad de almacenamiento de las aguas efluentes.
- Determinar en función de las características de las resinas escogidas, velocidades y caudal del agua, volumen de la resina, altura de la resina, y demás parámetros importantes en el funcionamiento del equipo.

Se empleará un lecho fijo de partículas granulares. El fluido que se va a tratar se hace descender a través del lecho empacado a una tasa de flujo constante. En el proceso de lecho fijo es importantes la resistencia a la transferencia de masa, y el proceso se lleva a cabo en estado no estacionario. La eficiencia del proceso depende de la dinámica global del sistema, y no sólo de las consideraciones de equilibrio.

A continuación se detalla los cálculos y consideraciones tomadas para el diseño.

### 3.1 CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

#### 3.1.1 VOLUMEN DE RESINA CATIÓNICA FUERTE ( $V_{CF}$ )

$$V_{CF} = \frac{(DT * p)}{CR} \quad (\text{Ecuación 4})$$

**Nota:** Fórmula consultada del manual FMC-FILSAN

Dónde:

$V_{CF}$  = volumen de resina catiónica fuerte (L).

DT = dureza total del agua a tratar (ppm).

p = producción de agua tratada a obtener (L).

CR = capacidad de la resina (gr/ L).

Entonces se tiene que,

$$V_{CF} = \frac{300 \text{ ppm} * 1100 \text{ L}}{1703.366472 \frac{\text{Gr}}{\text{L}} * 3.78 \frac{\text{L}}{\text{Gal}} * 17.1 \frac{\text{ppm} * \text{Gal}}{\text{gr}}}$$

$$V_{CF} = 3.597 \text{ L}$$

$$V_{CF} \approx 4 \text{ L}$$

### 3.1.2 ALTURA DE RESINA CATIÓNICA

Volumen del cilindro:

$$V = \pi * r^2 * h \quad (\text{Ecuación 5})$$

Despejando la altura,

$$h = \frac{V_{CF}}{\pi * r^2}$$

**Nota:** Fórmula consultada del manual FMC-FILSAN

Dónde:

h = altura de la resina catiónica (cm).

$V_{CF}$  = volumen de resina catiónica (cm<sup>3</sup>).

r = radio del lecho (cm).

V = volumen de un cilindro (cm<sup>3</sup>)

Entonces se tiene que,

$$h = \frac{3596.658 \text{ cm}^3}{\pi * 6.5^2 \text{ cm}^2}$$

$$h = 27.097 \text{ cm}$$

$$h \approx 28 \text{ cm}$$

### 3.1.3 ALTURA DE LA COLUMNA CATIÓNICA

$$H = h + (\%E * h) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Dónde:

H = altura de la columna (cm).

$h$  = altura de la resina (cm).

%E = porcentaje de expansión

Entonces se tiene que,

$$H = 27.1cm + (0.4 * 27.1cm) + (10cm_{grava})$$

$$H = 48cm$$

### 3.1.4 VOLUMEN DE COLUMNA CATIONICA

$$V = \pi * 6.5^2 cm^2 * 48cm$$

Fórmula obtenida de la ecuación 5. Entonces se tiene que,

$$V = 6362.644534cm^3$$

$$V = 6.36 L$$

$$V \approx 7 L$$

## 3.2 CÁLCULOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LA COLUMNA DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

### 3.2.1 VOLÚMEN DE RESINA ANIÓNICA FUERTE ( $V_{AF}$ )

$$V_{AF} = \frac{(AT * p)}{CR} \quad (\text{Ecuación 7})$$

**Nota:** Fórmula consultada del manual FMC-FILSAN

Dónde:

$V_{AF}$  = volumen de resina aniónica fuerte (L).

AT = aniones totales:  $Cl^-$ , sílice,  $CO_2$ , sulfatos,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{-2}$ ,  $Ca_2CO_3$ ,  $OH^-$ , I- (ppm).

$p$  = producción de agua a obtener (L).

CR = capacidad de la resina (gr/ L).

Entonces se tiene que,

$$V_{AF} = \frac{300 \text{ ppm} * 1100 \text{ L}}{1006.534733 \frac{\text{Gr}}{\text{L}} * 3.78 \frac{\text{L}}{\text{Gal}} * 17.1 \frac{\text{ppm} * \text{Gal}}{\text{gr}}}$$

$$V_{AF} = 6.087 \text{ L}$$

$$V_{AF} \approx 6 \text{ L}$$

### 3.2.2 ALTURA DE RESINA ANIÓNICA

Según la ecuación 5 se tiene que,

$$h = \frac{8521.31354 \text{ cm}^3}{\pi * 6.5^2 \text{ cm}^2}$$

$$h = 46 \text{ cm}$$

### 3.2.3 ALTURA DE LA COLUMNA ANIÓNICA

Haciendo uso de la ecuación 6, se tiene que:

$$H = 46 \text{ cm} + (0.4 * 46 \text{ cm}) + (10 \text{ cm}_{\text{grava}})$$

$$H = 74 \text{ cm}$$

### 3.2.4 VOLÚMEN DE COLUMNA ANIÓNICA

$$V = \pi * 6.5^2 \text{ cm}^2 * 74 \text{ cm}$$

$$V = 6362.644534 \text{ cm}^3$$

$$V = 9.85 \text{ ltrs}$$

$$V \approx 10 \text{ L}$$

**Tabla IV.** Dimensionamiento teórico de la Unidad de Intercambio Iónico.

	Columna Catiónica	Columna Aniónica
Altura de lecho $h$	28 cm	46 cm
Altura de columna $H$	48 cm	74 cm
Volumen de resina	0.14 ft <sup>3</sup>	0.21 ft <sup>3</sup>
Volumen de columna	7 L	10 L

**Tabla V.** Dimensionamiento real de la Unidad de Intercambio Iónico.

	Columna Catiónica	Columna Aniónica
Altura de lecho $h$	30 cm	51 cm
Altura de columna $H$	88 cm	88 cm
Volumen de resina	0.16 ft <sup>3</sup>	0.25 ft <sup>3</sup>
Volumen de columna	11.68 L	11.68 L

### 3.3 CÁLCULOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FLUJOS Y TIEMPOS PARA LA UNIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO

Se escogió un sistema CSRT ya que se trabajará con flujo continuo. Según información proporcionado por el proveedor de las resinas se tiene los siguientes valores (ver anexos IA-IIC).

#### 3.3.1 CÁLCULOS DE CAUDAL DE PROCESO

Haciendo uso de la ecuación de continuidad (mecánica de fluidos):

$$Q_p = \vec{v} * A$$

(Ecuacion 8)

Dónde:

$Q_p$ = caudal del proceso (L/min)

$\vec{v}$ = velocidad del proceso (m/h) \*\*

A= área del cilindro ( $m^2$ )

Para la velocidad lineal de proceso se tomó un valor de 20 m/h, valor recomendado por el proveedor de las resinas utilizadas (ver anexo I-A).

Entonces se tiene que,

$$Q_p = 20 \text{ m/h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_p = 0.27 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_p = 4.5 \text{ L/min}$$

### 3.3.2 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE REGENERACIONES

El tiempo de regeneración para ambas resinas se lo obtuvo experimentalmente, obteniendo un resultado de 30 minutos.

### 3.3.3 CÁLCULOS DE CONSUMO DE AGUA DE LAVADOS

Teniendo en cuenta los valores recomendados por el proveedor (ver anexos IA-IIC), se escogió el valor de 20 m/h, entonces se tiene que:

$$V_{CC} = 2BV_{CF}$$

$$V_{CA} = 10BV_{AF}$$

$$V_{CC} = 2(4.5 L)$$

$$V_{CA} = 10(7 L)$$

$$V_{CC} = 9 L$$

$$V_{CA} = 70 L$$

Dónde:

$V_{CC}$  = volumen de consumo de agua de la columna catiónica

$V_{CA}$  = volumen de consumo de agua de la columna aniónica

$BV_{CF}$  = volumen de lecho de la resina catiónica

$BV_{AF}$  = volumen de lecho de la resina aniónica

### 3.3.4 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE LAVADO LENTO PARA LA RESINA CATIÓNIC

Haciendo uso de la ecuación 8:

$$Q_{LLc} = \vec{v} * A$$

Dónde:

$Q_{LLc}$  = caudal del Lavado Lento Catiónica (L/min)

$\vec{v}$  = velocidad del Lavado Lento (m/h)

$A$  = área del cilindro (m<sup>2</sup>)

Entonces se tiene que,

$$Q_{LLc} = 3 \text{ m}^3/\text{h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_{LLc} = 0.04 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{LLc} = 0.7 \text{ L/min}$$

En cuanto al tiempo de Lavado Lento, se lo obtiene de la ecuación:

$$Q_{LLc} = \frac{V}{t} \quad (\text{Ecuacion 9})$$

$$t_{LLc} = \frac{V}{Q_{LLc}}$$

Dónde:

$t_{LLc}$  = tiempo de Lavado Lento (min)

$Q_{LLc}$  = caudal del Lavado Lento Catiónica (L/min)

V = volumen de agua de Consumo (2BV) (L)

Entonces se tiene que,

$$t_{LLc} = \frac{9 \text{ L}}{0.7 \text{ L/min}}$$

$$t_{LLc} = 13.56 \text{ min}$$

$$t_{LLc} \cong 14 \text{ min}$$

### 3.3.5 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE LAVADO RÁPIDO PARA LA RESINA CATIONICA

Haciendo uso de la ecuación 8:

$$Q_{LRC} = \vec{v} * A$$

Dónde:

$Q_{LRC}$  = Caudal del Lavado Rápido Catiónica

$\vec{v}$  = velocidad del Lavado Rápido (m/h)

A = área del cilindro (m<sup>2</sup>)

Entonces se tiene que,

$$Q_{LRC} = 5 \text{ m/h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_{LRC} = 0.07 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{LRC} = 1.1 \text{ L/min}$$

En cuanto al tiempo de Lavado Lento, se lo obtiene de la ecuación 9.

$$t_{RLC} = \frac{V}{Q_{LLC}}$$

Dónde:

$t_{LRC}$  = tiempo de Lavado Rápido (min)

$Q_{LRC}$  = caudal del Lavado Rápido Catiónica (L/min)

V = volumen de agua de Consumo (2BV) (L)

Entonces se tiene que,

$$t_{LRC} = \frac{9 \text{ L}}{1.1 \text{ L/min}}$$

$$t_{LRC} = 8.14 \text{ min}$$

$$t_{LRC} \cong 9 \text{ min}$$

### 3.3.6 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE RETROLAVADO PARA LA RESINA CATIONICA

Haciendo uso de la ecuación 8:

$$Q_{LRC} = \vec{v} * A$$

Dónde:

$Q_{LRC}$ = caudal de Retrolavado Cationica (L/min)

$\vec{v}$ = velocidad del Retrolavado (m/h)

A= área del cilindro (m<sup>2</sup>)

Entonces se tiene que,

$$Q_{LRC} = Q_{LRC} = 15 \text{ m/h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_{LRC} = 0.20 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{LRC} = 3.3 \text{ L/min}$$

En cuanto al tiempo de Retrolavado, se lo obtiene de la ecuación 9.

$$t_{RLC} = \frac{V}{Q_{LLC}}$$

Dónde:

$t_{RLC}$ = tiempo de Retrolavado (min)

$Q_{LRC}$ = caudal de Retrolavado Cationica (L/min)

V=volumen de agua de Consumo (2 BV) (L)

Entonces se tiene que,

76

$$t_{LLc} = \frac{9 L}{3.3 L/min}$$

$$t_{LLc} = 2.71 \text{ min}$$

$$t_{LLc} \cong 3 \text{ min}$$

### 3.3.7 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE LAVADO LENTO PARA LA RESINA ANIÓNICA

Haciendo uso de la ecuación 8:

$$Q_{LLa} = \vec{v} * A$$

Dónde:

$Q_{LLa}$  = Caudal del Lavado Lento Aniónica

$\vec{v}$  = velocidad del Lavado Lento (m/h)

A = área del cilindro ( $m^2$ )

Entonces se tiene que,

$$Q_{LLa} = 3 \text{ m/h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_{LLa} = 0.04 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{LLa} = 0.7 \text{ L/min}$$

En cuanto al tiempo de Lavado Lento, se lo obtiene de la ecuación 9.

$$t_{LLa} = \frac{V}{Q_{LLa}}$$

Dónde:

$t_{LLa}$  = tiempo de Lavado Lento (min)

$Q_{LLa}$  = caudal del Lavado Lento Aniónica (L/min)

V = volumen de agua de Consumo (10 BV) (L)

Entonces se tiene que,

$$t_{LLa} = \frac{70 \text{ L}}{0.7 \text{ L/min}}$$

$$t_{LLa} \cong 100 \text{ min}$$

### 3.3.8 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE LAVADO RÁPIDO PARA LA RESINA ANIÓNICA

Haciendo uso de la ecuación 8:

$$Q_{LRa} = \vec{v} * A$$

Dónde:

$Q_{LRa}$  = Caudal del Lavado Rápido Aniónica

$\vec{v}$  = velocidad del Lavado Rápido (m/h)

A = área del cilindro ( $m^2$ )

Entonces se tiene que,

$$Q_{LRa} = 5 \text{ m/h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_{LRa} = 0.07 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{LRa} = 1.1 \text{ L/min}$$

En cuanto al tiempo de Lavado Lento, se lo obtiene de la ecuación 9.

78

$$t_{RLa} = \frac{V}{Q_{LLa}}$$

Dónde:

$t_{LRc}$  = tiempo de Lavado Rápido (min)

$Q_{LRc}$  = caudal del Lavado Rápido Aniónica (L/min)

V = volumen de agua de Consumo (10 BV) (L)

Entonces se tiene que,

$$t_{LRa} = \frac{70 \text{ L}}{1.1 \text{ L/min}}$$

$$t_{LRa} = 63.64 \text{ min}$$

$$t_{LRa} \cong 64 \text{ min}$$

### 3.3.9 CÁLCULOS DE CAUDAL Y TIEMPO DE RETROLAVADO PARA LA RESINA ANIÓNICA

Haciendo uso de la ecuación 8:

$$Q_{LRc} = \vec{v} * A$$

Dónde:

$Q_{LRc}$  = caudal de Retrolavado Aniónica (L/min)

$\vec{v}$  = velocidad del Retrolavado (m/h)

A = área del cilindro (m<sup>2</sup>)

Entonces se tiene que,

79

$$Q_{LRa} = Q_{LRa} = 7 \text{ m/h} * \pi * 0.065^2 \text{ m}^2$$

$$Q_{LRa} = 0.093 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{LRa} = 1.6 \text{ L/min}$$

En cuanto al tiempo de Retrolavado, se lo obtiene de la ecuación 9.

$$t_{RLa} = \frac{V}{Q_{LLC}}$$

Dónde:

$t_{LRa}$ = tiempo de Retrolavado (min)

$Q_{LRa}$ = caudal de Retrolavado Aniónica (L/min)

V=volumen de agua de Consumo (10 BV) (L)

Entonces se tiene que,

$$t_{LRa} = \frac{70 \text{ L}}{1.6 \text{ L/min}}$$

$$t_{LRa} = 43.75 \text{ min}$$

$$t_{LRa} = 44 \text{ min}$$

**Tabla VI.** Condiciones de Operación para la Unidad de Intercambio Iónico.

	<b>Columna Catiónica</b>	<b>Columna Aniónica</b>
Caudal de lavado lento	0.7 L/min	0.7 L/min
Caudal de lavado rápido	1.1 L/min	1.1 L/min
Caudal de retrolavado	3.3 L/min	1.6 L/min
Caudal de operación	4.5 L/min	
Tiempo de lavado lento	14 min	100 min
Tiempo de lavado rápido	9 min	64 min
Tiempo de retrolavado	3 min	44 min
Tiempo de regeneración	30 min	
Tiempo de operación	<i>n</i> min hasta agotamiento	

### **3.4 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS**

Al diseñar y construir una Unidad de Intercambio Iónico para el tratamiento de diferentes tipos de aguas, se debe considerar los gastos en materiales y costos de operación para luego poder estimar la inversión del proyecto. La selección del agua a tratar, sus características iniciales, así como las dimensiones del equipo a construir limitan las cantidades y tipos de materiales a requerir para el objetivo planteado. (Ver anexo III-A).

