

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA DESMINERALIZADA  
EN UN COMPLEJO MEJORADOR DE CRUDO EXTRAPESADO”**

**REALIZADO POR:**

**DAYANA CAROLINA AGUILAR RODRIGUEZ**

**Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito  
parcial para optar al título de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

Barcelona, julio de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA DESMINERALIZADA  
EN UN COMPLEJO MEJORADOR DE CRUDO EXTRAPESADO”**

**ASESORES**

---

Ing. Químico Yuvi Moreno, Esp.  
Asesora académica

---

Ing. José Antonio Peña Sequera.  
Asesor industrial

Barcelona, julio de 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AGUA DESMINERALIZADA  
EN UN COMPLEJO MEJORADOR DE CRUDO EXTRAPESADO”**

**JURADOS**

---

Ing. Químico Yuvi Moreno, Esp.  
Asesora académica

---

Ing. Químico Hector Silva, M. Sc.  
Jurado Principal

---

Ing. Químico Lucas Álvarez, Ph. D  
Jurado Principal

Barcelona, julio de 2011

## RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado:

***“Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización”.***

## DEDICATORIA

A **Dios**, principalmente por haberme dado el derecho a la vida, guiarme en el logro de esta meta, permitir que sea una persona sana y completa con todos mis sentidos y además, por regalarme tantas aptitudes y capacidades que me han servido de muchísimo para defenderme en la vida.

A mis padres, **Horacio Aguilar y Gloria Rodríguez**, por toda su paciencia y sacrificio de quienes siempre recibí apoyo, colaboración y estímulo.

A mi novio, **Yocguitt C. Rodríguez D.**

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar a **Dios**, por iluminar mi vida, guiarme y ponerme en el camino a las personas que contribuyeron a mi crecimiento académico y personal, ayudándome a cumplir mi primera meta de muchas más que vendrán.*

*A mis padres **Horacio S. Aguilar H. y Gloria Rodríguez**, gracias por permitirme conocer el mundo y darme siempre todo su apoyo, por confiar en mí y por todo el sacrificio que han hecho para el logro de esta meta; son mi guía a seguir en el transcurso de mi vida, los amo.*

*A mi novio **Yocguitt Rodríguez**, por su paciencia y comprensión, dándome ánimos siempre para seguir adelante en la vida y en el logro de esta meta, se convirtió en mi compañero en todo momento brindándome todo su apoyo; te quiero mucho.*

*A todo el resto de **mi familia**, que aunque no estuvieron presentes siempre estuvieron pendientes para que lograra esta grandiosa meta.*

*A la empresa **PDVSA-Petrocedeño**, por permitirme realizar las pasantías de grado y ofrecerme esta primera experiencia profesional, la cual me sirvió de mucho para empezar a conocer el campo donde en un futuro podría desenvolverme.*

*Al superintendente de laboratorio del mejorador, **Luis Guzmán**, quien además de su grandiosa amistad me enseñó muchas cosas que las pondré en práctica durante el resto de mi vida; lo aprecio mucho.*

*A todo el personal que labora en el área de servicios técnicos, específicamente el departamento de procesos, los Ingenieros José A. Peña S. (mi asesor industrial), Luis Durán, Manuel Oliveira, Rosemary Sacarias, Elizama Patiño, Luis Guerra, Luis Álvarez, Merhym Coscorrosa, Xionel Palomo, Desiree Hurtado, María Acosta, además del personal de operaciones, laboratorio y técnicos de campo.*

*A mi asesora académica Ing. Yuvi Moreno, profesora y amiga. Por su aporte profesional como asesor, por su gran aporte personal en el desarrollo de mi camino en la UDO y por sus espléndidas clases.*

*A todos mis profesores de la universidad, quienes me llenaron de todos sus conocimientos.*

*A mis panas de la universidad, quienes se convirtieron en más que compañeros de clases sino en mis amigos, Ninoska Bello, Roxiluy Galue, Lorena Pérez, Vladimir Blanco y todos los compañeros que formaron parte de esta vida universitaria, tanto a nivel de estudio, amistad y rumbas.*

## RESUMEN

Para evaluar el proceso de producción de agua desmineralizada del mejorador Petrocedeño, se realizó una identificación de todas las variables que intervienen en el proceso para conocer cómo se monitorea y controla, se revisó el funcionamiento de todos los componentes del sistema de filtración e intercambio iónico mediante un levantamiento en campo, verificando las condiciones de operatividad de los equipos, válvulas y analizadores. Además se compararon las condiciones de operación actual de la unidad de desmineralización con las condiciones de diseño, a través de los programas de registro virtual denominados M-Pro y PI System, que posee la empresa. Por medio de una prueba de campo realizada al tren B de intercambio iónico y la información suministrada a una empresa especialista de resinas para que realizara una simulación del sistema de desmineralización, se verificó la carga promedio de agua producida y los parámetros de calidad del agua. A través de la evaluación realizada se pudo determinar que el proceso de producción de agua desmineralizada presenta fallas para efectuar el retrolavado de los filtros ya que solo se utiliza agua, en lugar de agua y aire como lo establece el diseño; en los trenes de intercambio iónico no se está haciendo la regeneración e inyección de químicos regenerantes a los tiempos y concentraciones adecuados establecidos por diseño, trayendo como consecuencia que la calidad del agua esté fuera de los parámetros de control, arrojando porcentajes de desviación para el pH, la conductividad, la dureza y el sílice de 4,767%, 20,145%, 35,147% y 35,00%, respectivamente. Por medio de la simulación se obtuvo que el tiempo del ciclo de operación de cada tren es de 22,58 horas, de acuerdo con el volumen de carga de resina especificado por diseño. En el tren C, se estima que el nivel de resina se encuentra a la mitad, por lo cual el tiempo de ciclo disminuye a 10,82 horas aproximadamente. Finalmente, se realizaron cuatro propuestas en base al estudio y comportamiento observado en toda la unidad; para la primera se hizo énfasis en el mejoramiento del sistema de operación en línea, como controladores y analizadores; la segunda, la activación completa de la fase de retrolavado y regeneración de los filtros de carbón activado; la tercera, el chequeo periódico de la calidad o eficiencia de las resinas de intercambio iónico; y para la cuarta, se propuso una actualización del programa para la rutina de análisis del agua del sistema.

## CONTENIDO

PÁGINA DE AUTOR.....	¡Error! Marcador no definido.
PÁGINA DE ASESORES.....	¡Error! Marcador no definido.
PÁGINA DE JURADOS .....	¡Error! Marcador no definido.
RESOLUCIÓN .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
RESUMEN .....	vii
CONTENIDO.....	viii
LISTA DE TABLAS .....	¡Error! Marcador no definido.
LISTA DE FIGURAS .....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO I .....	1
1.1 Reseña histórica de la empresa.....	1
1.2 Misión y visión de la empresa .....	4
1.3 Planteamiento del problema.....	5
1.4 Objetivos .....	8
1.4.1 Objetivo general .....	8
1.4.2 Objetivos específicos.....	8
CAPÍTULO II .....	9
2.1 Antecedentes .....	9
2.2 Definiciones básicas.....	10
2.3 Características del agua .....	12
2.3.1 Propiedades del agua.....	12
2.3.2 Impurezas presentes en el agua .....	13
2.4 Fundamentos de la desmineralización.....	14
2.5 Proceso de filtración.....	14
2.6 Proceso de intercambio iónico .....	15
2.6.1 Resinas de intercambio iónico .....	16
2.6.1.1 Estructura de las resinas de intercambio iónico .....	16
2.6.1.2 Tipos de resinas .....	19
2.6.1.3 Regeneración de las resinas de intercambio iónico.....	23
2.6.1.4 Vida útil de las resinas de intercambio iónico.....	23
2.7 Descripción de la unidad de producción de agua desmineralizada del complejo mejorador Petrocedeño.....	24
2.7.1 Equipos de la unidad de desmineralización .....	24
2.7.1.1 Filtros de carbón activado (06-V-30-01 A/B/C/D/S).....	24
2.7.1.2 Intercambiadores catiónicos (06-V-30-02 A/B/C).....	26
2.7.1.3 Descarbonatadores (06-V-30-03 A/B/C) .....	27
2.7.1.4 Bombas de transferencia del descarbonatador (06-P-30-01 A/S1/B/S2/C/S3).....	27
2.7.1.5 Intercambiadores aniónicos (06-V-30-04 A/B/C).....	27



2.7.1.6 Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada (06-T-30-02) ..	28
2.7.2 Descripción general del proceso .....	28
2.7.3 Proceso de desmineralización de la unidad.....	31
2.7.4 Proceso de regeneración catiónica en contra-corriente de la unidad .....	34
2.7.5 Proceso de regeneración aniónica en contra-corriente de la unidad.....	35
CAPÍTULO III .....	38
3.1 Identificación de las variables que intervienen en el proceso de producción de agua desmineralizada .....	38
3.1.1 Visualización del proceso de desmineralización de agua.....	38
3.1.1.1 Variables operacionales asociadas al sistema de filtración de carbón activado.....	39
3.1.1.2 Variables operacionales asociadas al sistema de intercambio iónico..	40
3.2 Revisión del funcionamiento de todos los componentes de los sistemas de filtración de carbón activado y de intercambio iónico.....	42
3.3 Comparación de las condiciones de operación actual de la unidad con las condiciones de diseño.....	46
3.4 Detección de las desviaciones operacionales que causan que el proceso disminuya su eficiencia o producción.....	66
3.4.1 Análisis de simulación de los trenes de desmineralización .....	66
3.4.2 Análisis del tren B de desmineralización de agua.....	68
3.5 Propuesta de las acciones necesarias para la producción de agua desmineralizada con la calidad requerida.....	73
CAPÍTULO IV.....	74
4.1 Identificación de las variables que intervienen en el proceso de producción de agua desmineralizada .....	74
4.2 Revisión del funcionamiento de todos los componentes de los sistemas de filtración de carbón activado y de intercambio iónico.....	78
4.3 Comparación de las condiciones de operación actual de la unidad con las condiciones de diseño.....	82
4.3.1 Sistema de filtración de agua .....	82
4.3.2 Trenes de desmineralización de agua .....	89
4.4 Detección de las desviaciones operacionales que causan que el proceso disminuya su eficiencia o producción.....	101
4.4.1 Resultados de la simulación con el programa Lewatit .....	101
4.4.2 Seguimiento operacional del tren B .....	102
4.5 Propuesta de las acciones necesarias para la producción de agua desmineralizada con la calidad requerida.....	107
4.5.1 Mejoramiento del sistema de operación en línea de la unidad de desmineralización de agua.....	108
4.5.2 Activación completa de la fase de retrolavado y regeneración en los filtros de carbón activado .....	109
4.5.3 Inspección de las resinas catiónicas y aniónicas de los trenes de intercambio iónico.....	110

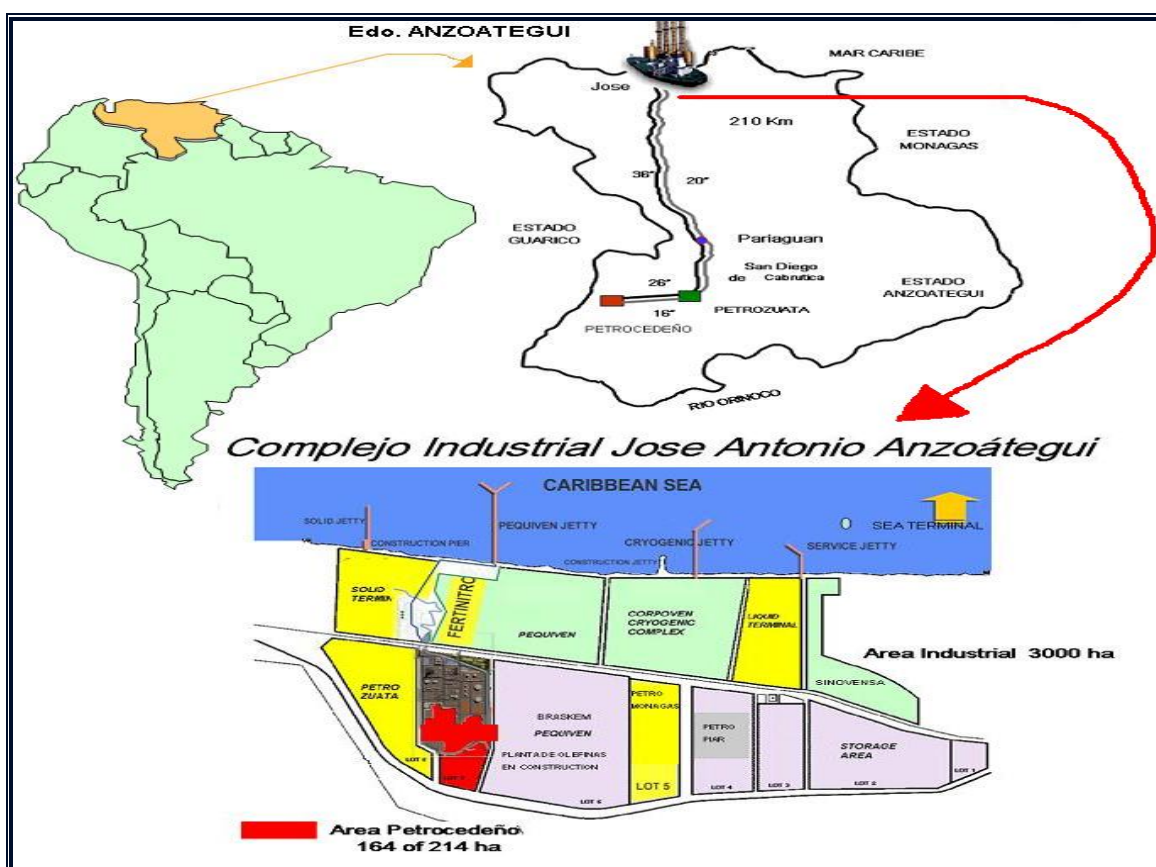
4.5.4 Actualización del programa para la rutina de análisis de las muestras de agua del sistema de producción de agua desmineralizada .....	111
4.6 Conclusiones.....	114
4.7 Recomendaciones.....	116
BIBLIOGRAFÍA .....	117
ANEXOS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Anexo A Diagramas de tubería e instrumentación (DTI's).....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Anexo B Tablas complementarias .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Anexo C Reportes de la simulación.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Anexo D Registro fotográfico de la planta .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO .....	119

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Reseña histórica de la empresa

El proyecto Petrocedeño comenzó en noviembre de 1997 como una asociación entre Maraven (ahora PDVSA con 60% de las acciones), Total (empresa francesa, con 30,3%), y StatoilHydro (empresa noruega, con 9,7%), para formar Sincrudos de Oriente (SINCOR) C. A. La asociación obtuvo rápidamente el financiamiento para iniciar la construcción de la planta de producción, concluida en febrero del 2001, y el complejo mejorador, finiquitado en marzo del 2002, tras tres años de labor, que constituyó consecuente el arranque de la planta de servicios industriales, hidrógeno y las unidades de destilación atmosférica (CDU), torre de destilación al vacío (UDV) y coquificación retardada (DCU), con la entrada por primera vez de crudo diluido a la planta. Una excepcional obra de ingeniería construida en un área de más de 200 hectáreas ubicada en el Complejo Industrial Petrolero y Petroquímico General de División José Antonio Anzoátegui, en la carretera nacional de la Costa, en el sector Jose del estado Anzoátegui (Figura 1.1) (**SINCOR, 2001**).



**Figura 1.1 Ubicación geográfica de las instalaciones de Petrocedeño (SINCOR, 2001).**

Posteriormente, se firmó el acuerdo para comercializar el crudo Zuata Sweet con la Ultramer Diamond Shamorck, incluyendo el coque y el azufre, que permite impulsar a Petrocedeño en pro de sus objetivos administrativos y operacionales, a través de la primera carga de coque el 8 de marzo del 2002 y el alcance de las primeras 300 toneladas/hora de Zuata Sweet el 13 de marzo del mismo año.

La inauguración de la planta del Mejorador se realizó el 20 de marzo del 2002, y el 28 del mismo mes se efectuó el primer embarque en el tanquero North Ocean con 1.269.469 barriles de crudo mejorado pautando la vigencia de 35 años del convenio de operación. En julio de ese año salió el primer embarque de azufre líquido, con 21 mil toneladas métricas en el buque Aurora, propiedad de Petrocedeño y en agosto, el primer despacho de coque, con 51.600 toneladas en el carguero M. W. Konavle.

En el transcurso del resto del 2002 se estabilizaron las plantas, lo que permitió llegar a los niveles de producción esperados; se culminó e inauguró la planta de

manejo de sólidos y el terminal de manejo de sólidos. En el 2003, fueron iniciados los preparativos para la parada de planta 2004, inaugurando a su vez el centro de adiestramiento e iniciando la prueba de completación con una meta de producir 13,1 millones de Zuata Sweet en 90 días continuos, meta que se cumplió antes de la fecha fijada y en el primer intento.

En enero de 2004 se realizó la parada total por 45 días, actividad altamente planificada que permitió generar un mayor aprendizaje para el proyecto de mejoramiento de crudo y comportamiento de las unidades del complejo, a través de la actualización de criterios y realización de una exhaustiva evaluación y labor de mantenimiento profunda, el reemplazo de catalizadores y eliminación de cuellos de botella, siendo ésta la base de la planificación de las paradas consecuentes, la parada menor del 2008 y los procedimientos de mantenimiento.

Para el mes de septiembre del 2007 surgió el cambio de nombre. SINCOR, una empresa modelo de asociaciones estratégicas, pasó a llamarse Petrocedeño debido al proceso de migración a empresas mixtas.

Luego, iniciada el 25 de febrero del 2008, la parada mayor de planta con una duración de siete semanas (49 días), implicó sacar de servicio todas las unidades de proceso del mejorador. Durante este tiempo participaron más de 4.000 trabajadores entre los que se encontraban técnicos y artesanos certificados en diversas áreas, 800 supervisores y especialistas contratados, y 60 representantes de PDVSA y sus empresas mixtas; así como de CITGO, gracias a la integración que permite ahora el que todas estas operadoras de la Faja Petrolífera del Orinoco sean filiales de PDVSA. En el aspecto técnico, se contó igualmente en todo momento con la presencia de representantes de las dos otras empresas socias, Total y StatoilHydro (**SINCOR, 2001**).

Actualmente Petrocedeño no se encuentra totalmente operativa, debido a que el tren 50 de la unidad de manufactura de hidrógeno (HMU) y la unidad de hidrocrqueo retardado (MHC) están fuera de servicio; se espera que para el mes de septiembre de 2011 vuelvan a trabajar normalmente.

Cabe destacar que el mejorador no está produciendo su producto principal Zuata Sweet; únicamente productos secundarios como lo son: Zuata medium, Zuata 300 y Zuata (VR).

## 1.2 Misión y visión de la empresa

La misión define las tareas y objetivos globales de Petrocedeño. Por medio de su participación en el desarrollo de la Faja del Orinoco, la misión de Petrocedeño es maximizar el valor de los accionistas mediante la mejora continua en el desempeño de sus operaciones, mientras genera beneficios para Venezuela y mejora el desarrollo de las comunidades locales donde Petrocedeño está presente **(SINCOR, 2001)**.

La visión consiste en una serie de afirmaciones seleccionadas que describen a dónde Petrocedeño quiere llegar y qué se espera tanto de esta empresa como de sus empleados para poder alcanzar la misión. Será reconocida como la compañía líder en la producción y mejoramiento de crudo pesado; además tendrá un desempeño superior al de otras compañías (y asociaciones) comparables de crudo pesado en indicadores específicos. Tendrá una eficiente organización orientada al negocio, la cual será capaz de maximizar el valor para sus accionistas y la sociedad. Será una compañía de mejoras continuas, que proveerá a sus empleados un ambiente retador y dentro de una organización para el aprendizaje. Desarrollará todas sus actividades con un gran sentido de responsabilidad por el ambiente y la seguridad. Estará comprometida con el desarrollo de todos sus empleados los cuales también estarán comprometidos con el cumplimiento de la visión de dicha empresa.

Su actividad medular es producir crudo extrapesado, mejorarlo y comercializarlo bajo la denominación de Zuata Sweet, crudo mejorado de amplia aceptación en los mercados internacionales, junto a los productos alternos derivados de este proceso. Sus oficinas principales se encuentran en Caracas, Venezuela, y sus áreas de proceso son la estación principal de producción en San Diego de Cabrutica y el complejo mejorador ubicado en Jose.