#### **3.4.1 SELECCIÓN DE RESINAS**

Las resinas que se utilizaron, para un eficiente intercambio iónico fueron resinas aniónica de base fuerte y resina catiónica de ácido fuerte: LAWATIT MONO PLUS; S-108 y M-500 respectivamente cuyo proveedor es *LANXESS Deutschland GmbH, Industrial & Environmental Affairs* de Alemania.

**Tabla VII.** Algunas Propiedades Fisicoquímicas y Especificaciones Técnicas y de Operación de la Resina Catiónica LEWATIT MonoPlus S 108.

Estado físico	Sólido
Color	Negro- café
pH	6- 9.5 en solución al 10% m/m
Densidad	1.3 kg/L a 20 °C
Densidad aparente	840 kg/m <sup>3</sup>
Solubilidad	En agua fría
Inflamabilidad	>500 °C
Forma iónica	Na <sup>+</sup>
Grupo funcional	Ácido sulfónico
Tamaño medio de partícula	0.62 mm
Expansión de lecho	Aprox. 4% volumen
Retención de agua	41-46 % m/m
Capacidad total	Mínimo 2.2 eq/L
Velocidad lineal de carga	Máximo 60 m/h
Velocidad de retrolavado	Aprox. 15 m/h a 20 °C

Para mayor información de las resinas ver anexos I-A, I-B, I-C.

**Tabla VIII.** Algunas Propiedades Fisicoquímicas y algunas Especificaciones Técnicas y de Operación de la Resina Aniónica LEWATIT MonoPlus M 500.

Estado físico	<b>Sólido</b>
Color	Amarillo translúcido
pH	<9 en solución al 10% m/m
Densidad	1.08 kg/L a 20 °C
Densidad aparente	690 kg/m <sup>3</sup>
Solubilidad	En agua fría
Inflamabilidad	>250 °C
Forma iónica	Cl <sup>-</sup>
Grupo funcional	Amonio cuartenario, tipo I
Tamaño medio de partícula	0.62 mm
Expansión de lecho	Aprox. 11% volumen
Retención de agua	48-55 % m/m
Capacidad total	Mínimo 1.3 eq/L
Velocidad lineal de carga	Máximo 60 m/h a 20 °C
Velocidad de retrolavado	Aprox. 7 m/h a 20 °C

Para mayor información de las resinas ver anexos II-A, II-B, II-C.

### 3.4.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

El objetivo de este proyecto fue construir un equipo didáctico, es por eso que se seleccionó como material de construcción para las columnas de intercambio material de acrílico transparente, ya que así se puede visualizar el proceso de intercambio durante la desmineralización del agua. El acrílico es una material resistente a ácidos y sustancias alcalinas, además de que resiste caídas de presión, variaciones de pH y altas temperaturas (ver Tabla XXI).

Bajo el mismo criterio, se utilizó tuberías y accesorios de PVC para evitar fugas o algún tipo de interferencias por los materiales utilizados durante el proceso de desmineralización que influya en la calidad del agua deseada (ver anexo IV-A).

### 3.4.3 SELECCIÓN DE REGENERANTES

Los fabricantes de las resinas catiónica y aniónica: LAWATIT MONO PLUS; S-108 y M-500 usadas en el presente proyecto, recomiendan lo siguiente:

**Tabla IX.** Características de los Regenerantes recomendados por el Proveedor y utilizados en este Proyecto.

	<b>Resina Catiónica</b>	<b>Resina Aniónica</b>
<b>Regenerante</b>	HCl (acuoso)	NaOH (escamas)
<b>Densidad</b>	1.18 Kg/L	2.13 Kg/L
<b>Concentración (pureza)</b>	37%	98%
<b>Disolución de regenerante</b>	4.5 L (4% m/m)	7 L (3% m/m)

El ácido clorhídrico a pesar de ser una sustancia regulada gubernamentalmente y además de ser costosa, se lo escogió como regenerante porque al producirse las reacciones de intercambio, no produce subproductos que interfieran en el proceso.

**Tabla X.** Algunas Especificaciones de Operación utilizando HCl como Regenerante para la Resina Catiónica LEWATIT MonoPlus S 108.

Nivel de regeneración	50 g/L
Concentración	4-6 % m/m
Velocidad lineal de regeneración	Aprox. 5 m/h
Velocidad lineal de lavado (lento y rápido)	Aprox. 5 m/h
Requerimiento de agua de lavado (lento y rápido)	2 BV

Para mayor información de las resinas ver anexos I-C.

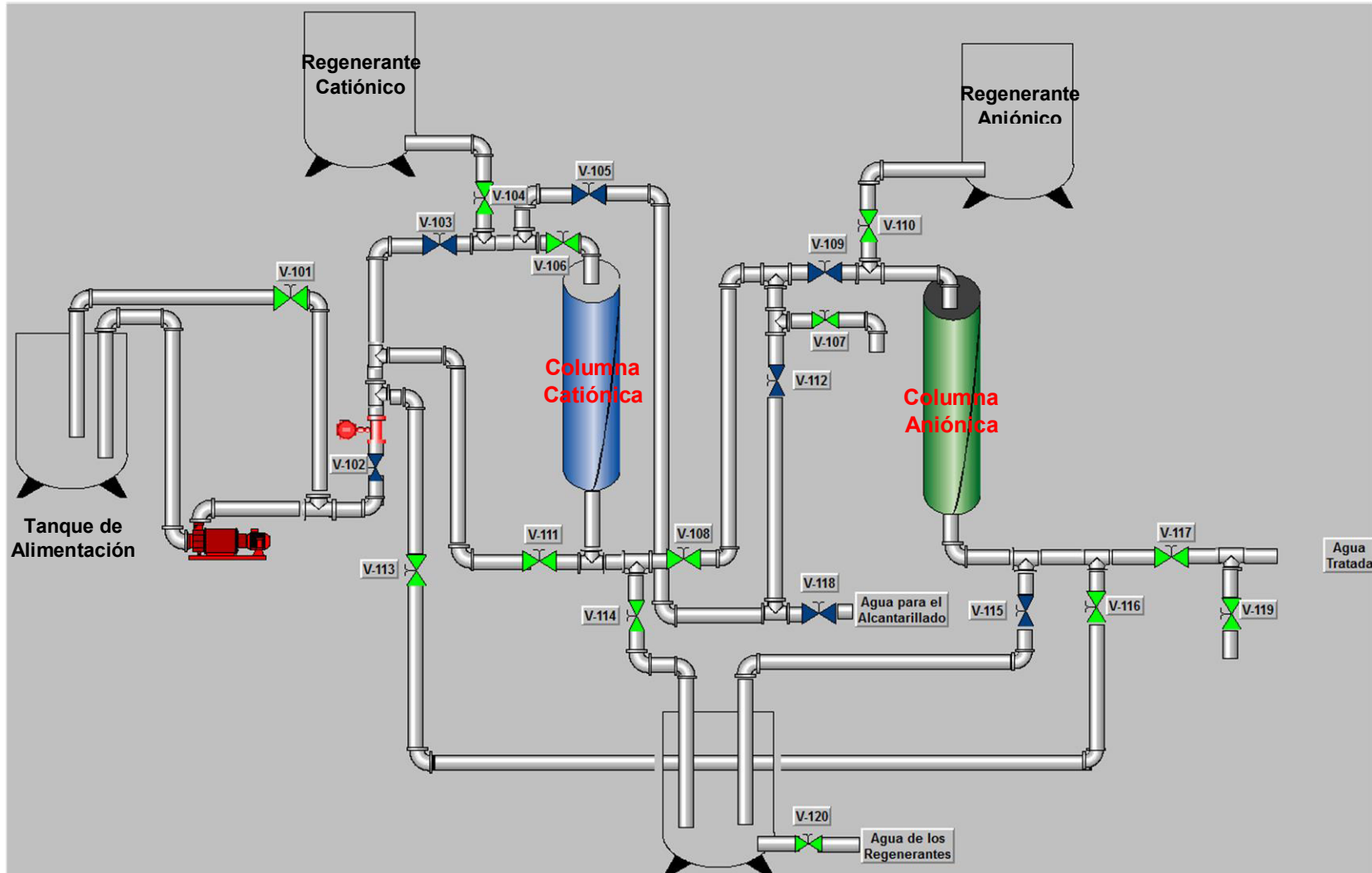
**Tabla XI.** Algunas Especificaciones de Operación utilizando NaOH como Regenerante para la Resina Aniónica LEWATIT MonoPlus M 500.

Nivel de regeneración	50 g/L
Concentración	2-4 % m/m
Velocidad lineal de regeneración	Aprox. 5 m/h
Velocidad lineal de lavado (lento y rápido)	Aprox. 5 m/h
Requerimiento de agua de lavado (lento y rápido)	10 BV

Para mayor información de las resinas ver anexos II-C.

Teniendo ya algunos valores de dimensionamiento y sabiendo el flujo de proceso de desmineralización para aguas, el diseño es el siguiente:

**Figura 12.** Diagrama de Proceso de Desmineralización del Agua en la Unidad de Intercambio Iónico, desarrollado en el programa LookOut.



## 3.5 CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO

85

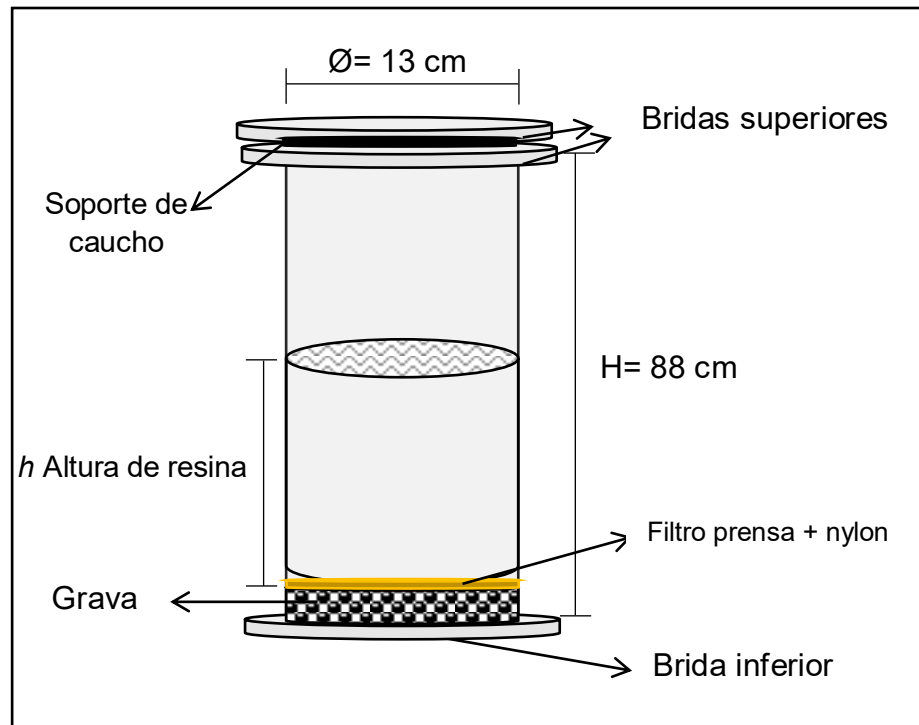
### 3.5.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS COLUMNAS

Seleccionado los materiales, se procede al ensamblaje de los mismos siguiendo el diseño realizado según la figura 12. La construcción se lo realizó en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FCNM-ESPOL en un lapso de 60 días.

- Se tiene dos columnas cilíndricas, una columna de intercambio catiónico y otra columna de intercambio aniónico. Ambas columnas son del mismo material y de las mismas dimensiones.

La columna tiene una *costura* de unión pegada con silicona de ambos lados interna y externa, además de que se compone de 2 bridas en ambos extremos superior e inferior. La brida inferior de la columna es estática mientras que la brida superior es removible para facilitar el ingreso de material a la columna y/o su limpieza. A continuación se detalla las características y dimensionamiento de las columnas.

**Figura 13.** Representación Gráfica de las Columnas de Acrílico.



- Las bridas de las columnas tienen agujeros para que éstos puedan ser asegurados con tornillos. Las columnas fueron empernadas a un pequeño soporte en su base y así asegurar su estabilidad mientras el agua circula en las columnas.
- Para el empaquetamiento de cada columna se tomó en cuenta el diminuto tamaño de la resina, es por eso que en ambas tuberías tanto de entrada como de salida se colocó como filtro tela de nylon para evitar salida de resina a las tuberías. Luego se colocó una primera capa de grava (*pedra chispa*) para crear una especie de medio retenedor de resinas. Luego de la grava se colocó un filtro prensa envuelto de tela de nylon para asegurar nuevamente escape de resina. Finalmente se colocó la altura calculada de

resina, tomando una altura de lecho libre considerando el porcentaje de expansión para cada resina.

- Las tuberías y accesorios de PVC (tees, codos, reductores, nudos, adaptadores y neplos) utilizadas son de un diámetro nominal de  $\frac{3}{4}$ " y se ensamblaron haciendo uso de cinta de teflón industrial blanco para asegurar el enroscado entre piezas, y así mismo se untó pasta *permatex* para que las piezas se peguen permanentemente evitando fugas en la estructura.

### **3.5.2 MONTAJE DE LA UNIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO**

Habiendo ya calculado los flujos y volúmenes de agua requeridos, se acopló 4 tanques de diferentes capacidades al equipo a parte de las columnas anteriormente detalladas.

- Debido al bajo flujo que se tomó para el proceso, se escogió una bomba de  $\frac{1}{2}$  HP, el cual tiene un amplio caudal de operación en comparación al utilizado para el proceso de desmineralización. Por tal motivo se realizó una recirculación de alimentación para dividir flujos de entrada y evitar el sobrecalentamiento y posterior deterioro de la bomba.

- Todo un sistema de válvulas fue necesario para lograr los correctos flujos. Las válvulas utilizadas fueron de PVC para flujos de agua y válvulas de metal fueron utilizadas para los flujos ácidos y alcalinos producto de las aguas de regeneración y de lavado de las resinas.

Las válvulas están dispuestas para hacer que el flujo de agua tratada vaya directamente al alcantarillado o se lo almacene en el tanque de efluentes.

- El equipo se colocó cerca de una fuente de agua de la red pública para facilitar los llenados de tanques y requerimientos de agua necesarios para el proceso. De igual manera, se tiene cerca una fuente de energía de 110V suficiente para el funcionamiento de la bomba del equipo.
- Cuando las resinas se encuentran ya agotadas, el proceso de regeneración debe efectuarse y las aguas obtenidas deben recolectarse para luego darles un pre-tratamiento antes de su disposición final.

**Figura 14.** Unidad de Intercambio Iónico construido, listo para ser puesto en marcha.



# CAPÍTULO IV

## MANUAL DE OPERACIÓN


### 4.1 IDENTIFICACIÓN




**Tabla XII.** Identificación de los principales componentes de la Unidad de Intercambio Iónico.




	IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>VÁLVULAS</b>	V-101	Válvula globo de recirculación de agua de alimentación
	V-102	Válvula globo de entrada de agua de alimentación
	V-103	Válvula globo de entrada de agua de la columna catiónica
	V-104	Válvula globo de entrada de regenerante de resina catiónica
	V-105	Válvula globo de salida de agua de retrlavado de la resina catiónica
	V-106	Válvula globo de entrada de agua de la columna catiónica
	V-107	Válvula globo de toma muestra de la columna catiónica
	V-108	Válvula globo de entrada de agua de la columna aniónica
	V-109	Válvula globo de entrada de agua de la columna aniónica
	V-110	Válvula globo de entrada de regenerante de resina aniónica
	V-111	Válvula globo de circulación de agua


		de retrolavado para columna catiónica
	V-112	Válvula globo de salida de agua de la resina catiónica
	V-113	Válvula globo de circulación de agua de retrolavado para columna aniónica
	V-114	Válvula globo de salida de agua de la columna catiónica
	V-115	Válvula globo de salida de agua de la columna aniónica
	V-116	Válvula globo de circulación de agua de retrolavado para columna aniónica
	V-117	Válvula globo de salida de agua tratada
	V-118	Válvula globo de salida de agua de retrlavado de la resina catiónica
	V-119	Válvula globo de toma muestra de agua tratada
	V-120	Válvula globo de salida de efluentes al alcantarillado
<b>TANQUES DE ALMACENAMIENTO</b>	TK-101	Tanque de agua de alimentación
	TK-102	Tanque de almacenamiento de efluentes
	TK-103	Tanque de almacenamiento de regenerante de la resina catiónica
	TK-104	Tanque de almacenamiento de regenerante de la resina aniónica
<b>FLUJÓ-METROS</b>	FIC-120	Flujómetro de entrada de agua de alimentación (control de flujo de nivel)
<b>BOMBAS</b>	P-101	Bomba principal de agua



**Tabla XIII.** Identificación de los principales Riesgos Laborales y de Seguridad involucrados en el manejo de la Unidad de Intercambio Iónico.