El complejo mejorador tiene la capacidad de producir hasta 180 MBD de Zuata Sweet a partir de 200 MBD de crudo diluido enviados a través de un oleoducto desde la estación principal a unos 210 Kilómetros de distancia. En el proceso de mejoramiento también se obtienen 6 mil toneladas diarias de coque y 1.000 toneladas diarias de azufre. Esta planta de mejoramiento consta de unidades diseñadas con tecnología de punta para realizar procesos de destilación atmosférica y al vacío, coquificación retardada, hidrotratamiento, hidrocraqueo, manufactura de hidrógeno,

recuperación de azufre, tratamiento de gas de cola, despojadoras de aguas agrias, y almacenamiento y transporte de coque y azufre para despacho a buques (Figura 1.2).

Toda esta labor ha sido ejecutada por un equipo integrado que permite asegurar como resultado el logro de una producción confiable y sustentable, dentro de las regulaciones tanto ambiental como de calidad (SINCOR, 2001).

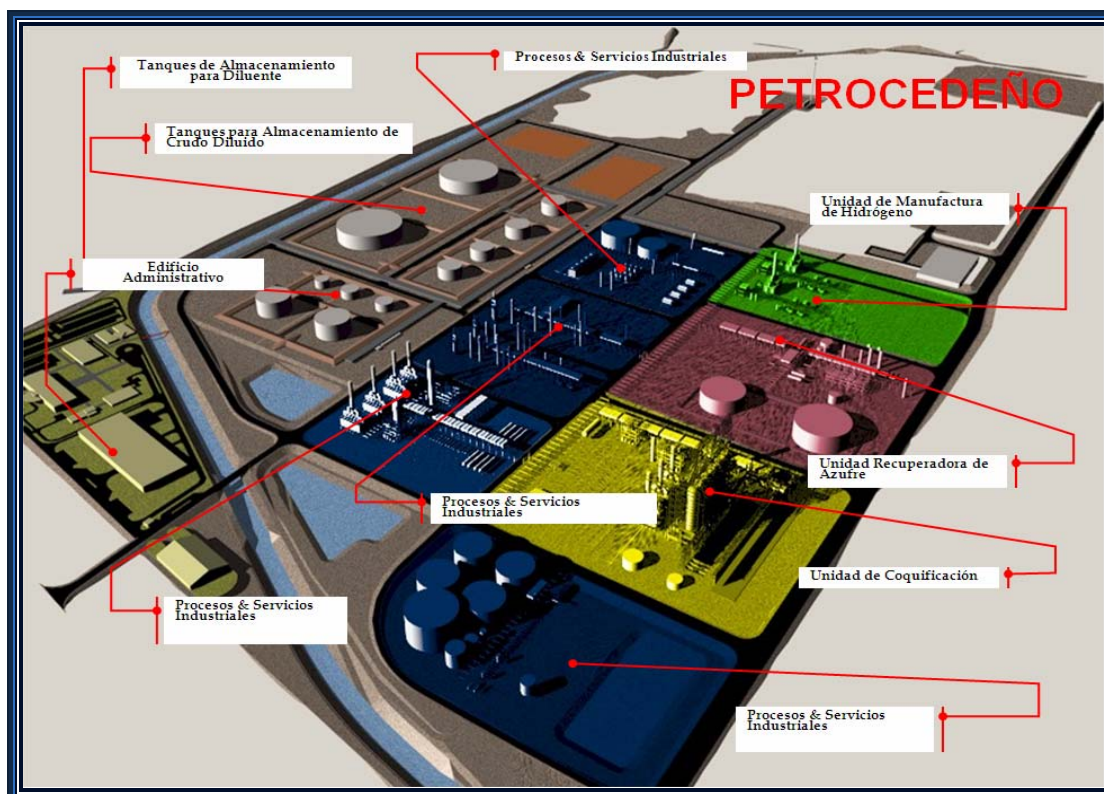


Figura 1.2 Disposición de las instalaciones del complejo mejorador (SINCOR, 2001).

### 1.3 Planteamiento del problema

PDVSA Petrocedeño es una empresa que se encarga de la exploración, extracción, producción, mejoramiento y comercialización del crudo extrapesado. Posee tres áreas estratégicas que son: extracción localizada en Zuata, producción ubicada en San Diego de Cabrutica y mejoramiento en el Complejo Industrial Petroquímico y Petrolero Gral. de División José Antonio Anzoátegui. El complejo mejorador de Petrocedeño cuenta con más de 200 hectáreas de terreno y está dividido en cuatro grandes áreas:

Área 1: donde se encuentran las unidades de procesos de desalación, destilación atmosférica y vacío, coquificación retardada y recuperación de gases; área 2: donde se tienen las unidades de hidroprocesos, recuperación de aminas y azufre; área 3: donde están las unidades de servicios industriales y área 4: donde se ubican las unidades de manejo de sólidos.

En estas áreas se transforma el crudo diluido de 17°API y alto contenido de azufre a un crudo de mayor gravedad API y dulce, mediante una serie de procesos a los cuales es sometido para recuperar el diluyente (nafta) que se recircula a los pozos de perforación, y obtener 180 MBD del principal producto Zuata Sweet Crude Oil, el cual es un crudo liviano y dulce (30-32°API), a partir de los 200 MBD de crudo extrapesado de 8° API, provenientes de la estación principal en San Diego de Cabrutica. Durante el proceso de mejoramiento también se obtienen 6.000 toneladas por día de coque y 1.000 toneladas por día de azufre, destinados al mercado internacional, elevando su valor comercial con el fin de mejorar el desarrollo endógeno del país.

En el área de servicios industriales del mejorador Petrocedeño se encuentra la unidad de producción, almacenamiento y distribución de agua desmineralizada (U-6300), la cual suministra a las calderas agua despojada de sus componentes orgánicos y minerales. En esta unidad, el agua es usada principalmente como agua de alimentación al desaireador de las calderas de la unidad de servicios y para la producción de vapor en los reformadores de producción de hidrógeno.

Para purificar el agua en la unidad de desmineralización se utiliza el proceso de intercambio iónico. Inicialmente para remover los compuestos orgánicos disueltos y una gran parte de cloro, se realiza una filtración en filtros de carbón activado; seguidamente el agua pasa a través de intercambiadores catiónicos para la remoción de los iones positivos, luego por una torre de descarbonatación para la remoción del gas carbónico (CO<sub>2</sub>) y finalmente, por los intercambiadores aniónicos para remover los iones negativos, obteniéndose el agua desmineralizada que es transportada al tanque de almacenamiento, el cual abastece a las diferentes áreas donde es indispensable su uso.

Por situaciones operacionales y/o mal estado en que se encuentran actualmente las instalaciones, las condiciones de operación de la unidad han variado, notándose



gran diferencia en la calidad de la producción de agua desmineralizada. Analizando el comportamiento histórico de esta unidad, se pudo observar que a partir de marzo del 2008 la producción de agua desmineralizada empezó a variar sus especificaciones, notándose además variación de la caída de presión en los filtros de carbón, fugas de carbón activado en dichos filtros y pase de resina en el descarbonatador de los trenes de desmineralización. Como consecuencia de todas estas fugas y pases, los drenajes ubicados cerca de los filtros y los trenes se han obstruido, ocasionando taponamiento de los mismos, evitando que el sistema trabaje en condiciones favorables para la ejecución de todo el proceso.

Con base en lo expuesto anteriormente, surge la necesidad de realizar una evaluación al proceso de producción de agua desmineralizada, iniciando con la identificación de todas las variables que intervienen en el proceso de producción de agua desmineralizada, para luego poder tomar datos de dichas variables identificadas, durante un período de 6 meses, y de esta manera reconocer cuáles son los posibles problemas que ocurren desde el punto de vista operacional y de procesos. Se revisó el funcionamiento de todos los componentes del sistema de filtración de carbón activado y el sistema de intercambio iónico, para observar el estado o funcionamiento de los equipos e instrumentos que intervienen en dichos sistemas e identificar el origen de las fallas mencionadas anteriormente. Además se analizarán los posibles cambios e incorporaciones si es necesario, de nuevos instrumentos que ayuden a la mejora de ambos sistemas de la unidad de agua desmineralizada.

Se comparó la condición de operación actual con la de diseño a fin de determinar la eficiencia de trabajo de cada uno de los equipos que forman parte la unidad; se detectaron desviaciones operacionales que causan que el proceso disminuya su eficiencia o producción, mediante un seguimiento al proceso de filtración y de regeneración de cada uno de los trenes de desmineralización, tanto desde el punto de vista operacional en campo como operacional en el control. Adicional a esto, se suministró la información a una empresa proveedora de resinas que realizó una simulación del sistema de intercambio iónico con el programa Lewatit, con el objeto de proponer mejoras a la unidad y las acciones necesarias para que la producción de agua desmineralizada sea con la calidad requerida.

Con la identificación del origen de las fallas y las propuestas de las posibles soluciones, si se acatan las recomendaciones, se logrará mejorar el funcionamiento y la eficiencia de la unidad de agua desmineralizada, evitando que ocurra contaminación de la misma o variación de la calidad requerida para las calderas y, por ende, se evitarían paradas no programadas en el sistema de generación de vapor.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Evaluar el proceso de producción de agua desmineralizada del complejo mejorador de crudo extrapesado PDVSA Petrocedeño.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Identificar las variables que intervienen en el proceso de producción de agua desmineralizada.
2. Revisar el funcionamiento de todos los componentes de los sistemas de filtración de carbón activado y de intercambio iónico.
3. Comparar las condiciones de operación actual de la unidad con las condiciones de diseño.
4. Detectar desviaciones operacionales que causan que el proceso disminuya su eficiencia o producción.
5. Proponer las acciones necesarias para la producción de agua desmineralizada con la calidad requerida.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Antecedentes**

**Luces** evaluó las oportunidades para mejorar el aprovechamiento de vapor, agua desmineralizada y condensados de una planta mejoradora de crudo extrapesado. Realizó balances de masa, tanto a condiciones de diseño como de operación, con el fin de mostrar la distribución de cada equipo, el consumo y generación de vapor y el agua de alimentación a las calderas y condensados dentro de cada unidad de procesos. Estos balances le sirvieron de base para la evaluación individual de cada equipo a través de una relación de flujos normalizados en función del tiempo de evaluación. Dicho análisis fue realizado a partir de la estimación de costos de producción tanto de vapor como de agua desmineralizada. **(Luces, 2009)**