TIPO	IDENTIFICACIÓN - DESCRIPCIÓN	
<b>MECÁNICOS</b>	Falta de EPPs	Sin los materiales necesarios para la puesta en marcha del equipo, así como los elementos de protección, no se puede hacer uso del equipo.
	Falta de herramientas de trabajo	 <p>A rectangular blue sign with white text. At the top, it says 'USO OBLIGATORIO DE' and at the bottom, 'EQUIPO DE PROTECCION'. In the center, there is a white circle containing icons for a hard hat, safety glasses, gloves, and safety shoes.</p>
	Partes móviles salientes	<p>En el caso de las tuberías y pernos colocados en las columnas de acrílico los cuales con un aumento de presión del agua, pueden llegar a desprenderse a pesar de que están totalmente sellados.</p>  <p>A triangular warning sign with a yellow background and black border. At the top, it says 'PRECAUCIÓN' in a yellow oval. The center features a black silhouette of a hand being caught between two interlocking gears. At the bottom, it says 'PARTES MÓVILES' in bold black letters.</p>
	Falta de personal operativo	En el caso de mala operación o falla en el equipo solo el docente técnico podrá tomar decisiones en cuanto a acciones preventivas/correctivas.

<b>QUÍMICOS</b>	<p>Contacto de sustancias con la piel/ absorción</p>	<p>La mala manipulación, sin uso de EPPs correspondientes conlleva a ardor, irritación y picazón en la piel.</p> 
	<p>Contacto de sustancias con los ojos</p>	<p>La mala manipulación, sin uso de EPPs correspondientes conlleva a ardor, lagrimeo y pérdida de la visión momentánea.</p> 
	<p>Inhalación de gases</p>	<p>La mala manipulación, sin uso de EPPs correspondientes conlleva a tos continua, respiración dificultosa y muchas veces desmayo.</p> 

	<p>Ingestión de sustancias</p>	<p>La mala manipulación, sin uso de EPPs correspondientes conlleva a intoxicación, vómito, náuseas y ardor estomacal. El producto obtenido del equipo, no es potable.</p> 
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">LOCATIVOS</p>	<p>Escalera inestable</p>	<p>Para el funcionamiento de este equipo es necesaria la utilización de una escalera mayor a 2m, por lo que hay riesgo de caída o resbalón.</p> 
	<p>Deterioro de estructuras metálicas</p>	<p>En el caso de ruptura o deterioro de las estructuras metálicas o bases de madera del equipo, hay peligro de caída de materiales.</p> 

<b>BIOLÓGICOS</b>	<p>Proliferación de enfermedades transmitidas insectos</p>	<p>La mala limpieza o acumulación de líquidos en cada uno de los tanques del equipo, provoca la acumulación de huevos de insectos, pudiéndose desarrollar enfermedades tropicales temporales.</p> 
<b>ERGONÓMICOS</b>	<p>Fatigas físicas y movimientos constantes</p>	<p>Por la ubicación de las válvulas que contiene el equipo, se deberá realizar varios movimientos para accionarlas así como el movimiento constante para análisis de agua en diferentes puntos del equipo.</p>
<b>SEGURIDAD FÍSICA E INFORMACIÓN</b>	<p>Falta de conocimientos de uso y principios del equipo</p>	<p>Un uso no adecuado de información concerniente al equipo, conlleva a una serie de riesgos en cadena mencionados en está tabla.</p>
<p>Negación o no acceso a manual de operación del equipo</p>		

<b>ELÉCTRICOS</b>	Sobrecalentamiento de la bomba	Si no hay la cantidad requerida de suministro de agua en el tanque de alimentación, la bomba se sobrecalentará generando cortocircuito y/o chispas.
	Descarga de corrientes	<p>En el caso de manipular con las manos o pies mojados algún cable de la bomba o cables de electricidad cercanos.</p> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;">   </div>
<b>AMBIENTAL</b>	Residuos alcalinos/ ácidos	La descarga al alcantarillado público debe realizarse solamente si se ha hecho un pre-tratamiento a los efluentes para que cumpla con los LMP.

## 4.2 EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

El uso de equipos de protección personal es muy importante para la prevención de incidentes o accidentes cuando se realiza algún tipo de actividad industrial. A pesar de que parte del funcionamiento del equipo implica la manipulación de sustancias químicas a bajas concentraciones tales como el HCl y NaOH es necesario tomar las medidas preventivas.

## 4.2.1 ZONAS AFECTADAS

### 4.2.1.1 Cabeza

La Unidad de Intercambio Iónico tiene como base para su estabilización una estructura metálica de 2 m de alto y 1.5 m de ancho. Sobre la parte más alta reposan los tanques de almacenamiento para los respectivos regenerantes de cada columna de intercambio. Para el respectivo llenado, vaciado y limpieza de cada tanque se deberá hacer uso de una escalera de tijera para poder realizar las actividades citadas.

Para esto se hará uso del **arnés de seguridad** ya que sobrepasa una altura de 1.5 m, además de **casco** y **botas** punta de acero para evitar caídas y golpes bruscos en partes del cuerpo.

**Figura 15.** Correcto uso de EPPs para actividades de altura en el equipo.



#### 4.2.1.2 Ojos y Nariz

Los líquidos empleados para el funcionamiento de este equipo son fácilmente manejables. Sin embargo, en el caso de los regenerantes empleados se los prepara a partir de sus respectivas sustancias químicamente puros los cuales emanan olores fuertes y es por eso que se debe proteger con **gafas** de protección y **maskarillas**.

En el caso de inhalación acudir a un lugar abierto y respirar profundamente hasta ya no percibir el gas. En el caso de contacto con los ojos, lavar inmediatamente con abundante agua potable hasta ya no percibir irritación y evitar exponerse a la luz solar por al menos 30 min. Si los síntomas persisten, consulte a su médico.

**Figura 16.** Correcto uso de EPPs para actividades de manipulación y preparación de sustancias.



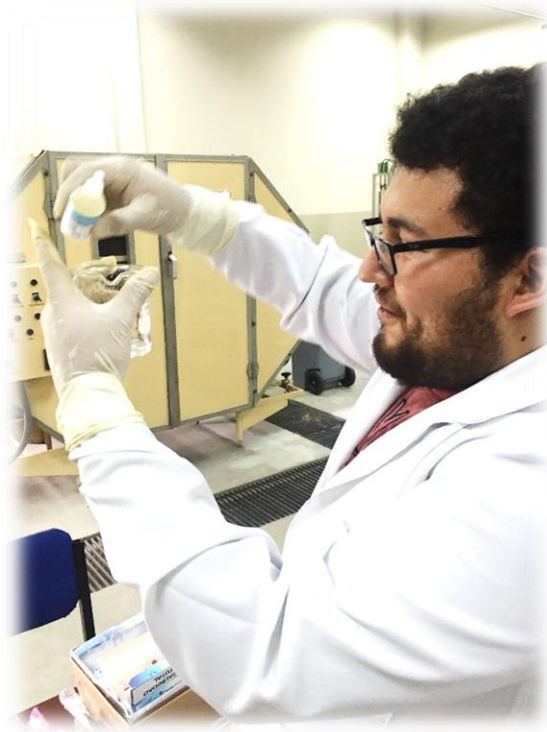
#### 4.2.1.3 Extremidades

Los líquidos empleados para el funcionamiento de este equipo son fácilmente manejables. Sin embargo es importante tomar las debidas precauciones al manipular éstos líquidos es por eso que se deberá hacer uso de **mandil** y **guantes de nitrilo** para protección de las extremidades superiores: manos y brazos; al momento de la puesta en marcha del equipo y especialmente para la preparación de las soluciones HCl al 4% y NaOH al 3% los cuales son los regenerantes para las resinas.

Estas dos sustancias se los preparan a partir de sus respectivas sustancias químicamente puros los cuales en caso de contacto con la piel irritan la piel y se deberá lavar con abundante agua potables hasta ya no percibir irritación. Si los síntomas persisten consulte a su médico. Es indispensable el uso de las **botas** punta de acero o zapatos cerrados para evitar daños en las extremidades inferiores: pies y uso de mandil largo para proteger extremidades inferiores: piernas.

**Figura 17.** Correcto uso de EPPs para actividades de manipulación y preparación de sustancias.

99



### **4.3 MATERIALES, EQUIPOS Y SUSTANCIAS**

Para la puesta en marcha y posterior funcionamiento del equipo, se requirió de los siguientes elementos:

- **Equipos**
  - pH-metro
  - Balanza analítica
  - Medidor de STD
- **Materiales**
  - Cilindro graduado de vidrio 100 ml
  - Cilindro graduado de vidrio 10 ml

- Vaso precipitación de vidrio 500 ml
- Vaso de precipitación de vidrio 250 ml
- Matraz de elernmeyer de vidrio de 250 ml
- Espátula de metal

- **Sustancias**

- Ácido clorhídrico 37%
- Hidróxido de sodio 98%
- Kit para determinación de cloruros
- Kit para determinación de dureza
- Kit para determinación de alcalinidad
- Agua destilada
- Agua potable

- **Elementos de protección personal**

- Guantes de nitrilo
- Respiración con pieza facial elastomérica
- Gafas de protección
- Mandil de laboratorio

## **4.4 PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN**

### **4.4.1 PROCEDIMIENTO PARA LA DESMINERALIZACIÓN DEL AGUA**

Con los valores calculados anteriormente se tiene las siguientes condiciones de operación.

**Tabla XIV.** Condiciones de Operación para la Desmineralización del agua en la Unidad Desmineralizadora.

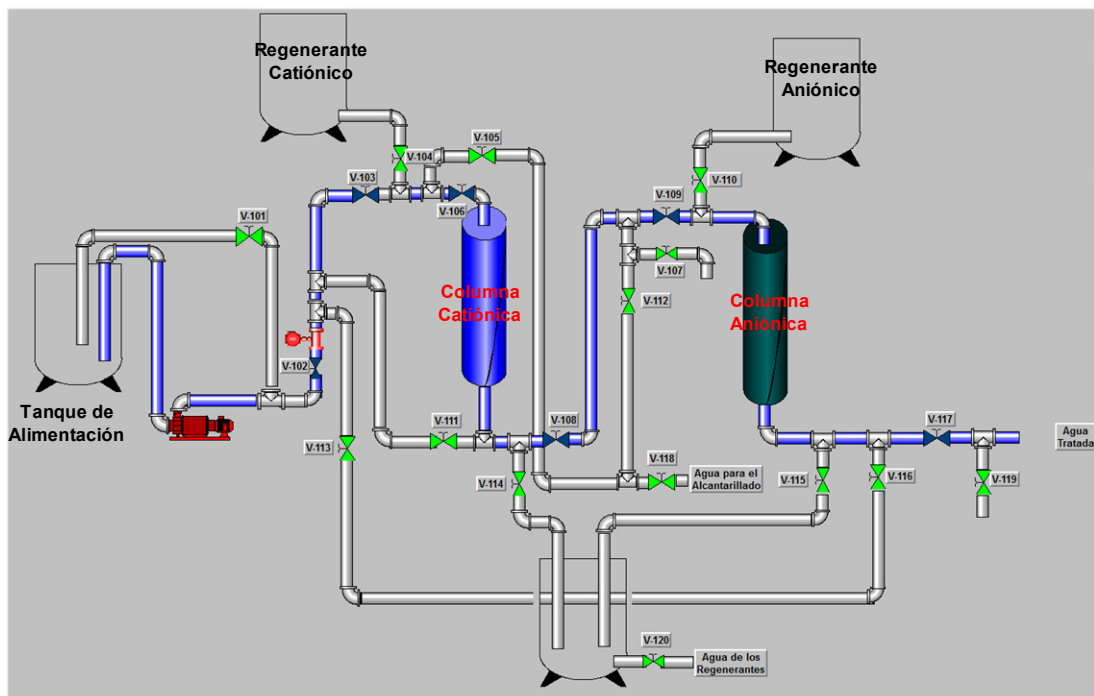
Volumen de alimentación (L)	110
Caudal (L/min)	4.5
Temperatura (°C)	20-35

- a. Se deberá llenar el tanque de alimentación a un volumen un poco más que el establecido en la tabla XIV.
- b. Proceder a realizar la determinación de parámetros iniciales de cloruros, dureza total, alcalinidad, pH y STD según la sección 4.2. y anotar los resultados.
- c. Para comenzar el proceso se tiene que tener abierto las válvulas V-103, V-106, V-108, V-109 y V-117. De debe tener cerradas las válvulas V-104, V-105, V-110, V-111, V-112, V-113, V-114, V-115, V-116, V-118, y V-120.
- d. La regulación del flujo se controla con las válvulas:
  - V-101: con esta válvula se controla la recirculación del agua de alimentación ya que a menor apertura mayor caudal. Esta válvula se la debe poner a una posición aprox. de 45 grados y no se debe mover.
  - V-102: con esta válvula se regula el caudal (ver Tabla XIV) de entrada a la unidad de intercambio iónico, y otros caudales necesarios durante el proceso.
- e. Para recolectar muestras de cada columna, abrir la V-107 para recolectar muestra de la columna catiónica, y abrir la V-119 para recolectar muestra de la columna aniónica (por ende de todo el proceso).
- f. A la muestra recolectada de la columna catiónica proceder a realizar la determinación de pH, dureza y STD mientras que a la muestra de la columna

aniónica proceder a realizar la determinación de cloruros, alcalinidad, dureza, pH y STD.

g. Anotar y analizar los resultados.

**Figura 18.** Diagrama de Flujo de Proceso para la Desmineralización del Agua en el Intercambiador Iónico (líneas color azul).

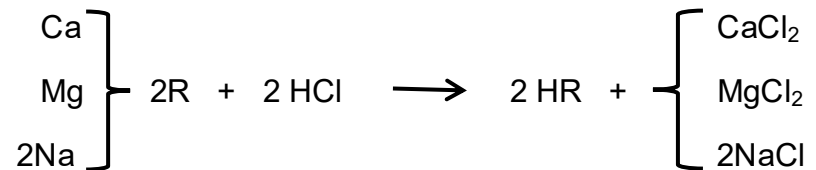


#### 4.4.2 REGENERACIÓN Y ENJUAGUE DE RESINAS

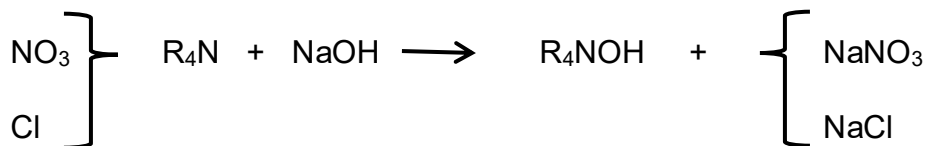
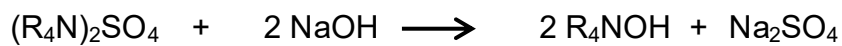
Todos los productos de la regeneración son altamente solubles por lo que pueden emplearse regenerantes en soluciones de hasta 2-5 % de concentración durante todo el ciclo de regeneración sin peligro.

La frecuencia de la regeneración de las resinas es determinada por la concentración de STD y caudal.

En el caso de la regeneración de la resina catiónica se ha utilizado una solución de HCl al 4% m/m, produciéndose las siguientes reacciones:



Para el caso de la regeneración de la resina aniónica se ha utilizado NaOH al 3% m/m a partir de escamas de 98% de pureza. Esta sustancia es económica y de fácil disponibilidad en el mercado. Se produce las siguientes reacciones:



Los pasos para la regeneración a seguir son:

1. Retrolavado
2. Regeneración
3. Lavado lento
4. Lavado rápido

#### 4.4.2.1 PROCEDIMIENTO PARA REGENERACIÓN DE LA RESINA CATIONICA

Para asegurar la correcta regeneración de las resinas, se recomienda realizar un retrolavado previo al contacto del regenerante con las resinas, y al final luego de los lavados.

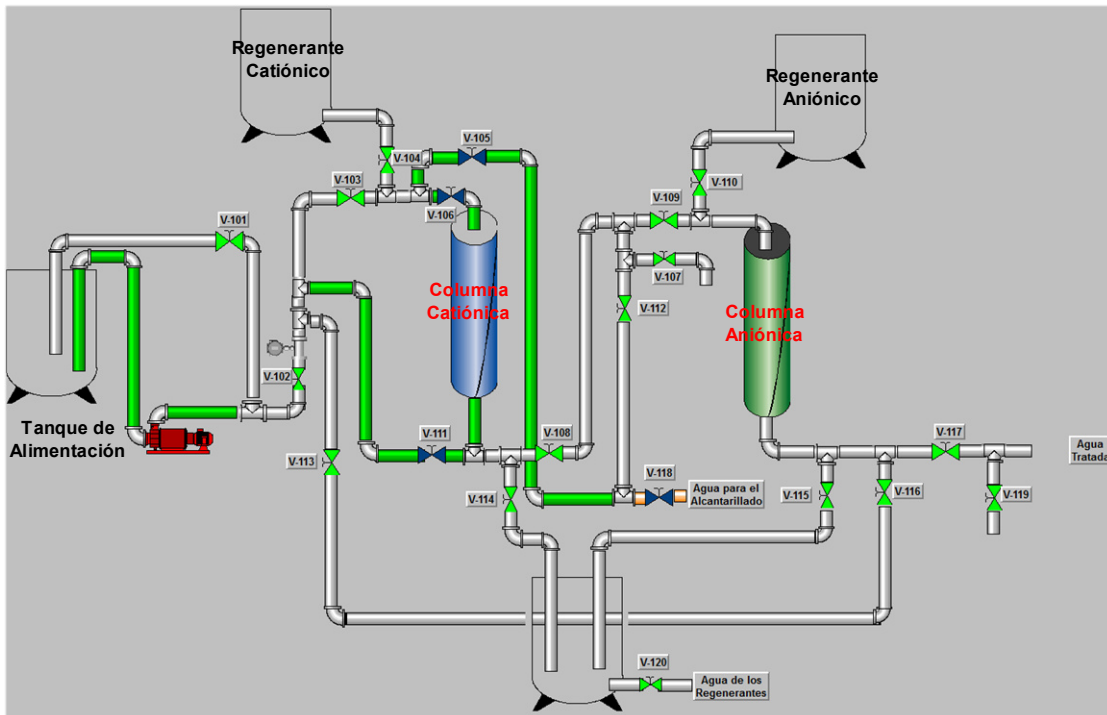
##### RETROLAVADO

- a) Limpiar el tanque de alimentación con agua limpia y luego llenarlo completamente con agua potable.
- b) Abrir las válvulas V-111, V-106, V-105 y V-118, y mantener cerradas las válvulas V-103, V-104, V-107, V-108, V-109, V-110, V-112, V-113, V-114, V-115, V-116, V-117, V-119 y V-120.
- c) Repetir el paso d) de la sección 4.4.1 para la regulación del caudal (ver Tabla XV).

**Tabla XV.** Condiciones de Operación de proceso de Retro-Lavado en la Columna Cationica.

Caudal (L/min)	3.3
Tiempo (min)	3
Temperatura (°C)	20-35

**Figura 19.** Diagrama de Flujo para el Retrolavado de la Resina Catiónica (líneas color verde).



**Nota:** Las aguas efluentes de regeneración deben recolectarse en el *tanque de efluentes* y no enviarla al sistema de alcantarillado directamente debido a su grado de acidez.

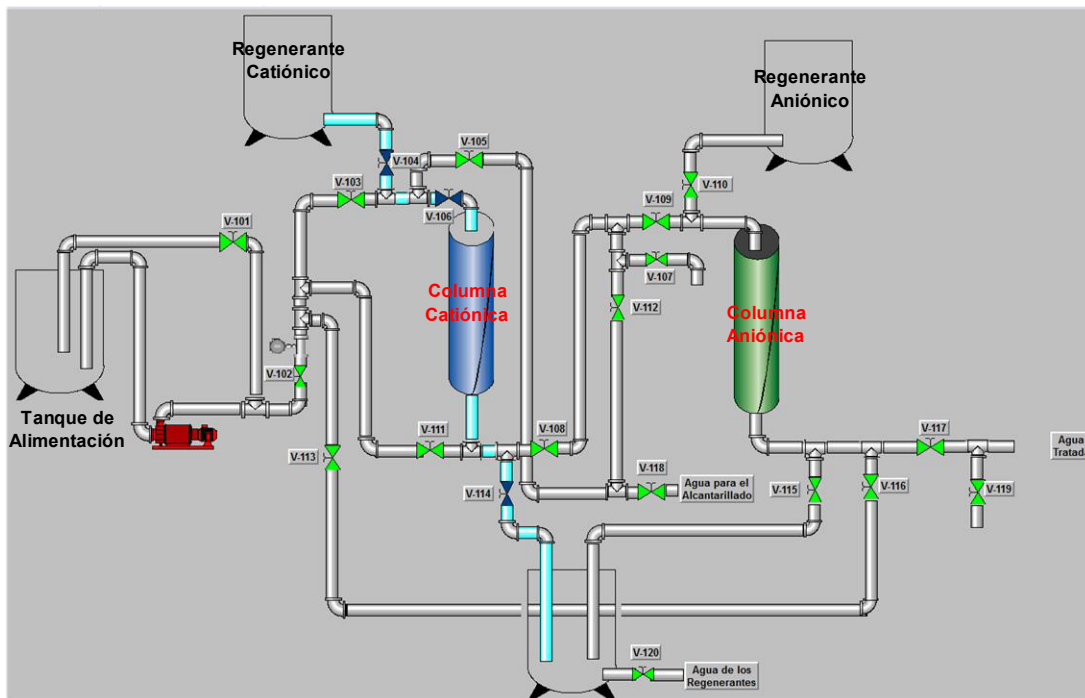
**Pasos para la regeneración de la resina catiónica:**

- a. Preparar una solución de HCl al 4%, medir su pH y anotar el resultado.
- b. Abrir las válvulas V-104 y V-106, y mantener cerradas las válvulas V-101, V-102, V-103, V-105, V-107, V-108, V-109, V-110, V-111, V-112, V-113, V-115, V-116, V-117, V-118, V-119 y V-120.
- c. Mantener aprox. por 30 min en contacto la resina en la solución, y luego proceder al vertido del agua en el tanque abriendo la válvula V-114.

d. Medir el pH del agua obtenida en el *tanque de efluentes* y anotar los resultados.

106

**Figura 20.** Diagrama de Flujo de Proceso para la Regeneración de la Resina Catiónica (líneas color cian).



#### 4.4.2.2 PROCEDIMIENTO PARA LOS LAVADOS DE LA RESINA CATIONICA

Se utiliza como agua para lavados agua potable de la red pública.

**Nota:** Las aguas efluentes de lavado deben recolectarse en el *tanque de efluentes* y no enviarla al sistema de alcantarillado directamente.

##### LAVADO LENTO

a. Limpiar el *tanque de alimentación* con agua limpia y luego llenarlo completamente con agua potable.

**b.** Abrir las válvulas V-103, V-106 y V-114, y mantener cerradas las válvulas V-104, V-105, V-107, V-108, V-109, V-110, V-111, V-112, V-113, V-115, V-116, V-117, V-118, V-119 y V-120.

**c.** Repetir el paso d) de la sección 4.4.1 para la regulación del caudal (ver Tabla XVI).

**Tabla XVI.** Condiciones de Operación para Lavado Lento en la Columna Catiónica.

Caudal (L/min)	0.7
Tiempo (min)	14
Temperatura (°C)	20-35

#### LAVADO RÁPIDO

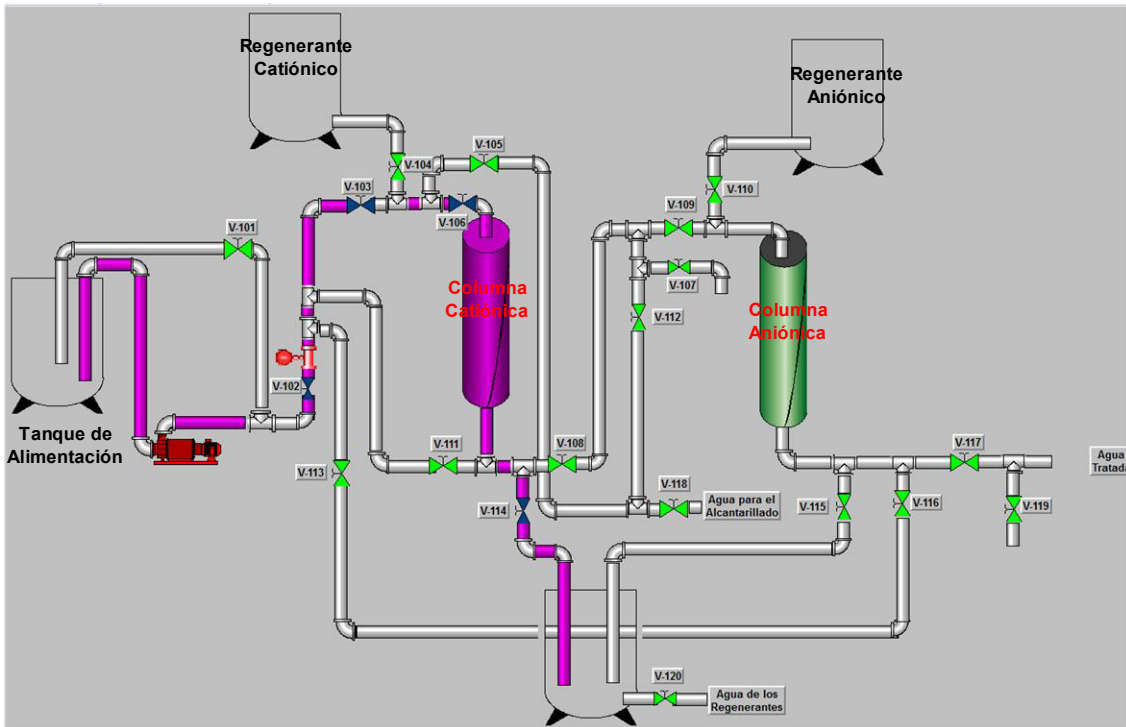
**a.** Abrir las válvulas V-103, V-106 y V-114, y mantener cerradas las válvulas V-104, V-105, V-107, V-108, V-109, V-110, V-111, V-112, V-113, V-115, V-116, V-117, V-118, V-119 y V-120.

**b.** Repetir el paso d) de la sección 4.4.1 para la regulación del caudal (ver Tabla XVII).

**Tabla XVII.** Condiciones de Operación para Lavado Rápido en la Columna Catiónica.

Caudal (L/min)	1.1
Tiempo (min)	9
Temperatura (°C)	20-35

**Figura 21.** Diagrama de Flujo para Lavado Lento-Rápido de la Resina Catiónica (líneas color púrpura).



#### 4.4.2.3 PROCEDIMIENTO PARA REGENERACIÓN DE LA RESINA ANIÓNICA

Para asegurar la correcta regeneración de las resinas, se recomienda realizar un retrolavado previo al contacto del regenerante con las resinas, y al final luego de los lavados.

##### RETROLAVADO

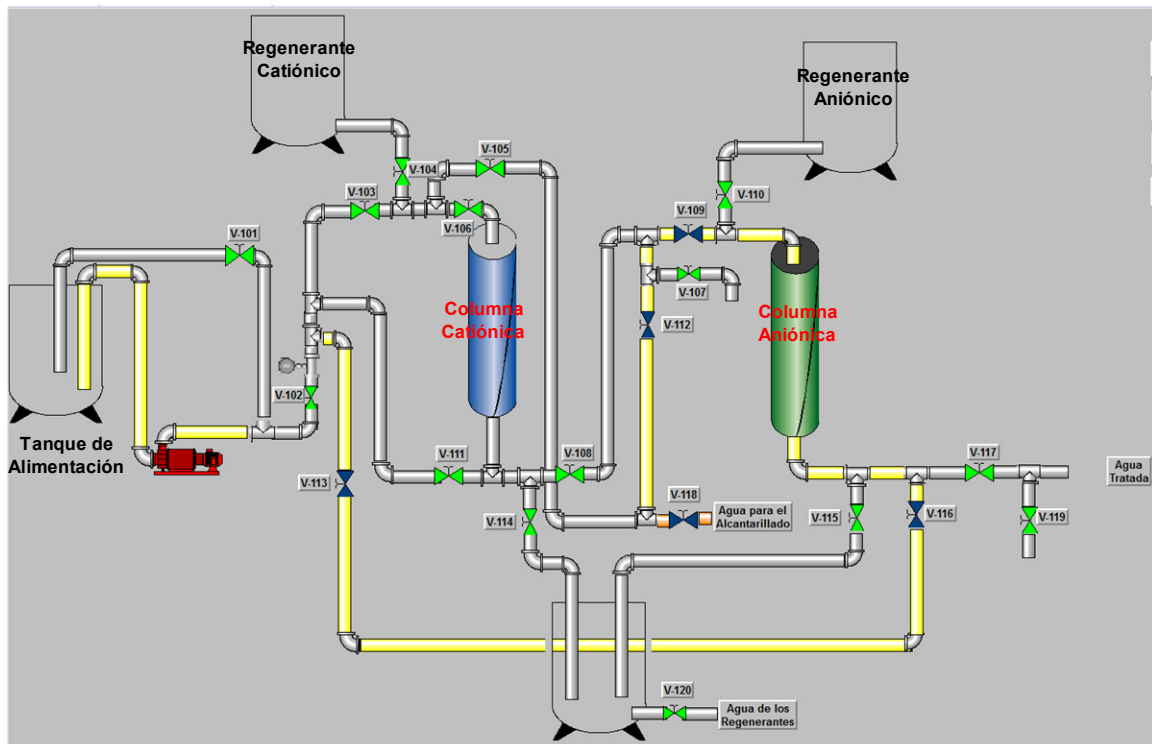
- a) Abrir las válvulas V-109, V-113, V-116, V-112 y V-118, y mantener cerradas las válvulas V-103, V-104, V-105, V-106, V-107, V-108, V-110, V-111, V-114, V-115, V-117, V-119 y V-120.

b) Repetir el paso d) de la sección 4.4.1 para la regulación del caudal (ver Tabla XVIII).