**Itriago** elaboró los balances de masa de la unidad de agua cruda, sistemas de distribución de vapor y agua de alimentación a las calderas en un mejorador de crudo extrapesado. En la investigación identificó variables presentes en cada unidad, determinándose los valores de operación de dichas variables, utilizándose valores de diseño en el caso de algunas corrientes sin datos operacionales. En los sistemas que fueron objeto de estudio se observaron muchas fluctuaciones en cuanto a las desviaciones entre los flujos de entrada y salida producto de fallas en el sistema de medición, falta de datos operacionales debido a la carencia de medidores necesarios para cuantificar algunas corrientes, así como pérdidas en las trampas de vapor. **(Itriago, 2007)**

**Guape** propuso mejoras al sistema de dosificación de ácido sulfúrico de la planta de agua desmineralizada en SINCOR. El estudio se basó en el diagnóstico de la situación actual de los equipos, con el respaldo necesario de los registros de fallas, resultados de las inspecciones previas y del análisis de las condiciones operacionales, en contraste con las recomendaciones emanadas del fabricante de dichos equipos. Una vez identificadas las fallas más relevantes y de mayor impacto sobre la continuidad operacional, se realizó una serie de propuestas que buscaban mejorar el

desempeño del sistema, la reducción de riesgos asociados y mantener la calidad y el suministro confiable de agua desmineralizada a los usuarios. **(Guape, 2006)**

**Pinto**, diseñó un sistema de inyección de químicos para tratamiento de aguas de procesos. Se fundamentó en base a todas las exigencias y normas requeridas por Petrozuata C.A, así como criterios de caudal, presión, temperatura, disponibilidad y facilidad de instalación; logrando así cumplir los objetivos requeridos utilizando los materiales y equipos que cumplieran con los requerimientos operacionales ya establecidos y comprobando mediante cálculos realizados que éstos soportan las condiciones operacionales exigidas del sistema. **(Pinto, 2004)**

**Moreno** comprobó el balance de agua cruda total y determinó el consumo de químicos utilizados en el sistema de agua de enfriamiento y en la unidad de desmineralización de Súper Octanos, C.A., Jose-Edo. Anzoátegui. Realizó un balance de masa en el sistema de enfriamiento para determinar el flujo de reposición, el cual al sumarlo con la alimentación de la unidad de desmineralización proporciona el valor del agua cruda total alimentada a la planta. Luego realizó un seguimiento al proceso de regeneración de las resinas de intercambio iónico, revisándose el procedimiento utilizado y la instrumentación instalada; observó que las fallas existentes en la unidad de desmineralización se deben en su mayoría a problemas de instrumentación y que el procedimiento utilizado difiere respecto al recomendado en las etapas de retrolavado total y lavado final de ambos tipos de intercambiadores. **(Moreno, 2001)**

Los antecedentes descritos anteriormente comparten entre sí un objetivo en común: mejorar tanto las condiciones operacionales como el desempeño de las unidades relacionadas con la producción de agua desmineralizada para sus posteriores usos. He aquí la diferencia de este trabajo, ya que éste se concentra principalmente en la evaluación del sistema de desmineralización de agua, para verificar cuáles son las posibles fallas que presenta el proceso de producción; por lo que se plantean propuestas prácticas para solventar los problemas encontrados en el sistema.

## **2.2 Definiciones básicas**

### **2.2.1 Agua**

Es un compuesto químico formado por dos partes de hidrógeno y una parte de oxígeno, en volumen. Puede contener en solución o en suspensión a otros minerales sólidos, líquidos o gaseosos. Su fórmula es H<sub>2</sub>O.

### **2.2.2 Agua filtrada**

Es el agua que ya no contiene cloro residual ni sustancias orgánicas disueltas; es apta o satisfactoria para uso doméstico y para inicio de cualquier proceso en el que se necesite de la misma.

### **2.2.3 Agua desmineralizada**

También conocida como agua desionizada, es aquella a la cual se le han quitado los cationes, como los de sodio, calcio, hierro, cobre y otros, y aniones como el carbonato, fluoruro, cloruro, etc., mediante un proceso de intercambio iónico.

### **2.2.4 Filtración**

Es el proceso que consiste en pasar un líquido a través de un medio filtrante (el cual puede consistir de un material granular como la arena, tierra diatomácea o papel especialmente preparado), con el propósito de eliminar la materia suspendida o coloidal, de un tipo que generalmente no puede eliminarse por sedimentación.

### **2.2.5 Carbón activado**

Partículas de carbón que se obtienen generalmente por carbonización de material celulósico, en ausencia de aire. Se usa principalmente para el control de sabor y olor.

### **2.2.6 Intercambio iónico**

Es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Este proceso tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas.

### 2.2.7 Cation

ión positivo formado al perder un átomo o grupo de átomos, uno o más electrones.

### 2.2.8 Anión

ión cargado negativamente que se forma por la adición de electrones a átomos o moléculas.

### 2.2.9 Descarbonatador

Equipo perteneciente al tren de desmineralización que tiene como función liberar el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en el agua.

## 2.3 Características del agua

Las propiedades físicas más importantes del agua son la **temperatura**, sabor y olor. La temperatura es importante por sus efectos sobre otras propiedades, ya que es capaz de acelerar la velocidad de las reacciones, reducir la solubilidad de los gases e incrementar la regeneración de olores y sabores, que a su vez son propiedades subjetivas, difíciles de medir y se deben a la presencia de impurezas, frecuentemente orgánicas en la naturaleza **(Nalco, 1989)**.

### 2.3.1 Propiedades del agua

Existen cuatro propiedades químicas relevantes que pueden causar gran impacto sobre el comportamiento del agua en una planta industrial; estas son:

- ✓ **Conductividad eléctrica:** capacidad que tiene el agua para conducir electricidad; es proporcional a la cantidad de sales disueltas presentes en la misma, las cuales afectan directamente el potencial de corrosión e incrustaciones.
- ✓ **Dureza:** concentración de sales de calcio y magnesio en el agua. Estos minerales pueden precipitar y formar depósitos duros en los intercambiadores de calor, razón por la cual la dureza debe ser controlada cuidadosamente.
- ✓ **Alcalinidad:** capacidad del agua para neutralizar ácidos y se debe principalmente a la concentración de bicarbonatos, carbonatos y/o hidróxidos en la misma. Es una de las propiedades químicas más críticas del agua, ya que permite

determinar si ésta posee tendencia depositante o corrosiva. Si la alcalinidad es muy alta, se forman depósitos incrustantes y promueve la formación de espuma en las calderas, contribuyendo así al fenómeno de corrosión caústica, y si por el contrario es muy baja, puede causar corrosión.

- ✓ **Potencial de Hidrogeno (pH):** valor que expresa la concentración de iones hidronios ( $H^+$ ) en términos de potencia diez. Matemáticamente, es el menos logaritmo de la concentración de iones hidronios de una solución. La escala de medición es de 0-14, el valor medio (7) es considerado como el punto neutral, por debajo es ácido y por encima básico. Generalmente, los programas de tratamiento de agua prescriben el rango en el cual debe mantenerse el pH debido a que un valor alto incrementa el potencial de incrustación y un valor bajo aumenta el de corrosión (Nalco, 1989).

### 2.3.2 Impurezas presentes en el agua

A medida que la lluvia cae en la tierra y atraviesa el suelo, el agua se contamina con tres tipos de impurezas: gases disueltos, sólidos disueltos y sólidos suspendidos.

- ✓ **Gases disueltos:** las aguas superficiales tienen gran cantidad de gases disueltos provenientes de la atmósfera (oxígeno y dióxido de carbono). En los casos especiales puede contener sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano, pero esto es el resultado de procesos contaminantes. La presencia de estos gases requieren de cierta consideración ya que ellos le comunican al agua propiedades especiales que la pueden privar de su calidad.
- ✓ **Sólidos disueltos:** Son sustancias orgánicas e inorgánicas en solución y sales minerales solubles, procedentes de las rocas con las cuales ha estado en contacto el agua. Los minerales más comunes son calcio, magnesio, bicarbonatos, carbonatos, hierro, sílice, sulfatos, cloruros, etc., mientras que la presencia de nitratos y fosfatos se asocia a la contaminación procedente de los efluentes municipales e industriales.
- ✓ **Sólidos suspendidos:** son pequeñas partículas con un tamaño tal, que no sedimentan rápidamente y por el contrario, presentan un movimiento Browniano, es decir, un movimiento casual superpuesto a cualquier velocidad dirigida o de sedimentación de la partícula. Entre este tipo de sólidos se encuentran la materia

orgánica (microorganismos, grasas y aceites) y materia inorgánica (arcilla y polvo) **(Nalco, 1990)**.

#### **2.4 Fundamentos de la desmineralización**

El agua por lo general necesita ser acondicionada o pre-tratada para luego ser utilizada en algún proceso industrial o consumo doméstico. Sin embargo, existen procesos industriales tales como los sistemas de enfriamiento, generación de vapor, efluentes, etc., donde se requiere un acondicionamiento del agua muy específico relacionado cuantitativa y cualitativamente con los sólidos disueltos presentes.

El proceso de desmineralización consiste en la eliminación total de los iones presentes en el agua, tanto de origen catiónico como de origen aniónico, utilizando una serie de tratamientos tales como: evaporación/destilación, membranas (ultrafiltración, ósmosis inversa), precipitación química (cal en caliente) y por intercambio iónico. Este último se realiza mediante el uso de un conjunto de resinas de intercambio iónico, las cuales deben conformar un arreglo de forma que se pueda llevar a cabo el proceso en tres pasos principales **(Bayona, 1995)**:

- Reducción de cationes, en donde se utilizan resinas catiónicas fuerte y débil.
- Eliminación del  $\text{CO}_2$ , el dióxido de carbono que es desprendido como producto de la eliminación de los cationes asociados al ión bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ), se elimina por desgasificación del agua descationizada.
- Reducción de aniones, los aniones presentes son convertidos tanto en ácidos fuertes como débiles en la descationización, para eliminarlos se usan resinas aniónicas débiles y fuertes.

#### **2.5 Proceso de filtración**

La filtración es un proceso de separación de fases de un sistema heterogéneo, que consiste en pasar el agua a través de un medio poroso para remover los sólidos suspendidos y coloidales presentes en el agua y producir un efluente con una turbidez de hasta menos de 1 NTU. El medio poroso puede ser de arena, antracita, carbón y otros tipos de materiales granulares. También pueden ser materiales que no son granulares **(Lipesa, 1998)**.



La filtración se utiliza para optimizar la calidad del agua cuyo uso final puede ser: agua potable, influente de la suavización y/o desmineralización, agua de enfriamiento, procesos especiales, etc. **(Perry, 1988)**.

La filtración se realiza de la manera siguiente:

1. Un mecanismo de transporte que mueve las partículas hacia los espacios vacíos existentes en el medio filtrante de manera que puedan hacer contacto con la parte superior del medio filtrante o con las partículas ya retenidas en éste.
2. Un mecanismo de unión por medio del cual las partículas transportadas se adhieren a la superficie del medio filtrante o a las partículas existentes.
3. Un mecanismo de separación creado por las fuerzas hidrodinámicas del agua que está fluyendo por el lecho. Estas fuerzas separan parte de las partículas débilmente adheridas al medio filtrante o al depósito. Luego estas partículas separadas se mueven dentro del medio filtrante.

Una vez que las partículas llegan al medio filtrante, son retenidas por la fuerza de atracción. Para remover estas partículas el lecho del filtro es fluidizado con agua en flujo ascendente; esto es lo que se denomina retrolavado **(Lipesa, 1998)**.

## **2.6 Proceso de intercambio iónico**

El intercambio iónico puede ser definido como el intercambio reversible de iones entre una fase sólida y una líquida en el cual no hay un cambio permanente en la estructura del sólido. Es un método versátil y efectivo de acondicionar el agua de alimentación de calderas. El sólido es el material de intercambio iónico. Los cambios reversibles y no permanentes son puntos clave en esta definición y en el intercambio de iones. El intercambio de iones tiene aplicaciones importantes en el acondicionamiento del agua tal como ablandamiento y desionización. La gran utilidad del intercambio iónico depende de la capacidad para utilizar y reutilizar el material de intercambio. **(Gamma, 1990)**

El proceso se realiza con una resina de intercambio iónico, que no es más, que una macromolécula insoluble en agua, compuesta por una alta concentración de grupos pobres ácidos o básicos integrados a una matriz de un polímero sintético. Son

pequeñas esferas con un tamaño efectivo variable entre 0,40 y 1,0 mm. Tienen como objetivo intercambiar ciertos tipos de iones indeseables que están presentes en el agua, por iones deseables que están presentes en la resina. Una vez realizado el intercambio y por agotamiento en la resina de los iones deseables, se procede a realizar el proceso de regeneración con una solución concentrada de iones deseables para que éstos se queden en la resina y reiniciar el ciclo. **(Lipesa, 1998)**.

### **2.6.1 Resinas de intercambio iónico**

La zeolita de sodio, un compuesto natural, fue el primer material comercial de aplicación del intercambio iónico. Las zeolitas naturales han sido reemplazadas por zeolitas sintéticas y resinas orgánicas, de intercambio mayor, mejor resistencia al desgaste físico, estabilidad a la oxidación y al ataque químico y porosidad tal, que permite reducir el envenenamiento por sustancias orgánicas **(Gamma, 1990)**.

Las resinas de intercambio iónico son polielectrolitos entrecruzados, compuestos de una matriz tridimensional a la cual están unidas cargas eléctricas fijas (grupos iónicos activos). Las cargas de los grupos iónicos activos están balanceadas con un número equivalente de iones móviles con carga opuesta. La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante.

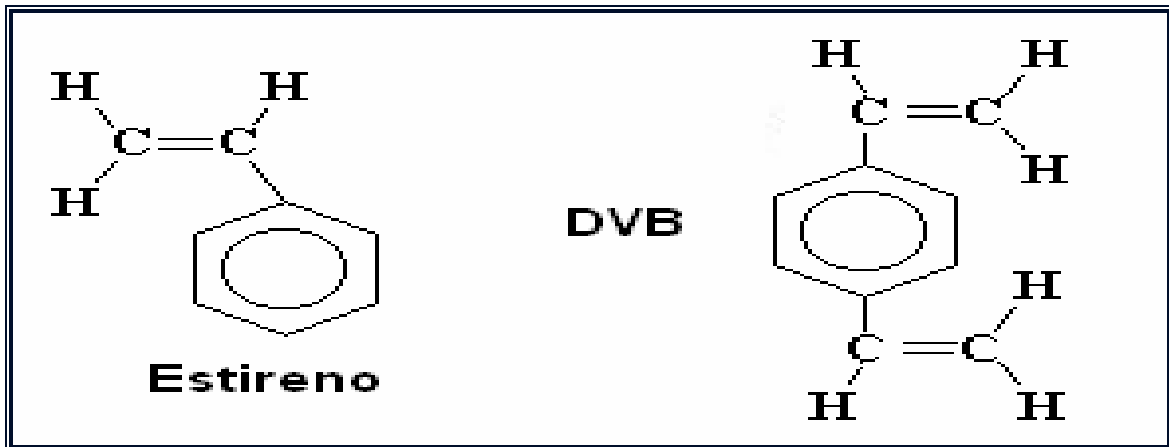
En el proceso de intercambio iónico es necesario que las resinas de intercambio se consideren como la unidad donde se llevan a cabo las reacciones químicas para la remoción de iones no deseables, y a su vez, son el medio donde se almacenan los iones retenidos, por esto es que están obligadas a presentar una serie de propiedades físicas y químicas para cumplir dichas funciones, entre estas se encuentran:

- ✓ Insoluble en las condiciones normales de empleo.
- ✓ Estructura estable frente a efectos mecánicos y químicos asociados con su uso.
- ✓ Volumen necesario para almacenar los iones retenidos.
- ✓ Distribución del tamaño de partícula uniforme, para minimizar la pérdida de presión durante el servicio.

#### **2.6.1.1 Estructura de las resinas de intercambio iónico**

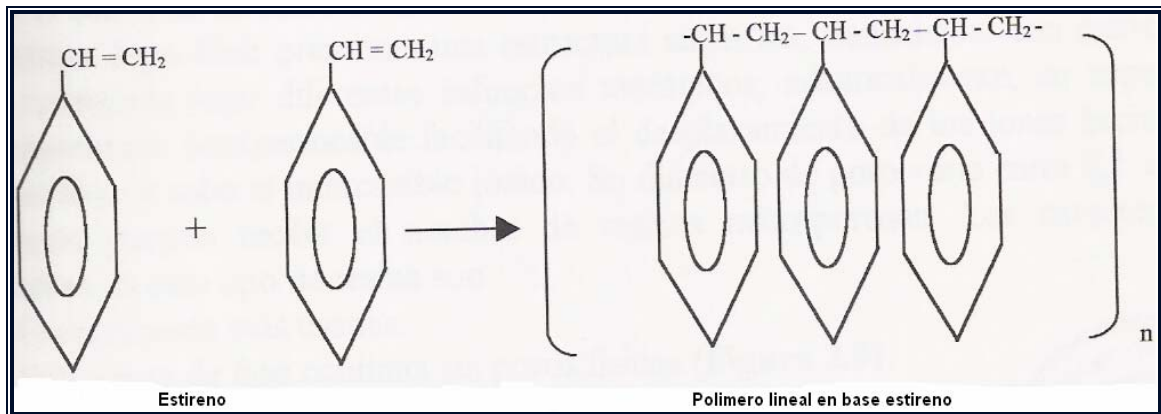
Las resinas comerciales más usadas se conforman, generalmente, por una estructura de red que hace el papel de cuerpo de la resina. Por lo general, la estructura sólida de

la resina proviene de la polimerización de sustancias orgánicas que mayormente son los monómeros estireno y divinilbenceno (DVB), los cuales presentan una estructura bien definida y gran estabilidad en todo el rango de pH (Figura 2.1).

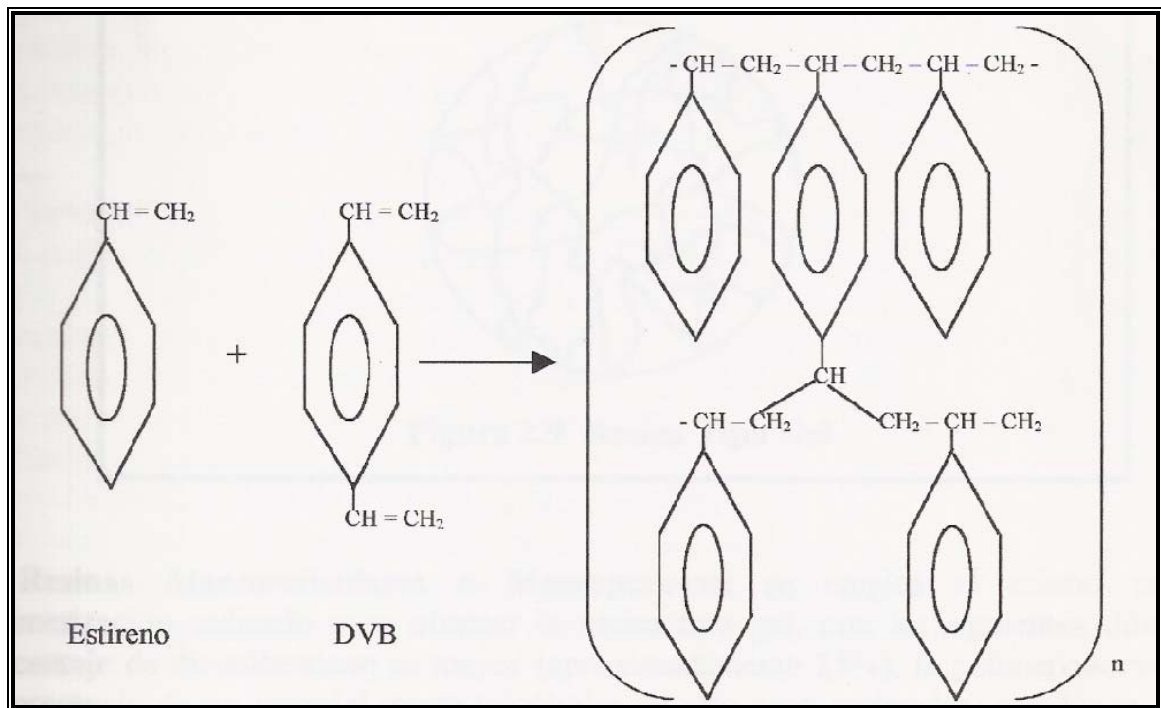


**Figura 2.1 Estructura del estireno y divinilbenceno**

De la polimerización del estireno se obtienen cadenas muy largas, generando esencialmente una estructura lineal (Figura 2.2), la cual presenta poca resistencia en presencia de solventes orgánicos empleados usualmente para preparar y dar forma a la resina. Si durante la polimerización del estireno se le añade una porción de divinilbenceno, cada molécula de éste iniciará separadamente la formación de dos cadenas de estireno. Como resultado, se obtendrá una serie de segmentos de cadenas interconectados en intervalos regulares, proporcionando una estructura tridimensional en forma de red que presenta mayor resistencia a los solventes orgánicos (Figura 2.3).