**Tabla XVIII.** Condiciones de Operación para Retrolavado en la Columna Aniónica.

Caudal (L/min)	1.6
Tiempo (min)	44
Temperatura (°C)	20-35

**Figura 22.** Diagrama de Flujo para Retrolavado de la Resina Aniónica (líneas color amarillo).



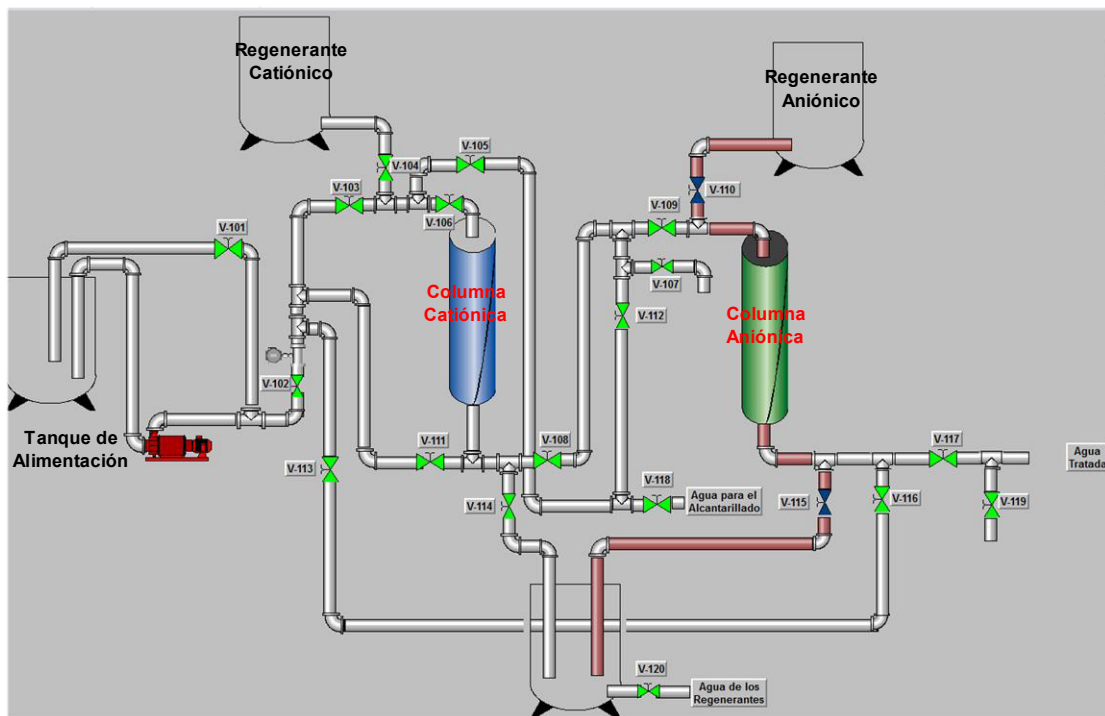
**Nota:** Las aguas efluentes de regeneración deben recolectarse en el *tanque de efluentes* y no enviarla al sistema de alcantarillado directamente por su grado alcalino.

## Pasos para la regeneración de la resina aniónica:

110

- a. Preparar una solución de NaOH al 3%, medir su pH y anotar el resultado.
- b. Abrir las válvulas V-110 y V-115 y mantener cerradas las válvulas V-101, V-102, V-103, V-104, V-105, V-106, V-107, V-108, V-109, V-111, V-112, V-113, V-114, V-116, V-117, V-118, V-119 y V-120.
- c. Mantener aprox. por 30 min en contacto la resina en la solución, y luego proceder al vertido del agua en el tanque abriendo la válvula V-115.
- d. Medir el pH del agua obtenida en el *tanque de efluentes* y anotar los resultados.

**Figura 23.** Diagrama de Flujo para la Regeneración de la Resina Aniónica (líneas color café).



#### 4.4.2.4 PROCEDIMIENTO PARA LOS LAVADOS DE LA RESINA ANIÓNICA

Se utiliza como agua para lavados agua potable de la red pública.

**Nota:** Las aguas efluentes de lavado deben recolectarse en el *tanque de efluentes* y no enviarla al sistema de alcantarillado directamente.

##### LAVADO LENTO

- a. Limpiar el tanque de alimentación con agua limpia y luego llenarlo completamente con agua potable.
- b. Abrir las válvulas V-103, V-105, V-109, V-112 y V-115, y mantener cerradas las válvulas V-104, V-106, V-107, V-108, V-110, V-111, V-113, V-114, V-116, V-117, V-118, V-119 y V-120.
- c. Repetir el paso d) de la sección 4.4.1 para la regulación del caudal (ver Tabla XIX).

**Tabla XIX.** Condiciones de Operación para Lavado Lento en la Columna Aniónica.

Caudal (L/min)	0.7
Tiempo (min)	100
Temperatura (°C)	20-35

##### LAVADO RÁPIDO

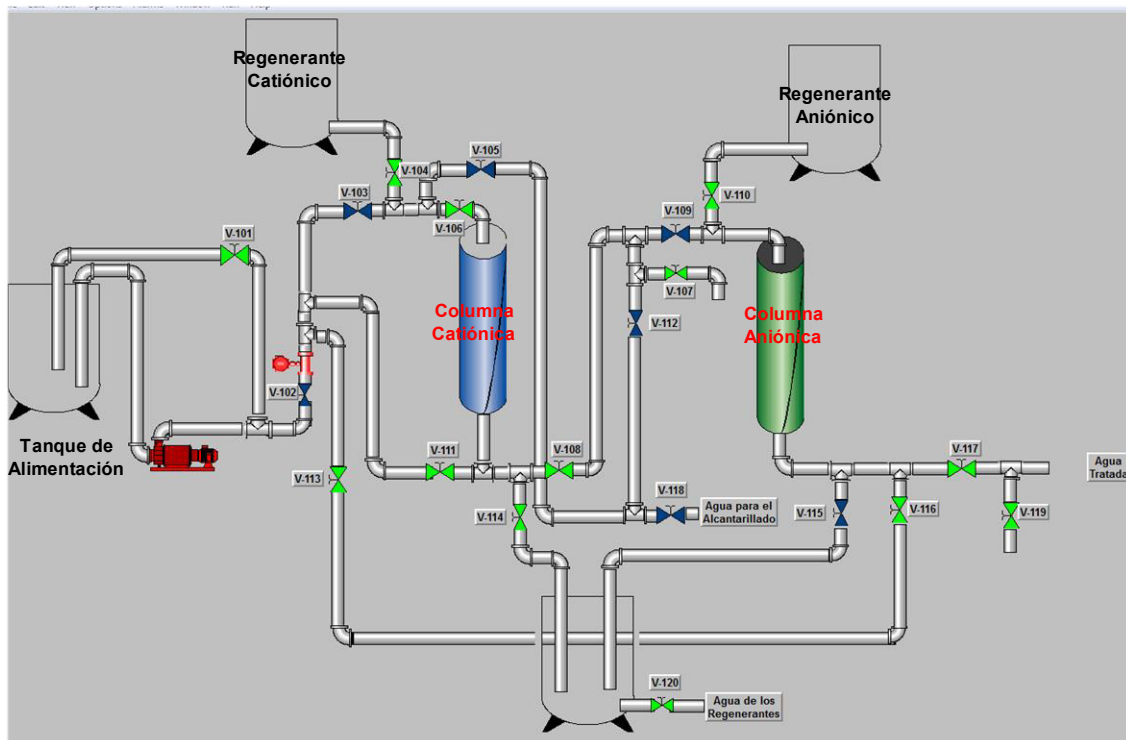
- a. Abrir las válvulas V-103, V-105, V-109, V112 y V-115 y mantener cerradas las válvulas V-104, V-106, V-107, V-108, V-110, V-111, V-113, V-114, V-116, V-117, V-118, V-119 y V-120.

b. Repetir el paso d) de la sección 4.4.1 para la regulación del caudal (ver Tabla XX).

**Tabla XX.** Condiciones de Operación para Lavado Rápido en la Columna Aniónica.

Caudal (L/min)	1.1
Tiempo (min)	64
Temperatura (°C)	20-35

**Figura 24.** Diagrama de Flujo de Proceso para Lavado Lento-Rápido de la Resina Aniónica (líneas color gris).



### 4.4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES

113

#### 4.4.3.1 PROCEDIMIENTO PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE EFLUENTES

- a. Tomar una muestra de agua del *tanque de efluentes* y medir su pH, utilizando una tirilla indicadora de pH o un pH-metro, para saber si la solución a neutralizar es ácida o básica. Anotar los resultados.
- b. Agitar para homogenizar la solución en el mismo *tanque de efluentes* haciendo uso de una paleta.
- c. Si la solución a neutralizar es ácida se agrega NaOH al 50%, y si la solución es básica se agrega H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o HCl concentrado para neutralizar.
- d. La neutralización de la solución se verifica midiendo el pH, hasta que se obtenga un pH neutro de 7.
- e. Una vez neutralizada la solución se lo podrá verter al sistema de alcantarillado abriendo la válvula V-120.

**Nota:** En el caso de observar productos insolubles o precipitados, se deberá filtrar o sedimentar estos productos antes de verterlos al alcantarillado.

## 4.5 MEMORIA TÉCNICA

### 4.5.1 Columnas de Intercambio Iónico

Las columnas de Intercambio Iónico, la parte principal del equipo, consta de dos cilindros de acrílico transparente de 13 cm de diámetro y 88 cm de altura, sin compartimientos. Tanto en la parte superior como inferior tienen bridas que aseguran su sellado permanente.

En la parte superior de las columnas se encuentra la entrada de líquido de la columna a través de tuberías PVC rojo de ¾” de diámetro nominal. De igual manera en la parte inferior de las columnas es la salida de líquido de la columna a través de tuberías de las mismas características mencionadas anteriormente.

**Tabla XXI.** Especificaciones Técnicas del material de Acrílico utilizado para las Columnas de Intercambio.

Estructura	Poli metacrilato de Metilo.
Gravedad específica	1.19
Índice Refractivo	1.49
Componentes	METACRILATO (ACRÍLICO)
Espesor	3 mm
Propiedades	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Acabado de alto brillo o con texturas.</li> <li>- Excelente transparencia y transmitancia (92%).</li> <li>-Excelente resistencia a los agentes atmosféricos.</li> <li>-Fácil pulido y maquinado y buena capacidad de termo formado.</li> </ul>
Temperatura de pegado	20-25°C
Peso de Bola de Acero en caída libre en kg	0.91
Energía necesaria para romper el material en libras-pies	4.7
Cambios en el Índice de Amarillez, medido instrumentalmente	0.8
Transmisión Ultravioleta 320 nm	0

**Figura 25.** Imagen de cada una de las Columnas de Intercambio iónico construidas.

115



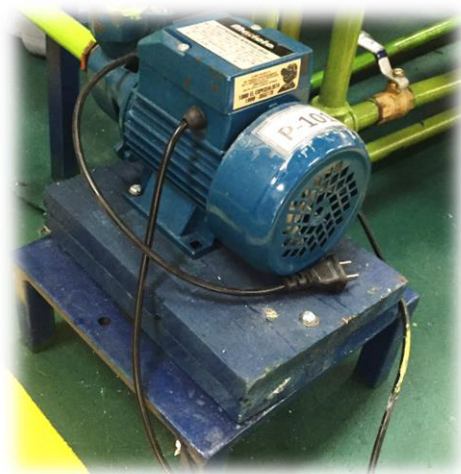
#### **4.5.2 Bombeo de Agua**

El movimiento del líquido hacia cada una de las columnas del Intercambiador iónico se lo realiza por la fuerza ejercida de una bomba marca MARIOLO de 0.5 HP alcanzando una altura máxima de 1.2 m que permite el flujo hacia la parte superior de cada una de las columnas, así como también permite la entrada del flujo por la parte inferior de las columnas.

**Tabla XXII.** Especificaciones Técnicas de la Bomba utilizada en el Equipo de Intercambio Iónico.

Marca Comercial	MARIOLO
Fuerza	0.5 HP
Altura máxima	35.5 m
Revoluciones	3400 rpm
Potencia	0.37 kw
Voltaje	110 V
Frecuencia	60 Hz
Amperaje	4.5 A
Servicio continuo	250 vc, CI B

**Figura 26.** Imagen de la Bomba utilizada para la Unidad Intercambio Iónico.



**NOTA:**

Parte del principio químico que gobierna en el funcionamiento del equipo, es la operación unitaria de adsorción, por lo que es posible implementar una práctica experimental para la obtención de isothermas de adsorción para el Intercambio Iónico, para dicho procedimiento ver el manual de operaciones.

# CAPÍTULO V

## RESULTADOS

Se procedió a desmineralizar dos diferentes tipos de aguas para así comprobar la eficiencia del equipo.

- Muestra 1: agua potable
- Muestra 2: agua *de cola* de torre de enfriamiento (sin químicos)

### 5.1 TABLAS Y GRÁFICOS DE RESULTADOS

**Tabla XXIII.** Resultados Iniciales obtenidos en la Muestra 1.

Tipo	Agua potable
Color	Incolora
pH	6.98
STD	79 ppm
Alcalinidad P	0 ppm CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidad M	25 ppm CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidad total	25 ppm CaCO <sub>3</sub>
Dureza total	86.8 ppm CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	15 ppm

**Tabla XXIV.** Resultados obtenidos en la Muestra 1 luego del paso por la Columna Catiónica de la Unidad de Intercambio Iónico.

Columna Catiónica				
Volumen	pH	STD	Conductividad	Dureza
(L)		(ppm)	μS	(ppm CaCO <sub>3</sub> )
10	3.12	169	338	0
20	3.09	161	322	0

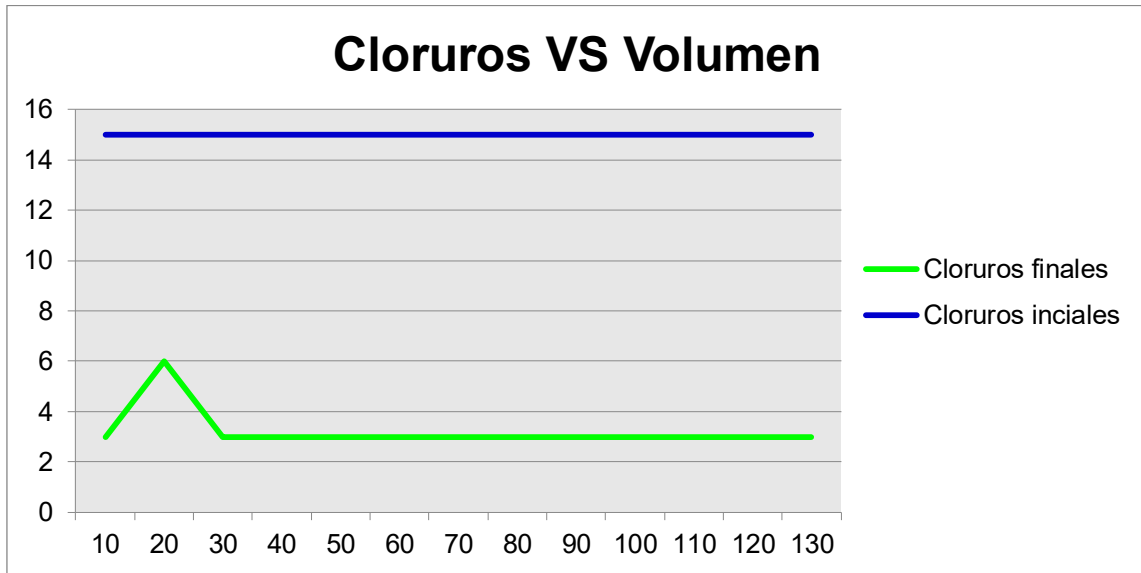
30	3.09	163	326	0
40	3.09	159	318	0
50	3.09	162	324	0
60	3.09	155	310	0
70	3.09	155	310	0
80	3.09	157	314	0
90	3.09	158	316	0
100	3.09	157	314	0
110	3.09	154	308	0
120	3.09	154	308	0
130	3.09	154	308	0

**Tabla XXV.** Resultados obtenidos en la Muestra 1 luego del paso por la Columna Aniónica de la Unidad de Intercambio Iónico.