**Figura 2.2 Polimerización lineal del estireno.**



**Figura 2.3 Estructura de una resina de intercambio iónico.**

A la cantidad de divinilbenceno, normalmente entre 2 y 12% de la mezcla con estireno, añadida durante la polimerización se denomina “grado de reticulación” o entrecruzamiento, de esta proporción dependerán las características mecánicas de la resina en aspectos como dilatación, resistencia a la abrasión, dureza y forma. La resina que presente mayor grado de reticulación ofrecerá mayor resistencia mecánica, pero su capacidad de dilatación será menor.

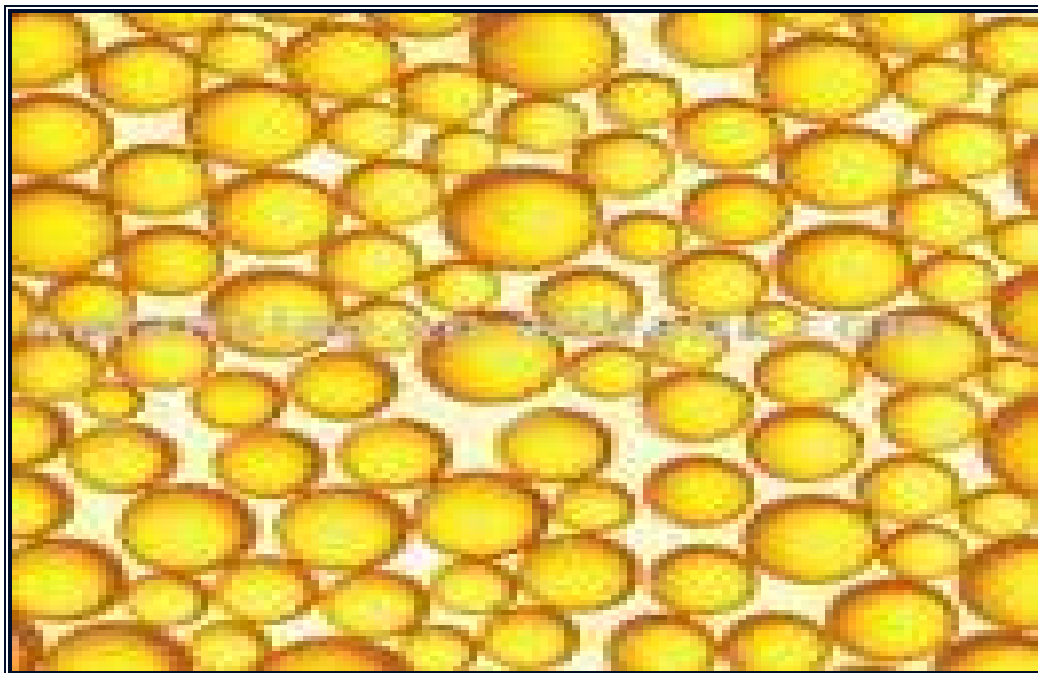
### 2.6.1.2 Tipos de resinas

#### A. Según el material de intercambio

##### ➤ Resinas tipo gel

Presentan una estructura simétrica, translúcida con cierta elasticidad y alta resistencia bajo diferentes esfuerzos mecánicos, adicionalmente, su superficie actúa como membrana semipermeable facilitando el desplazamiento de los iones hacia los puntos donde se lleva a cabo el intercambio iónico. Su diámetro de poro varía entre 0,5 a 2  $\mu\text{m}$  y por esta razón pueden recibir el nombre de resinas microporosas. Las características más importantes de este tipo de resina son:

- Comúnmente más usadas.
- Estructura de fase continua sin poros físicos (Figura 2.4).
- Espacios entre cadenas poliméricas hidratados, que permiten la difusión de los iones.
- Mayor capacidad de intercambio.
- Menos costosas.



### Figura 2.4 Resina tipo gel

#### ➤ Resinas macroreticulares o macroporosas

Se emplea el mismo proceso de polimerización utilizado para obtener la resina tipo gel, con las siguientes diferencias: el porcentaje de divinilbenceno es mayor (aproximadamente 25%), la polimerización se realiza en presencia de un material inerte (alcoholes de alto peso molecular) que luego es retirado mediante elusiones o evaporación. Al retirar el material inerte de la estructura reticular elaborada, quedan espacios vacíos o poros con dimensiones superiores a los 10  $\mu\text{m}$ , esta condición le proporciona a la resina una mayor elasticidad. Las resinas macroporosas presentan una estructura poco simétrica, opaca, con gran elasticidad, alta resistencia bajo el efecto de esfuerzos osmóticos producto de la variación del volumen de la resina (dilatación) y una pobre resistencia estructural en presencia de elementos oxidantes. En resumen las características más importantes de este tipo de resina son:

- Estructura con canales o macroretículos producidos por espacios vacíos (Figura 2.5).
- Mayor resistencia física y química.
- Vida útil más larga.
- Menor capacidad de intercambio.
- Más costosas.

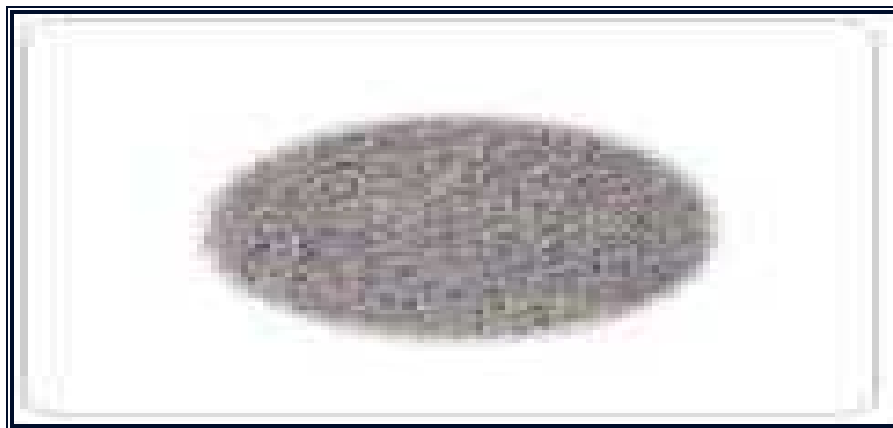


Figura 2.5 Resina macroreticular o macroporosa

## B. Según su funcionalidad química

Los grupos funcionales son los elementos que constituyen el punto donde ocurre el proceso de intercambio iónico en la resina y son introducidos posteriormente mediante una serie de reacciones químicas, a la estructura en red conformada por la mezcla estireno-divinilbenceno. En función de la naturaleza de los grupos funcionales, se pueden observar dos grandes tipos de resinas (Figura 2.6):

### ➤ Resinas catiónicas

Caracterizadas por la presencia en su matriz de grupos funcionales con radicales de función ácida, capaces de fijar cationes inorgánicos u orgánicos ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ) e intercambiarlos por iones hidronio ( $\text{H}^+$ ) o sodio ( $\text{Na}^+$ ), según sea su uso. En tratamiento de agua se usan para suavización, descarbonatación y desmineralización. Este tipo de resina a su vez se clasifica en catiónicas fuertes y débiles, siendo sus características más importantes las siguientes: **(Gamma, 1990)**

#### Catiónicas Fuertes:

- Grupo funcional ácido fuerte sulfónico ( $\text{HSO}_3^-$ ).
- Remueven todo tipo de catión disociado en solución.
- Regeneradas con cloruro de sodio producen agua suavizada.
- Regeneradas con ácido sulfúrico sirven como lecho primario en un desmineralizador de dos lechos.
- Transforman las sales en cantidades equivalentes de los ácidos correspondientes.

#### Catiónicas Débiles:

- Grupo funcional ácido débil carboxílico ( $\text{COOH}^-$ ).
- Efectivas removiendo dureza asociada con alcalinidad de carbonatos o una base fuerte tipo  $\text{OH}^-$ .
- Muy usadas en desalcalinización.
- Más capacidad y eficiencia en la regeneración que las catiónicas fuertes.
- Usadas precediendo a las catiónicas fuertes para disminuir carga iónica a estas y ahorrar regenerantes.

### ➤ Resinas aniónicas

Caracterizadas por la presencia en su matriz de grupos funcionales con radicales de función con carácter básico, por ejemplo aminas terciarias o amonios cuaternarios, capaces de fijar aniones inorgánicos u orgánicos ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ , etc.) e intercambiarlos por iones hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ) o cloruros ( $\text{Cl}^-$ ). En tratamiento de agua se emplean para eliminación de materia orgánica, reducción de nitratos y desmineralización. De igual forma que las catiónicas se subdividen en fuertes y débiles, y sus características más importantes son (**Bayona, 1995**):

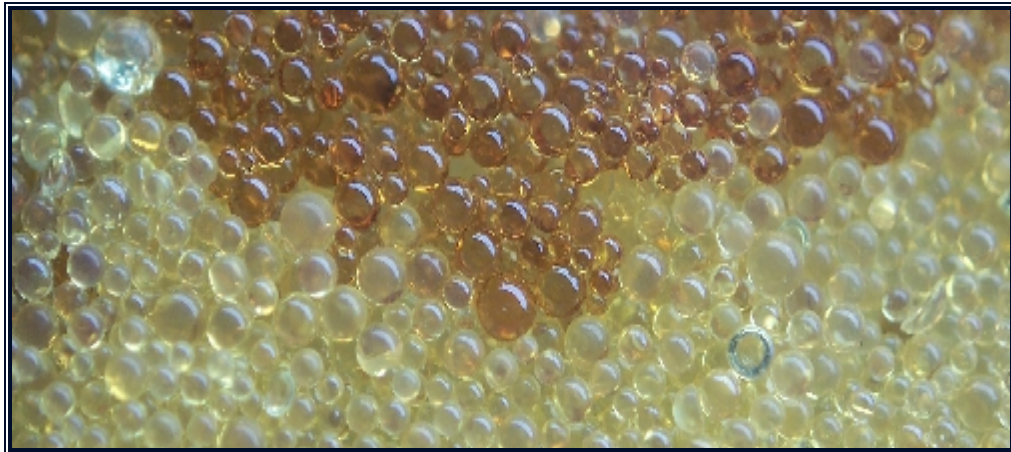
#### **Aniónicas Fuertes:**

- Grupo funcional amina cuaternaria.
- Remueven sílice y dióxido de carbono como también todos los aniones asociados a ácidos.
- Se subdividen en dos categorías: tipo I, más básica, mejor remoción de sílice y mayor capacidad y resistencia térmica; tipo II, menos básica, menor capacidad de intercambio, menor resistencia térmica y menor vida útil.