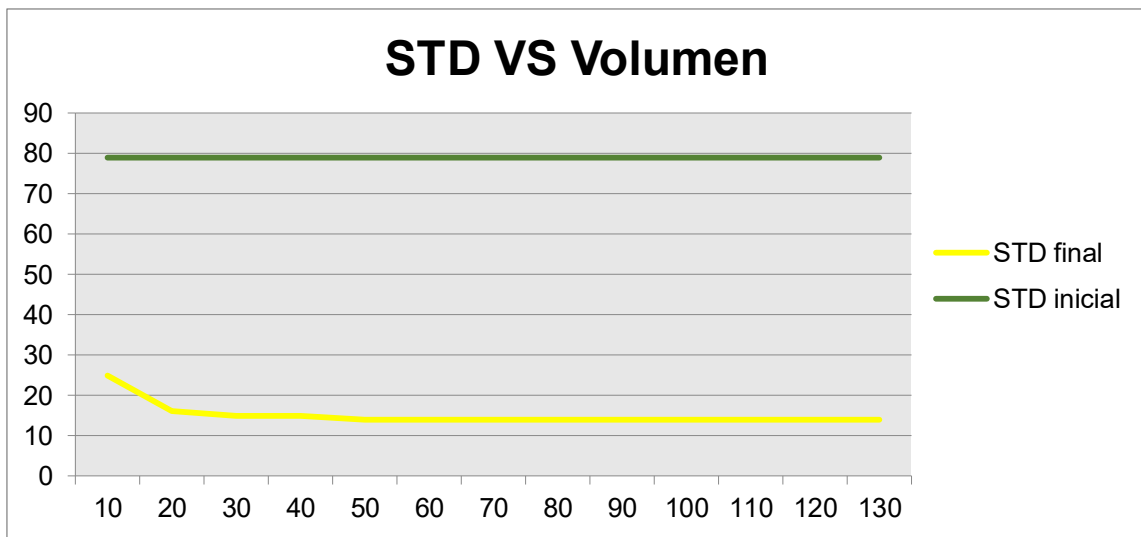
Columna Aniónica							
Volumen	pH	STD	Conductividad	Alcalinidad			Cloruros
(L)		(ppm)	$\mu\text{S}$	(ppm $\text{CaCO}_3$ )			(ppm)
				P	M	T	
10	8.76	25	50	5	15	20	3
20	7.43	16	32	0	10	10	6
30	7.29	15	30	0	10	10	3
40	7.10	15	30	0	10	10	3
50	7.02	14	28	0	10	10	3
60	7.02	14	28	0	10	10	3
70	7.02	14	28	0	10	10	3
80	7.01	14	28	0	10	10	3
90	7.01	14	28	0	10	10	3
100	7.01	14	28	0	10	10	3
110	7.01	14	28	0	10	10	3
120	7.01	14	28	0	10	10	3
130	7.01	14	28	0	10	10	3



**Gráfico 3.** Variación de Cloruros del agua en la Muestra 1 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.



**Gráfico 4.** Variación de STD del agua en la Muestra 1 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.



**Tabla XXVI.** Resultados Iniciales obtenidos en la Muestra 2.

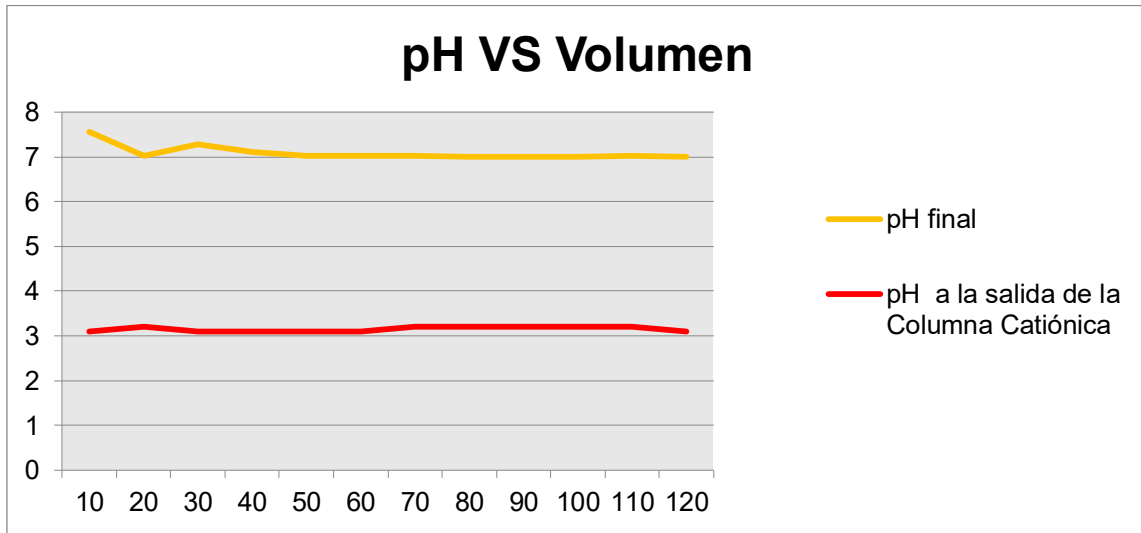
Tipo	Agua <i>de cola</i> de torre de enfriamiento
Color	Amarillezca pálido
pH	9.03
STD	392 ppm
Alcalinidad P	55 ppm CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidad M	75 ppm CaCO <sub>3</sub>
Alcalinidad total	110 ppm CaCO <sub>3</sub>
Dureza total	155 ppm CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	75 ppm

**Tabla XXVII.** Resultados obtenidos en la Muestra 2 luego del paso por la Columna Catiónica de la Unidad de Intercambio Iónico.

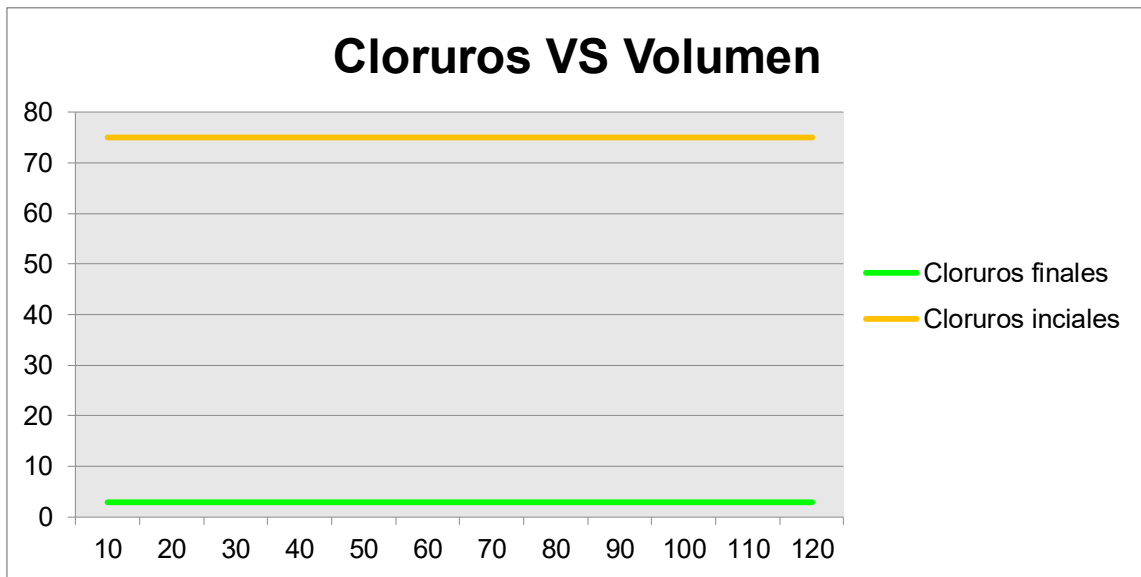
Columna Catiónica				
Volumen	pH	STD	Conductividad	Dureza
(L)		(ppm)	μS	(ppm CaCO <sub>3</sub> )
10	3,1	557	1114	0
20	3,2	567	1134	0
30	3,1	543	1086	0
40	3,1	456	912	0
50	3,1	445	890	0
60	3,1	456	912	0
70	3,2	421	842	0
80	3,2	576	1152	0
90	3,2	532	1064	0
100	3,2	545	1090	0
110	3,2	543	1086	0
120	3,1	432	864	0
130	3,1	557	1114	0



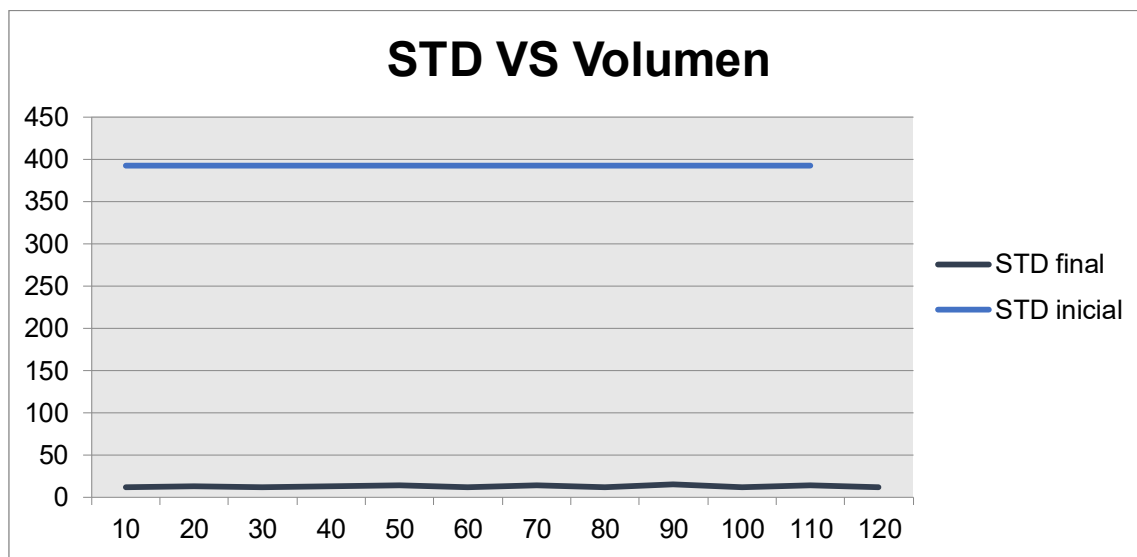
**Gráfico 6.** Variación del pH del agua en la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.



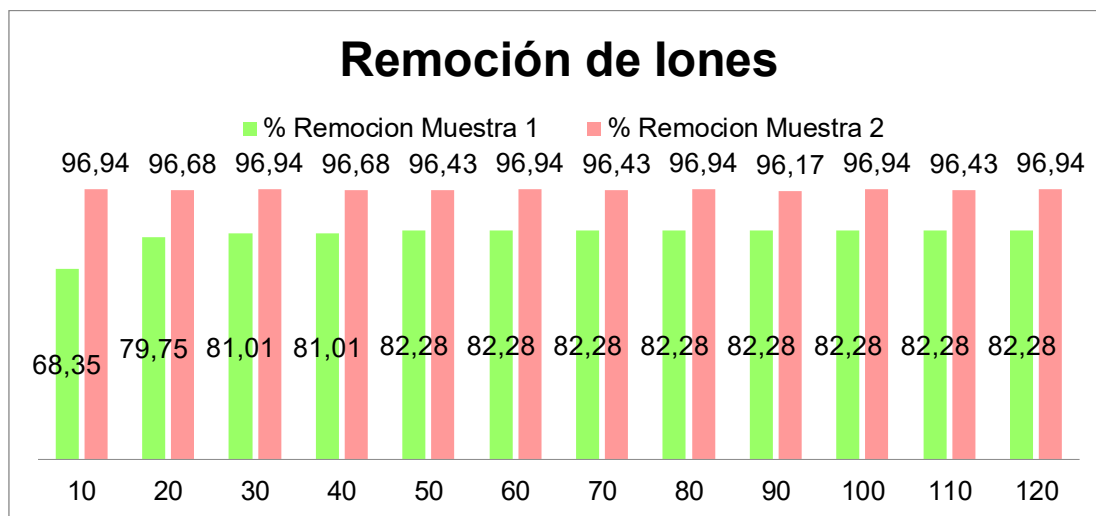
**Gráfico 7.** Variación de Cloruros del agua en la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.



**Gráfico 8.** Variación de STD del agua en la Muestra 2 durante el Proceso de Desmineralización en la Unidad de Intercambio Iónico.



**Gráfico 9.** Variación de la Remoción de Iones obtenidos por la Unidad de Intercambio Iónico para ambas muestras tratadas.



## 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como podemos apreciar en las gráficas, los resultados a la salida de la columna catiónica es la esperada ya que se obtuvieron resultados de pH ácido de 3.09 para ambas muestras, esto quiere decir que la liberación de  $\text{CO}_2$  es la deseada en la columna así como el hidrógeno liberado de la resina son los que le dan la característica de acidez al agua efluente de dicha columna.

De igual manera, los resultados de dureza a la salida de la columna catiónica son de 0 para ambas muestras, lo que demuestra que la resina sí intercambió todos los iones de calcio y magnesio que son los iones más especiales que le dan la característica de dureza al agua. Cada vez que se realizaba la determinación de dureza luego de haber realizado el análisis de alcalinidad utilizando el mismo matraz, se presentaba interferencias en los resultados esperados, ya que los residuos del agua anterior aumentaba la cantidad de sales los cuales eran detectados al instante durante la determinación de dureza del agua.

Continuando con el proceso, el agua efluente de la columna catiónica ahora es afluente a la columna aniónica para que retire los aniones presentes. Uno de los aniones presentes y el más perjudicial en aguas para uso industrial es el cloruro, y efectivamente hubo una disminución considerable de ión dando como resultado 3 ppm de cloruros para ambas muestras.

Cabe recalcar que para la determinación de cloruros se utilizó el método mercurímetro, y en los resultados obtenidos de cloruros ya en las últimas mediciones conforme se iba consumiendo el agua de alimentación, se obtuvieron resultados de cloruros  $< 3$  ppm en el agua tratada, esto porque se observó que con menos de 1 gota de titulante la solución cambiaba de color inmediatamente. Sin embargo se colocaron resultados de cloruros de 3 ppm ya que el método de análisis utilizado *insitu* ya tiene estandarizado que 1 gota representa 3 ppm de cloruros, por lo que no se puede colocar valores menores a este.

El pH del agua tratada registra valores entre 7.5 a 7.01 pH neutro lo cual se esperaba como resultado encontrándose dentro del rango permitido, observándose que a la salida de la columna aniónica es pH ácido pero conforme pasa a la columna catiónica aumenta su pH volviéndose pH neutro.

Los resultados de STD iniciales fueron altos en ambas muestras, sin embargo los resultados de agua tratada (ya a la salida del Intercambio Iónico) hubo una disminución de iones entre un 82% a 97% para la muestra 1 y muestra 2 respectivamente. Cabe recalcar que por medio de los STD del agua se puede cuantificar los iones retirados, el cual fue una remoción alta de iones removidos por las resinas, por lo tanto una eficiencia muy buena.

Analizando todos los resultados obtenidos de cada parámetro se observa que los estos fueron los esperados, lo que demuestra que el equipo

diseñado opera en condiciones eficientes además de que las resinas tanto aniónicas como catiónicas operan normalmente sin presentar problema alguno.

La regeneración de las resinas se lo realizó de manera correcta, y esto se verificó monitoreando el pH de los afluentes y efluentes a cada columna:

- HCl al 4%: pH inicial 1.07 y pH final de efluentes solo de la columna catiónica luego de lavados 3.01.
- NaOH al 3%: pH inicial 12.97 y pH final de efluentes solo de la columna aniónica luego de los lavados 10.38.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados obtenidos y análisis realizados en el capítulo anterior, así como de la experiencia obtenida durante la realización de este proyecto, se llega a las siguientes conclusiones.

### 6.1 CONCLUSIONES

1. Se logró remover la mayor cantidad de iones de dos diferentes tipos de aguas: agua de la red pública y agua de cola de una torre de enfriamiento (sin químicos), obteniendo en ambas muestras los mismos resultados constantes por lo que se **concluye** que la eficiencia del equipo diseñado es alta de hasta 97%, pudiendo ser utilizada para la desmineralización de otros tipos de aguas.
2. A menor tamaño de partícula de las resinas, menor será el tiempo que tarde en llegar al equilibrio.
3. La turbidez presente en el agua de alimentación reduciría la capacidad de intercambio de la resina debido a que lo contamina.
4. Las columnas de intercambio catiónica y aniónica remueven eficientemente todos los cationes y aniones del agua.
5. La resina catiónica de ácido fuerte utilizada, remueve todos los cationes de ácidos tanto fuertes como débiles siendo éstos  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ , entre otros.