#### **Aniónicas Débiles:**

- Grupo funcional aminas secundarias y terciarias.
- Alta capacidad para remover ácidos fuertes como  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . No remueven sílice ni dióxido de carbono.
- Usadas en desionización precediendo a las fuertes para ahorrar regenerantes.
- Más resistentes al envenenamiento orgánico, usadas antes de las fuertes para protegerlas.





**Figura 2.6 Resina catiónica (parte superior) y resina aniónica (parte inferior).**

### **2.6.1.3 Regeneración de las resinas de intercambio iónico**

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el proceso inverso del proceso de intercambio iónico y tiene por finalidad devolverle a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de intercambio. Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contengan el ión móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

Para la regeneración de las resinas de intercambio iónico se usa:

- Sal común (cloruro de sodio) para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes.
- Ácido clorhídrico o ácido sulfúrico (depende del costo y de la eficiencia): para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles.
- Hidróxido de sodio o hidróxido de amonio: para regenerar resinas aniónicas de bases fuertes y resinas aniónicas de bases débiles.

Una vez regenerada la resina está lista para un nuevo ciclo de intercambio iónico.

### **2.6.1.4 Vida útil de las resinas de intercambio iónico**

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

Las resinas catiónicas fuertes primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos.

La mayoría de autores de la especialidad asignan una vida útil esperada de las resinas de intercambio iónico entre 5 y 10 años. Según la Empresa RHOM AND HASS (fabricante de resinas de intercambio iónico) las resinas aniónicas tienen una vida útil teórica de 70 a 300 m<sup>3</sup> de agua tratada por litro de resina y las resinas catiónicas de 200 a 1.500 m<sup>3</sup> de agua tratada por litro de resina; en ambos casos dependerá de la calidad del agua a tratar.

Existen métodos de laboratorio que permiten determinar la capacidad de intercambio iónico de una resina dada, la mayoría de los cuales han sido desarrollados por las empresas fabricantes.

La utilidad de poder determinar la capacidad de intercambio iónico reside en poder comparar las capacidades de varias resinas cuando se necesita escoger una resina adecuada a las necesidades de operación; así mismo sirve para saber el estado de la vida útil de una resina que está en uso y determinar en qué momento necesita ser cambiada.

## **2.7 Descripción de la unidad de producción de agua desmineralizada del complejo mejorador Petrocedeño**

### **2.7.1 Equipos de la unidad de desmineralización**

Para garantizar la producción, el almacenamiento y la distribución de agua desmineralizada, la unidad dispone de los siguientes equipos:

#### **2.7.1.1 Filtros de carbón activado (06-V-30-01 A/B/C/D/S)**

Los filtros de carbón activado son diseñados para tratar un caudal nominal de agua fresca entre 110 y 480 m<sup>3</sup>/h. Son utilizados para remover el cloro residual y las sustancias orgánicas disueltas que vienen con el agua fresca de alimentación a la unidad.

El agua fresca que se recibe del tanque 06-T-10-01 pasa a través de un lecho de carbón el cual adsorbe los compuestos orgánicos, los sólidos y una parte de cloro. El proceso de adsorción consiste en la adhesión de una fina capa de moléculas contenidas en el agua, a la superficie de una sustancia sólida en este caso el carbón activado. Es importante tener en cuenta que este proceso es reversible.

La unidad consta de cinco filtros de carbón activado de los cuales 4 están normalmente en servicio, mientras que uno está en reserva o etapa de retrolavado (proceso de regeneración). Un filtro tiene forma de un tambor vertical cargado de carbón activado en polvo en el cual el agua entra por la parte superior a una presión de 7,0 – 7,4 barg y a una temperatura de 28°C (Figura 2.7). Según su esquema operacional la fase de servicio es de 40 horas, la secuencia de retrolavado es de 50 minutos y la fase en espera es de 9 horas. **(SINCOR, 2001).**



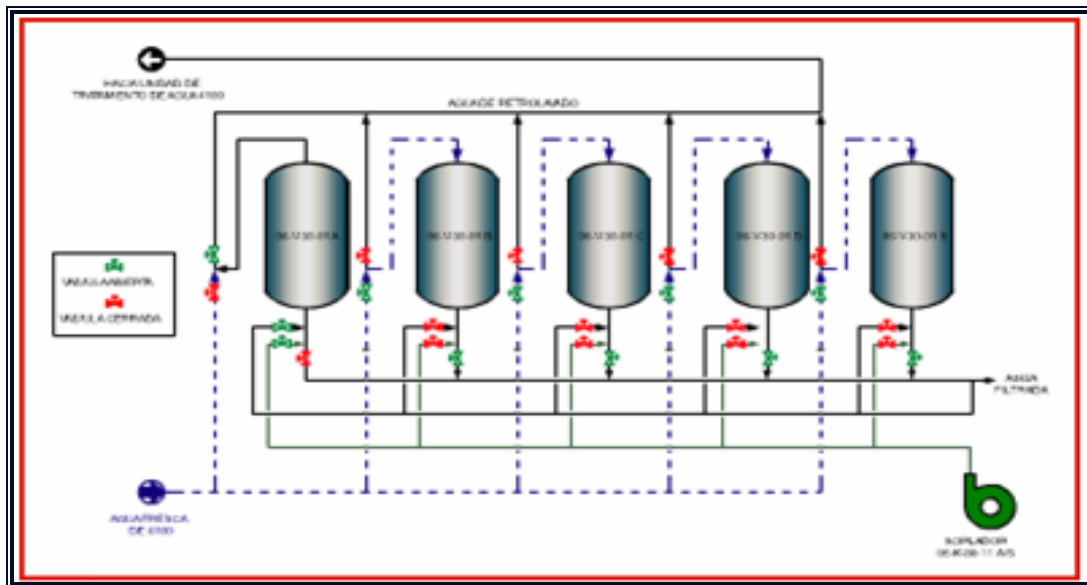
**Figura 2.7 Filtros de carbón activado. (SINCOR,2001)**

#### ✓ **Retrolavado de los filtros de carbón activado**

La fase de servicio de cada filtro es controlada con el tiempo. Cuando la duración de fase de servicio de un filtro haya finalizado, este filtro automáticamente pasa a la secuencia de retrolavado.

El retrolavado en el filtro de carbón activado se hace circulando aire y agua; el retrolavado con aire se lleva a cabo mediante dos sopladores 06-K-30-11A/S (uno operando y otro de respaldo), mientras que el retrolavado con agua se lleva a cabo con agua filtrada, tomada directamente del cabezal principal a la salida de los filtros en servicio.

La inyección de aire tiene como fin provocar una turbulencia para desprender y mejorar la eliminación de los sólidos retenidos en la superficie del carbón activado. En la figura 2.8 se muestra un diagrama de la fase de retrolavado de los filtros con carbón activado.



**Figura 2.8 Diagrama simplificado de la fase de retrolavado de los filtros de carbón activado. (SINCOR, 2001)**

### 2.7.1.2 Intercambiadores catiónicos (06-V-30-02 A/B/C)

Su función es remover los iones metálicos, esto se consigue reemplazando los iones hidronios ( $H^+$ ) presentes en la resina por los cationes metálicos presentes en el agua proveniente de los filtros de carbón.

El agua que sale de los filtros de carbón activado va hacia un tambor cargado de una resina de intercambio iónico capaz de reemplazar cationes del tipo  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$  por iones hidronios,  $H^+$ . Este equipo está conformado por dos lechos de resinas, el primer lecho consiste en una resina débil que puede efectuar un intercambio parcial y el segundo lecho es una resina fuerte que puede intercambiar con todos los iones positivos presentes en el agua.

El agua entra por el extremo superior del intercambiador y la presión de operación es de 10 barg a  $66^{\circ}C$ . Según el esquema operacional la fase de servicio depende del

volumen tratado y la secuencia de generación es de 143 minutos. El agua pasa a través de la placa superior lo que permite distribuirla uniformemente en toda la superficie disponible; atravesando una capa de material inerte flotante, luego una zona libre y llega hasta la resina donde los iones presentes en el agua son intercambiados. **(SINCOR, 2001)**

### **2.7.1.3 Descarbonadores (06-V-30-03 A/B/C)**

Su función es liberar el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) presente en el agua. En el intercambiador catiónico aumenta la concentración de iones hidronios ( $\text{H}^+$ ). Estos iones se combinan con los aniones presentes en el agua y una de esas combinaciones va a ser utilizada para la remoción de los aniones carbonatos.

El ácido carbónico se transforma en gas carbónico y si la solución que lo contiene se pone en contacto con aire, dicho gas se escapa de la solución formando burbujas dentro del líquido. El proceso se acelera si se sopla aire dentro de la solución. El agua descationizada entra entonces por el extremo superior de una torre, pasa a través del empaque y circula en contracorriente por un adecuado flujo de aire producido por sopladores instalados en la base del empaque.

La transformación de los aniones carbonatos en gas carbónico que se libera a la atmósfera reduce la carga en la resina aniónica fuerte. **(SINCOR, 2000)**

### **2.7.1.4 Bombas de transferencia del descarbonador (06-P-30-01 A/S1/B/S2/C/S3)**

Están diseñadas para bombear  $240 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua libre de dióxido de carbón descationizada con una presión de descarga de 6 bar. Todas las bombas son impulsadas por motor eléctrico. La función de estas bombas es transferir el agua libre de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) desde el descarbonador hasta el intercambiador aniónico. Consta de 6 bombas en total, 2 por cada tren, una en servicio y la otra de respaldo.