6. La resina aniónica de base fuerte utilizada, remueve todos los aniones de bases tanto fuertes como débiles siendo éstos  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ , entre otros.
7. El proceso de retrolavado, dentro de las etapas de regeneración es indispensable de cumplir ya que realiza un movimiento turbulento de la resina dentro de la columna en suspensión con agua, y evita así la canalización y a su vez limpia todo tipo de suciedad presente en las resinas.
8. La regeneración realizada a cada una de las resinas reestableció las condiciones originales de las mismas poniendo nuevamente en operación eficiente a la Unidad de Intercambio Iónico.
9. Una regeneración incompleta de la resina catiónica a la forma de hidrógeno permite la fuga de un poco de sodio en el agua que pasa al intercambiador aniónico. En consecuencia, el agua que sale de la unidad aniónica todavía contiene este sodio en la forma de hidróxido de sodio por lo general de pH de 8 a 9.
10. El efluente obtenido de cada una de las etapas de regeneración cumple con las normas ambientales TULSMA (ver anexo IV-A) para su descarga al alcantarillado público.
11. Para poner en marcha el equipo, previo a la desmineralización del agua, fue necesario realizar varios lavados y una primera regeneración a las resinas para así estimular sus sitios activos y asegurar que las resinas funciones según las especificaciones del proveedor.

## 6.2 RECOMENDACIONES

En cuanto a los resultados y análisis:

- Se recomienda realizar los respectivos análisis fisicoquímicos al agua tanto a la entrada como a la salida de ambas columnas catiónica y aniónica.
- Si se desea realizar el tratamiento de otro tipo de agua se debe realizar los análisis fisicoquímicos iniciales al agua para así determinar si se debe realizar algún pre-tratamiento previo al ingreso a la Unidad de Intercambio Iónico para así evitar daños en la resina.

Se recomienda medir los STD del agua y verificar si cumple o no con el valor de STD de 600 ppm para el que fue diseñado el equipo.

- Tomar en cuenta que en la parte superior de las columnas se encuentran los tanques de almacenamiento de sustancia ácida y básica, por lo que no se debe abrir las válvulas V-104 y V-110, solo si es para la regeneración, caso contrario activarían el proceso de regeneración de las resinas y este proceso eso es solamente cuando estas estén saturadas.
- Se recomienda utilizar materiales independientes para cada determinación de alcalinidad, dureza y cloruros ya que los residuos del matraz puede interferir en el análisis a realizarse si no se ha lavado y esterilizado correctamente los materiales.
- Antes de cada determinación a realizar al agua, se deberá lavar correctamente los materiales a utilizar con jabón libre de fosforo para

que éstos iones no interfiera en los resultados. De igual manera, proceder a lavar correctamente los materiales luego de utilizarlos.

- Cuando se realiza los respectivos procesos de lavado a las resinas, este se lo debe realizar hasta cuando el pH de cada columna se estabilice.
- Si se observa cambios de color en la resina, entonces es indicativo que la resina está agotada y necesita ser regenerada. Caso contrario reemplazar por resina nueva.
- Ya que el equipo será utilizado periódicamente, se recomienda que antes de la corrida para desmineralizar algún tipo de agua se deba retrolavar las resinas con agua potable para así *soltar* y evitar canalizaciones a través de la resina ya que así aumenta la eficiencia del intercambio iónico.
- Luego del uso de la Unidad de Intercambio Iónico, dejar todas las llaves de drene abiertas para que salga toda el agua de las columnas y demás agua acumulada en las tuberías para evitar ensuciamiento, moho o deterioro de las resinas.
- La resina está diseñada para 2 años de vida útil, por lo que se le debe dar respectivo mantenimiento cada 6 meses cambiando al menos el 25% de la resina total de la columna por resina nueva.

En cuanto al diseño y puesta en marcha:

- Se recomienda previo al diseño de un equipo, tomar en cuenta todos los parámetros fisicoquímicos de control de los materiales y equipos a

utilizar proporcionados por el proveedor, ya que según éstos datos se determinará el dimensionamiento, capacidad y eficiencia en el diseño.

- Recordar que al momento de medir los tiempos de lavados de las columnas de intercambio, se debe inundar la columna y luego esperar que salgan los efluentes por las diferentes tuberías de salida, y recién ahí empezar a contabilizar el tiempo de lavado con un cronómetro.
- Tomar en cuenta que el flujómetro es frágil, procurar no golpearlo por ningún motivo y manejarlo adecuadamente según instrucciones del manual de operación del equipo.
- Si se presentan fugas de agua en el equipo, desenroscar desde los nudos colocados para poder colocar cubrir la fufa ya sea con teflón o permatex según sea el caso.

# BIBLIOGRAFÍA

133

C.F. 'Chubb' Michaud, CWS-VI *The Role of Crosslinking in Ion Exchange Resins*. Volume 53, number 3. Pages: 30-35, 2011.

C.J. Geankoplis. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Tercera edición. Editorial Continental, S.A. De C.V. México, 1998. Cap. 12, pá.: 773-785.

David Alchin. *Ion Exchange Resins*. Artículo de Service Chemist, Drew New Zealand. Recuperado en enero 2016, de: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/water/13D.pdf>

Davila S., Jose. *Oceanografía Físico-Química*. Oceanografía Descriptiva. ESPOL. 27 Mayo, 2015.

Francis J. DeSilva. (1999). Essentials of Ion Exchange [abstract]. 25<sup>th</sup> Annual WQA Conference.

F. Hidalgo & M. Guamán (2009). *Diseño Y Construcción De Un Desmineralizador De Lecho Múltiple* (tesis de grado). Universidad de Guayaquil. Ecuador.

Michaud, C.F. Defining Ion Exchange Capacity. WC/P, [abstract from Water conditions & Purification] March, 2011.

Michaud, C.F. The role of Crosslinking in Ion Exchange Resins. [Tabla recuperado de WC/P], June, 2011.

Monografía. *Análisis y Gestión de Riesgos*. (s.f). Recupero en febrero 2016, de <http://www.monografias.com/trabajos94/identificacion-riesgos-laborales/identificacion-riesgos-laborales.shtml>

NTE INEN1 108:2006. *Agua Potable-Requisitos*. Primera edición. Ecuador, 2006.

REMCO S.A. Power Purge Deionization Systems with High Efficiency. Recuperado en enero 2016, de: <http://www.remco.com/di.htm>

Scott Wierzchowski, (Nov. 1995). *Term projects of Ion Exchangers*. Recuperado en enero 2016, de: <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/IONEX/biomain.htm>

Sf.. *Tratamientos Físico-químicos-Procesos de carácter químico*. Edición 1. España. Cap.9, pág: 404-408. Recuperado en febrero 2016, de <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/40->

[542\\_TECNICAS\\_DE\\_PREVENCION\\_DE\\_LA\\_GENERACION\\_DE\\_SUELOS\\_CONTAMINADOS\\_TOMO\\_I/40-542/9\\_TRATAMIENTOS\\_FISICOS-QUIMICOS.PDF](#).

The USGS Water Science School. *The World's Water*. Recuperado en enero 2016, de: <http://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>


Torres Francisco. *Generalidades del Agua*. Tratamientos de Aguas. ESPOL. 27 de Octubre, 2014.

Warren L. Mc.Cabe. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. Séptima edición. Editorial McGrown Hills. Mexico, 2007. Cap. 25, pág: 904-910.

Wikipedia. *Contaminación Hidrológica*. (s.f). Recuperado en enero 2016, de [https://es.wikipedia.org/wiki/Contaminación\\_hídrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Contaminación_hídrica)

## I-C. HOJA DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA RESINA CATIONICA (PÁG. 1/5)

**PRODUCT INFORMATION**  
**LEWATIT® MonoPlus S 108**



**Lewatit® MonoPlus S 108** is a strongly acidic, gel-type cation exchange resin in the Na-form with beads of uniform size (monodisperse) based on a styrene-divinylbenzene copolymer. Due to a special manufacturing process this resin type is extremely resistant to chemical, osmotic and mechanical stress. That leads to very low leachables even under critical conditions like higher temperatures, presence of oxidants (O<sub>2</sub>, Fe-oxides) and external regeneration processes. Even at very short cycle times (one cycle = service + regeneration) the special ion exchange resin matrix leads to long life cycles in demineralization processes. The high total capacity results in high operating capacities with a very low ionic leakage and a very high regenerant utilization.

The extremely high monodispersity [uniformity coefficient: 1.05 (+/- 0.05)] and very low fines content of max. 0.1 % (< 0.4 mm) results in particularly low pressure losses paired with an efficient and cost optimized operation of demineralization plants.

**Lewatit® MonoPlus S 108** is especially suitable for:

- demineralization of water for industrial steam generation operated with co-current or modern counter-current systems like e.g. Lewatit WS System, Lewatit Liftbed System or Lewatit Rinsebed System
- polishing using the Lewatit Multistep System or a conventional mixed bed arrangement in combination with the following anion components: Lewatit® MonoPlus M 500 MB, Lewatit® MonoPlus M 800, Lewatit® MonoPlus M 600, Lewatit® MonoPlus MP 500, Lewatit® MonoPlus MP 800 and Lewatit® MonoPlus MP 600.

**Lewatit® MonoPlus S 108** adds special features to the resin bed:


- high flow rates during regeneration and loading
- high operating capacity at low regenerant consumption
- low rinse water requirement
- homogeneous throughput of regenerants, water and solutions, resulting in a homogeneous operating zone
- virtually linear pressure drop gradient across the entire bed depth, allowing operation with higher bed depths
- low TOC emission and high resistance to oxidative stress
- good separation of the components in mixed bed applications.

The special properties of this product can only be fully utilized if the technology and process used correspond to the current state-of-the-art. Further advice in this matter can be obtained from Lanxess, Business Unit Ion Exchange Resins.

1/5

This document contains important information and must be read in its entirety.

Edition: 2010-08-30  
Previous Edition: 2009-11-19



**PRODUCT INFORMATION**  
**LEWATIT® MonoPlus S 108**



**General Description**

Ionic form as shipped	Na <sup>+</sup>
Functional group	sulfonic acid
Matrix	crosslinked polystyrene
Structure	gel type beads
Appearance	black-brown

**Physical and Chemical Properties**

		metric units	
Uniformity Coefficient*			1.05 (+/- 0.05)
Mean bead size*		mm	0.82 (+/- 0.05)
Bulk density	(+/- 5 %)	g/l	840
Density		approx. g/ml	1.30
Water retention		wt. %	41 - 48
Total capacity*		min. eq/l	2.2
Volume change	Na <sup>+</sup> → H <sup>+</sup>	max. vol. %	10
Stability	at pH-range		0 - 14
Storability	of the product	max. years	2
Storability	temperature range	°C	-20 - 40

\* Specification values subjected to continuous monitoring.

<sup>2/5</sup>  
This document contains important information and must be read in its entirety.

Edition: 2010-08-30  
Previous Edition: 2009-11-19



PRODUCT INFORMATION  
LEWATIT® MonoPlus S 108



Recommended Operating Conditions\*

		metric units			
Operating temperature		max. °C	120		
Operating pH-range			0 - 14		
Bed depth		min. mm	800		
Specific pressure drop	(15 °C)	approx. kPa*h/m <sup>2</sup>	1.0		
Pressure drop		max. kPa	200		
Linear velocity	operation	max. m/h	60***		
Linear velocity	backwash (20 °C)	approx. m/h	15		
Bed expansion	(20 °C, per m/h)	approx. vol. %	4		
Freeboard	backwash (extern / intern)	vol. %	60 - 80		
Regenerant			HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaCl
Counter current regeneration	level	approx. g/l	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	50 80 90	
Counter current regeneration	concentration	wt. %	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	4 1.5** 8	- / - 6 3** 10
Linear velocity	regeneration	approx. m/h	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	5 10 5	- - 20
Linear velocity	rinsing	approx. m/h	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	5 5 5	
Rinse water requirement	slow / fast	approx. BV	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	2 2 2	
Co current regeneration	level	approx. g/l	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	100 150 200	
Co current regeneration	concentration	approx. wt. %	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	6 1.5** 8	- / - 10 3** 10
Linear velocity	regeneration	approx. m/h	HCl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> NaCl	5 10 5	- - 20

This document contains important information and must be read in its entirety.

Edition: 2010-08-30  
Previous Edition: 2009-11-19



**PRODUCT INFORMATION**  
**LEWATIT® MonoPlus S 108**



Linear velocity	rinsing	approx. m/h	HCl	5
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5
			NaCl	5
Rinse water requirement	slow / fast	approx. BV	HCl	6
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	6
			NaCl	6
<b>Mixed bed operation</b>				
Bed depth		min. mm	500	
Regenerant	level	approx. g/l	HCl	100
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	150
Regenerant	concentration	approx. wt. %	HCl	4
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2
			-	6
			-	8

\* The recommended operating conditions refer to the use of the product under normal operating conditions. It is based on tests in pilot plants and data obtained from industrial applications. However, additional data are needed to calculate the resin volumes required for ion exchange units. These data are to be found in our Technical Information Sheets.

↔ Regeneration progressive

↔ 100m/h for polishing

This document contains important information and must be read in its entirety.

Edition: 2010-08-30  
 Previous Edition: 2009-11-19



PRODUCT INFORMATION  
LEWATIT® MonoPlus S 108



### Additional Information & Regulations

---

#### Safety precautions

Strong oxidants, e.g. nitric acid, can cause violent reactions if they come into contact with ion exchange resins.

#### Toxicity

The safety data sheet must be observed. It contains additional data on product description, transport, storage, handling, safety and ecology.

#### Disposal

In the European Community ion exchange resins have to be disposed, according to the European waste nomenclature which can be accessed on the internet-site of the European Union.

#### Storage

It is recommended to store ion exchange resins at temperatures above the freezing point of water under roof in dry conditions without exposure to direct sunlight. If resin should become frozen, it should not be mechanically handled and left to thaw out gradually at ambient temperature. It must be completely thawed before handling or use. No attempt should be made to accelerate the thawing process.

This information and our technical advice – whether verbal, in writing or by way of trials – are given in good faith but without warranty, and this also applies where proprietary rights of third parties are involved. Our advice does not release you from the obligation to check its validity and to test our products as to their suitability for the intended processes and uses. The application, use and processing of our products and the products manufactured by you on the basis of our technical advice are beyond our control and, therefore, entirely your own responsibility. Our products are sold in accordance with the current version of our General Conditions of Sale and Delivery.

Lanxess Deutschland GmbH  
BU ION  
D-51369 Leverkusen

[lewattit@lanxess.com](mailto:lewattit@lanxess.com)

[www.lewatit.com](http://www.lewatit.com)  
[www.lanxess.com](http://www.lanxess.com)

This document contains important information and must be read in its entirety.

Edition: 2010-08-30  
Previous Edition: 2009-11-19

## II-C. HOJA DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA RESINA ANIÓNICA (PÁG. 1/4)

140

### INFORMACIÓN DE PRODUCTO LEWATIT® MonoPlus M 500



La Lewatit® MonoPlus M 500 es una resina intercambiadora de aniones, geliforme, fuertemente básica, con una distribución granulométrica uniforme (monodispersa), a base de un copolímero de estireno divinilbenceno. Las bolas monodispersas son química y mecánicamente muy estables. 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® MonoPlus M 500 es especialmente apropiada para:

- desmineralización de agua industrial destinada a la generación de vapor, por ejemplo en los Sistemas Lewatit® WS, Liftbed (LB), o Rinsebed (RB)
- purificación fina en el Sistema Lewatit® Multistep en combinación con la Lewatit® MonoPlus S 100

La Lewatit® MonoPlus M 500 confiere a los lechos de los filtros las siguientes características especiales:

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

Las propiedades especiales de este producto solo podrán aprovecharse de manera óptima, si el proceso y el diseño del filtro están en consonancia con la técnica actual. Para cualquier asesoramiento ulterior no dude en consultar a LANXESS, BU intercambiadores iónicos, un equipo a su disposición.

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

1/4

Edición: 2009-09-04  
Edición previa: 2009-08-17

**LANXESS**  
Enabling Chemistry

(PÁG. 2/4)

**INFORMACIÓN DE PRODUCTO**  
**LEWATIT® MonoPlus M 500**

**Descripción general**

Forma de suministro	Cl
Grupo funcional	amino cuaternario / tipo I
Matriz	poliestireno reticulado
Estructura	gel
Aspecto	amarillo, translúcido

**Propiedades físico-químicas**

		Unidades métricas	
Coefficiente de uniformidad*	máx.		1,1
Tamaño medio del grano*	mm		0,62 (+/- 0,05 )
Densidad aparente (+/- 5 %)	g/l		690
Densidad	aprox. g/ml		1,08
Contenido en agua	% en peso		48 - 55
Capacidad total*	min. eq/l		1,3
Variación de volumen Cl <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup>	máx. % vol.		22
Estabilidad	rango de pH		0 - 14
Almacenaje del producto	máx. años		2
Almacenaje	rango de temperatura	°C	-20 - 40

\* Valores de especificación; su cumplimiento es objeto de control permanente.

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

Edición: 2009-09-04  
Edición previa: 2009-08-17

**LANXESS**  
Energizing Chemistry

**INFORMACIÓN DE PRODUCTO**  
**LEWATIT® MonoPlus M 500**



**Condiciones de funcionamiento recomendadas\***

		Unidades métricas	
Temperatura de trabajo		máx. °C	70
Rango de pH de trabajo			0 - 12
Altura de lecho		min. mm	800
Pérdida de presión específica	(15 °C)	aprox. kPa*h/m <sup>2</sup>	1,0
Pérdida de presión		máx. kPa	200
Velocidad lineal	carga	máx. m/h	60***
Velocidad lineal	contra lavado (20 °C)	aprox. m/h	7
Expansión del lecho	(20 °C, por m/h)	aprox. % vol.	11
Zona libre	contra lavado (externo / interno)	% vol.	80 - 100
Regenerante			NaOH
Regeneración a contra corriente	nivel	aprox. g/l	50
Sistema-WS	concentración	aprox. % en peso	2 - 4
Velocidad lineal	regeneración	aprox. m/h	5
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Regeneración a cocorrente	nivel	aprox. g/l	100
Regeneración a cocorrente	concentración	aprox. % en peso	3 - 5
Velocidad lineal	regeneración	aprox. m/h	5
Velocidad lineal	lavado	aprox. m/h	5
Consumo de agua de lavado	lento / rápido	aprox. BV	10

\* Las condiciones de operación recomendadas hacen referencia a la utilización del producto bajo condiciones de trabajo normales. Están basadas en ensayos en plantas piloto y datos obtenidos de aplicaciones industriales. No obstante, para calcular los volúmenes de resina necesarios para una instalación de Intercambio Iónico son precisos datos adicionales.

\*\*\* 100m/h para afino

INFORMACIÓN DE PRODUCTO  
LEWATIT® MonoPlus M 500



Información adicional y regulaciones

**Medidas de precaución**

Los oxidantes fuertes, p. Ej. el ácido nítrico, en contacto con las resinas de intercambio iónico pueden 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.

La información precedente, así como nuestro asesoramiento técnico –ya sea de palabra, por escrito o mediante ensayos se proporcionan según nuestro leal saber y entender, pero a pesar de ello se consideran como meras advertencias e indicaciones no vinculantes, también por lo que respecta a los posibles derechos de propiedad industrial de terceros. El asesoramiento no les exime a ustedes de verificar los datos suministrados –especialmente los contenidos en nuestras fichas de seguridad y en las fichas técnicas de nuestros productos – ni de comprobar si los productos son adecuados para los procedimientos o los fines previstos. La aplicación, el empleo y la transformación de nuestros productos y de los productos fabricados por ustedes sobre la base de nuestro asesoramiento técnico se efectúan fuera de nuestras posibilidades de control y radican exclusivamente en la esfera de responsabilidad de ustedes. La venta de nuestros productos se realiza según nuestras Condiciones Generales de Venta y Suministro en su versión actual.

Lanxess Deutschland GmbH  
BU ION  
D-51369 Leverkusen

[lewatit@lanxess.com](mailto:lewatit@lanxess.com)

[www.lewatit.com](http://www.lewatit.com)  
[www.lanxess.com](http://www.lanxess.com)

Este documento contiene información importante y debe ser leído por completo.

Edición: 2009-09-04  
Edición previa: 2009-08-17

### III-A. TABLA DE PRESUPUESTO

PRESUPUESTO PARA INVERSIÓN DEL PRESENTE PROYECTO								
No.	Cantidad	Uso	Item/ Descripción	Unidad	P. Unitario	IVA	P. Total	Proveedor
1	2	Elementos centrales del equipo	Tubo acrílico 90 x 13 cm + 4 bridas perforadas	Unidad	\$ 130,00	\$ 15,60	\$ 291,20	LELUPLASTIC S.A
2	2		Resinas aniónicas y catiónicas	Saco	\$ 148,40	\$ -	\$ 296,80	SOLVESA S.A
3	3		Kit cloruro, dureza, alcalinidad	Unidad	\$ 10,00	\$ -	\$ 30,00	Now Services Guayaquil S.A
4	1		Set medidor STD+ calibrador y Flujómetro 1-7 L/min	Unidad	\$ 155,60	\$ 18,67	\$ 174,27	Amazon Global Box
5	2		Tacho 30 gal gris + tapa	Unidad	\$ 27,45	\$ 3,29	\$ 61,49	PYCCA S.A
6	2		Tacho 10 gal azul + tapa	Unidad	\$ 8,75	\$ 1,05	\$ 19,60	PYCCA S.A
7	1		Bomba 0,5 HP <i>Mariolo</i>	Unidad	\$ 35,00	\$ -	\$ 35,00	Ferretería <i>Meza Ronquillo</i>
8	3		Cable No. 12	Metro	\$ 0,50	\$ -	\$ 1,50	Ferretería <i>Meza Ronquillo</i>
9	1		Malla de nylon negro	Unidad	\$ 0,94	\$ 0,11	\$ 1,05	DIPASO S.A
10	10	Trabajo de soldadura para estructuras metálicas	Tornillo No. 5 madera + roscas	Unidad	\$ 0,07	\$ -	\$ 0,70	Pernos Lumitec Ferretería
11	15		Tornillo No. 8 cemento + roscas	Unidad	\$ 0,30	\$ -	\$ 4,50	Ferretería SOLAFERR
12	4		Pernos No. 5 + roscas	Unidad	\$ 0,35	\$ 0,04	\$ 1,57	Ferrisariato S.A
13	1		Taco fisher tornillo no. 5	Funda	\$ 0,22	\$ 0,03	\$ 0,25	Ferrisariato S.A
14	1		Taco fisher tornillo no. 12	Funda	\$ 0,34	\$ 0,04	\$ 0,38	Ferrisariato S.A

15	14		Perno No.12 + roscas	Unidad	\$ 0,11	\$ 0,01	\$ 1,72	Kywi S.A
16	4		Pernos metal acero inoxidable	Unidad	\$ 0,70	\$ -	\$ 2,80	Ferretería Kennedy Norte
17	1		Tacho fisher no. 12 cemento	Funda	\$ 0,25	\$ 0,03	\$ 0,28	Kywi S.A
18	1		Broca no. 8 cemento	Unidad	\$ 1,00	\$ -	\$ 1,00	Comercial de Muebles Metálicos <i>El Gran Metal</i>
19	2		Broca 3/4"	Unidad	\$ 1,08	\$ 0,13	\$ 2,42	Kywi S.A
20	12		Placa de 10 x 10 cm esp. 3mm	Unidad	\$ 2,00	\$ -	\$ 24,00	Comercial de Muebles Metálicos <i>El Gran Metal</i>
21	4		Ángulo metal 1/8"	Metro	\$ 9,00	\$ -	\$ 36,00	Comercial de Muebles Metálicos <i>El Gran Metal</i>
22	1		Varilla metal 1/8"	Metro	\$ 3,00	\$ -	\$ 3,00	Comercial de Muebles Metálicos <i>El Gran Metal</i>
23	1		Pintura anticorrosiva esmalte azul	Litro	\$ 2,00	\$ -	\$ 2,00	Comercial de Muebles Metálicos <i>El Gran Metal</i>
24	1		Brocha de cerdas 1"	Unidad	\$ 1,00	\$ -	\$ 1,00	Comercial de Muebles Metálicos <i>El Gran Metal</i>
25	1		Mano obra soldadura	N/A	\$ 90,00	\$ -	\$ 90,00	N/A
26	4		Lija de agua	Unidad	\$ 0,37	\$ 0,04	\$ 1,66	Ferrisariato S.A
27	1		Lija sierra p. acero	Unidad	\$ 1,50	\$ -	\$ 1,50	Ferretería SOLAFERR
28	10		Soldadura	Varillas	\$ 0,70	\$ 0,08	\$ 7,84	Ferretería Kennedy Norte
29	1		Máquina de corte	Unidad	\$ 3,00	\$ 0,36	\$ 3,36	Ferretería Kennedy Norte
30	1		Conector 110-220 V	Unidad	\$ 6,00	\$ -	\$ 6,00	Ferretería Kennedy Norte
31	1		Enchufe 110-220 V	Unidad	\$ 6,00	\$ -	\$ 6,00	Ferretería Kennedy Norte

32	1		Varilla sold. 1/8"	Metro	\$ 2,24	\$ 0,27	\$ 2,51	Ferretería <i>Espinoza Bolco S.A</i>
33	4	Tuberías y accesorios	Tubería PVC rojo 3/4" x 6 m	Tubo	\$ 15,20	\$ -	\$ 60,80	Ferretería <i>Meza Ronquillo</i>
34	26		Codo 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 0,70	\$ -	\$ 18,20	Ferretería <i>Meza Ronquillo</i>
35	2		Codo 1" PVC rojo	Unidad	\$ 1,40	\$ 0,17	\$ 3,14	Kywi S.A
36	11		Unión tees 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 1,30	\$ -	\$ 14,30	Ferretería <i>Meza Ronquillo</i>
37	6		Unión tees 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 1,65	\$ 0,20	\$ 11,09	Ferrisariato S.A
38	2		Unión 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 0,59	\$ 0,07	\$ 1,32	Ferretería <i>Espinoza Bolco S.A</i>
39	2		Adaptador 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 3,25	\$ -	\$ 6,50	Ferretería <i>Meza Ronquillo</i>
40	2		Adaptador 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 2,50	\$ 0,30	\$ 5,60	Kywi S.A
41	2		Adaptador 1" PVC rojo	Unidad	\$ 4,89	\$ 0,59	\$ 10,96	Kywi S.A
42	1		Adaptador 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 2,22	\$ 0,27	\$ 2,49	Ferrisariato S.A
43	2		Adaptador 3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 2,67	\$ 0,32	\$ 5,98	Ferrisariato S.A
44	2		Reductor 1"-3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 0,94	\$ 0,11	\$ 2,11	Ferrisariato S.A
45	2		Reductor 1"-3/4" PVC rojo	Unidad	\$ 1,08	\$ 0,13	\$ 2,42	Kywi S.A
46	5		Neplo 3/4" <i>sinfin</i> PVC rojo	Unidad	\$ 0,43	\$ 0,05	\$ 2,41	Ferretería <i>Espinoza Bolco S.A</i>
47	6		Neplo PVC rojo 3/4"x 6 cm	Unidad	\$ 0,28	\$ 0,03	\$ 1,88	Ferretería <i>Espinoza Bolco S.A</i>

48	2		Neplo 3/4" PVC rojo x 6 cm	Unidad	\$ 0,30	\$ 0,04	\$ 0,67	Ferretería Espinoza Bolco S.A
49	6		Nudo PVC rojo 3/4"	Unidad	\$ 1,68	\$ 0,20	\$ 11,29	Ferretería Espinoza Bolco S.A
50	2		Nudo PVC rojo 3/4"	Unidad	\$ 1,83	\$ 0,22	\$ 4,10	Kywi S.A
51	4		Válvula metal globo 3/4"	Unidad	\$ 5,40	\$ -	\$ 21,60	Ferretería Meza
52	6		Válvula bola PVC 3/4"	Unidad	\$ 2,67	\$ 0,32	\$ 17,94	Ferrisariato S.A
53	3		Válvula check vertical 3/4"	Unidad	\$ 4,31	\$ 0,52	\$ 14,48	Ferretería Espinoza Bolco S.A
54	2		Teflón industrial tipo rojo x 20 m	Unidad	\$ 0,22	\$ 0,03	\$ 0,49	Ferrisariato S.A
55	2		Teflón industrial amarillo x 20 m	Unidad	\$ 0,93	\$ 0,11	\$ 2,08	Ferretería Espinoza Bolco S.A
56	3		Teflón industrial tipo rojo x 20 m	Unidad	\$ 0,31	\$ 0,04	\$ 1,04	Ferrisariato S.A
57	3		Teflón industrial rojo x 50 m	Unidad	\$ 1,08	\$ 0,13	\$ 3,63	Kywi S.A
58	3		Teflón industrial amarillo x 50 m	Unidad	\$ 1,30	\$ -	\$ 3,90	Ferretería Meza Ronquillo
59	1		Tarraja semiindustrial	Unidad	\$ 5,95	\$ -	\$ 5,95	Ferretería Meza Ronquillo
60	3		Permatex pasta tubos PVC	Unidad	\$ 5,00	\$ -	\$ 15,00	Ferretería Kennedy Norte
61	1		Guantes de lana	Par	\$ 3,29	\$ 0,39	\$ 3,68	Ferrisariato S.A
62	2	Regeneración de resinas	Hidróxido de sodio, escamas	Kilo	\$ 1,68	\$ 0,20	\$ 3,76	Ferrisariato S.A
63	2		Ácido clorhídrico QP	Litro	\$ 35,00	\$ 4,20	\$ 78,40	LABOMERSA S.A
64	1	Logística y	Flete transporte materiales a ESPOL	N/A	\$ 20,00		\$ 20,00	N/A

65	50	transporte	Movilizaciones diarias	Pasaje	\$ 0,25		\$ 12,50	N/A	148
66	4	Pulido y presentación final	Letreros 30 x 10 cm	Unidad	\$ 2,50		\$ 10,00	Correos de Ecuador	
67	2		Letreros 12 x 9 cm	Unidad	\$ 1,50		\$ 3,00	Correos de Ecuador	
68	3		Spray azul	Unidad	\$ 2,50	\$ 0,30	\$ 8,40	Ferrisariato S.A	
69	1		Gigantografía 90 x 120 cm	Unidad	\$ 12,00			Gigantografias Lacapo	
							<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1.502,52</b>	

IV-A. LIMITES DE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO,  
TULSMA CAP.6

TABLA 9. Límites de descarga al sistema de alcantarillado público

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y grasas	Solubles en hexano	mg/l	70,0
Explosivos o inflamables.	Sustancias	mg/l	Cero
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN <sup>-</sup>	mg/l	1,0
Cinc	Zn	mg/l	10,0
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo	mg/l	0,1
Cobalto total	Co	mg/l	0,5
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Cromo Hexavalente	Cr <sup>6+</sup>	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO <sub>5</sub>	mg/l	250,0
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	500,0
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Fósforo Total	P	mg/l	15,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Hierro total	Fe	mg/l	25,0
Manganeso total	Mn	mg/l	10,0
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,01
Niquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	60,0
Organofosforados	Especies Totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,5
Plomo	Pb	mg/l	0,5
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,5
Sólidos Sedimentables		ml/l	20,0
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	220,0
Sólidos totales		mg/l	1 600,0
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg/l	400,0
Sulfuros	S	mg/l	1,0
Temperatura	°C		< 40,0
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	2,0
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0

**VI-A MATERIAL FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN  
DEL DESMINERALIZADOR**































REGENERANTE  
CATIONICO

HCl 4%

REGENERANTE  
ANIONICO

NaOH 3%

UNIDAD DE INTERCAMBIO IONICO  
KELVIN TINOCO  
NADIA SOLORZANO

TANQUE DE  
ALIMENTACION  
TK-101

TANQUE DE  
REACCION  
TK-

AREA DE  
27 C

DIG

KIT DE REACTIVOS  
PARA ANALISIS  
DE AGUAS