### **2.7.1.5 Intercambiadores aniónicos (06-V-30-04 A/B/C)**

Su función es reemplazar los iones hidroxilos  $\text{OH}^-$ , de la resina por los aniones presentes en el agua. El agua descarbonada es bombeada hacia el intercambiador

aniónico, el cual es un tambor cargado de una resina de intercambio iónico capaz de reemplazar los aniones del tipo  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , por iones hidroxilos,  $\text{OH}^-$ , tal como se señaló anteriormente. Al igual que el intercambiador catiónico consta de dos lechos de resina, una débil y una fuerte, la fuerte teniendo una mejor capacidad para remover los iones carbonatos que no fueron removidos en el descarbonatador. La presión de operación del intercambiador es de 10 bar a una temperatura de 66 °C. **(SINCOR, 2001)**

#### **2.7.1.6 Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada (06-T-30-02)**

La función es almacenar toda el agua desmineralizada proveniente de los trenes de producción. La capacidad total del tanque es de 17.465 m<sup>3</sup> (109.851 bbls) y la capacidad de operación es de 15.537 m<sup>3</sup> (97.724 bbls). El volumen de tanque es suficiente para almacenar la cantidad normal de agua desmineralizada esperada, en 48 horas (318,6 m<sup>3</sup>/h). El uso principal del agua desmineralizada, está en las unidades de generación de vapor y en la planta de producción de vapor de la unidad de producción de hidrógeno. **(SINCOR, 2001)**

#### **2.7.2 Descripción general del proceso**

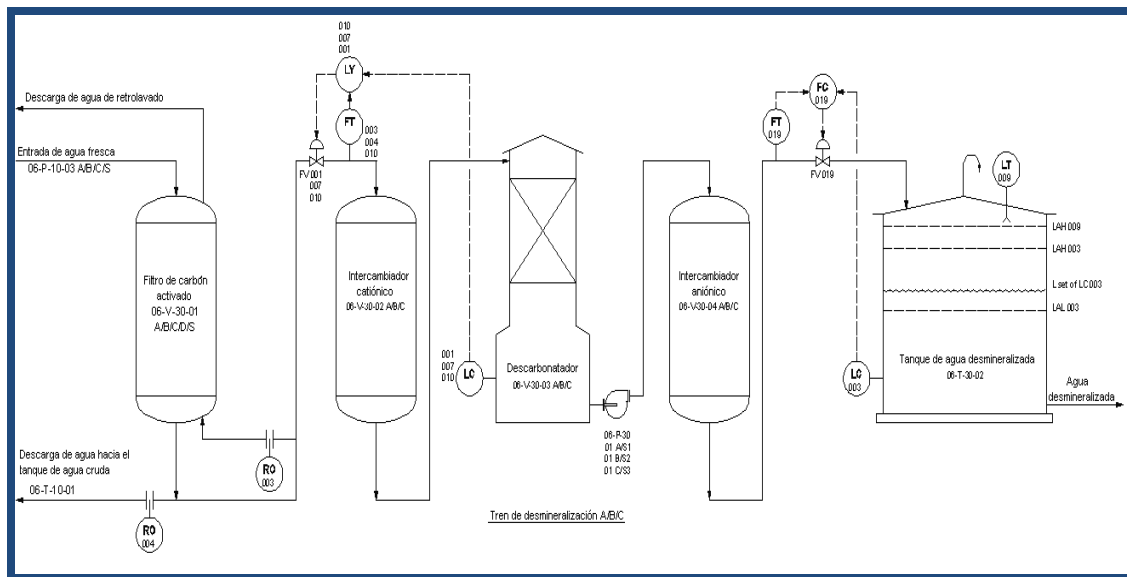
La desmineralización es el proceso por medio del cual se remueven las sales naturales del agua a través del intercambio de iones. Solamente las sales que ionizan en el agua se pueden remover por medio de este proceso. Con la mayoría de las aguas industriales es posible usar la desmineralización para remover las sales hasta casi el mismo punto obtenido en el proceso de destilación.

La unidad se alimenta con agua fresca proveniente directamente del tanque 06-T-10-01 de la unidad de almacenamiento de aguas industriales (U-6100). El agua fresca contiene compuestos orgánicos disueltos, sólidos suspendidos (TSS), iones positivos (cationes) y negativos (aniones) que forman las sales y gases. Estos compuestos causan daños como corrosión e incrustaciones en las calderas y en las tuberías de vapor aguas abajo, del proceso de generación de vapor. **(SINCOR, 2001)**

La función principal de esta unidad es producir un agua de calidad determinada para ser usada principalmente como agua de alimentación a las calderas de la unidad

de servicios y producción de hidrógeno, es decir, un agua despojada de sus componentes orgánicos y minerales. **(SINCOR, 2000)**

El agua fresca recibida a la unidad pasa a través de cinco filtros de carbón tal como se mencionó anteriormente. La capacidad máxima de cada uno de los filtros es de 145 m<sup>3</sup>/h. Cada filtro trabaja en una de las tres diferentes etapas: servicio, retrolavado y en espera (Figura 2.9).



**Figura 2.9 Diagrama del proceso de desmineralización**

El agua proveniente de los filtros de carbón pasa a través de tres trenes paralelos donde los sólidos suspendidos totales (TDS) son removidos. Cada tren consta de un intercambiador catiónico, un descarbonatador y un intercambiador aniónico. Normalmente, dos trenes estarán en la fase de servicio, mientras que el restante está en regeneración o preparado para entrar en servicio después de la regeneración (fase en espera). La bomba principal de cada uno de los trenes transfiere el agua del tren al tanque de almacenamiento de agua desmineralizada. Un floculante orgánico (polielectrolito) es añadido aguas arriba de los filtros de carbón, con el fin de mejorar la calidad del agua que entra al sistema en caso que exista presencia de sólidos suspendidos, dependiendo del caudal de agua fresca que entra a la unidad. **(SINCOR, 2000)**

El tanque de almacenamiento de agua desmineralizada recibe agua desmineralizada de los tres trenes paralelos a través de tres (3) líneas de 8". Las válvulas UV en cada línea están diseñadas para detener el flujo al tanque de almacenamiento en caso de funcionamiento defectuoso de cualquier tren o mientras un tren está en la etapa de regeneración. Un nivel alto en el tanque suministra una señal para detener todas las bombas en los tres trenes que alimentan el tanque. **(SINCOR, 2001)**

Además, la unidad está provista de un tanque de neutralización, el cual recibe todo el desecho neutralizado del paquete de agua desmineralizada durante la regeneración de la resina y también los goteos en los drenajes de las bombas cáusticas y ácidas de las líneas colectoras en la fosa de sistema de regeneración, transferidos al tanque por la bomba. **(SINCOR, 2000)**

El desecho es neutralizado en un proceso discontinuo añadiendo soda cáustica o ácido sulfúrico, dependiendo de la señal del controlador de pH dada por el analizador. El flujo de ácido o cáustica se controla ajustando el recorrido de las bombas dosificadoras. Una vez que el desecho es completamente neutralizado dentro de un rango de pH de 6 a 9, se transfiere a la unidad de tratamiento de aguas servidas por la bomba del tanque de neutralización. El flujo de la bomba es recirculado al tanque de neutralización mediante una válvula que está abierta. Al finalizar la etapa todos los desechos fluyen a la unidad de tratamiento de aguas servidas para su posterior tratamiento. El nivel muy bajo en el tanque, detiene la bomba en operación a través de la acción del lazo de control.

El tanque de almacenamiento de ácido sulfúrico, almacena ácido sulfúrico al 93% en peso, utilizado para la regeneración del intercambiador catiónico y para la neutralización de los desechos. El ácido sulfúrico diluido es suministrado al intercambiador catiónico por las bombas de regeneración de ácidos. El ácido concentrado es diluido a una proporción correcta mediante la mezcla con agua desmineralizada por los tres controladores de relación, uno por cada tren de agua desmineralizada. Las bombas de neutralización ácida, suministran ácido sulfúrico al 93% en peso al tanque de neutralización. Una válvula instalada en la línea de ácido controla la presión del flujo de ácido sulfúrico al tanque de neutralización. **(SINCOR, 2000)**

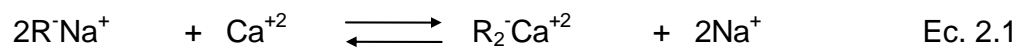


El tanque de almacenamiento de soda cáustica, almacena soda cáustica a un 50% en peso. La soda cáustica es utilizada para la regeneración del intercambiador aniónico y para la neutralización de los desechos ácidos. La soda cáustica diluida es suministrada al intercambiador aniónico por las bombas de regeneración de soda cáustica. La soda cáustica al 50% en peso es diluida en proporción correcta por el mezclado con agua desmineralizada mediante los tres (3) controladores de relación, uno por cada tren de agua desmineralizada. Las bombas de neutralización de soda cáustica, suministran soda cáustica al 50% en peso al tanque de neutralización. Una válvula instalada en la línea de soda cáustica controla la presión de flujo al tanque de neutralización.

Adicionalmente, esta unidad proporciona el flujo necesario de soda cáustica a la unidad de despojamiento de aguas agrias por las bombas de transferencia. **(SINCOR, 2001)**

### 2.7.3 Proceso de desmineralización de la unidad

El intercambio de iones tiene aplicaciones importantes en el acondicionamiento del agua tal como ablandamiento y desionización. Con pocas excepciones, la gran utilidad de intercambio iónico depende de la capacidad para utilizar y reutilizar el material de intercambio. Por ejemplo, en el ablandamiento del agua:

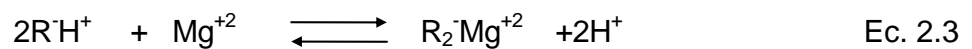
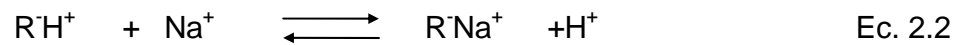


El agente de intercambio R en el ion sodio es capaz de cambiar por calcio y de este modo quitar calcio del agua dura y de reemplazarlo por una cantidad equivalente de sodio. Posteriormente, la resina cargada de calcio se puede tratar con solución de cloruro de sodio, pasándola a la forma de sodio, lista para otro ciclo de operación. Este paso de conversión es comúnmente llamado regeneración. La reacción es reversible; el intercambio iónico no está cambiado permanentemente. Millones de galones de agua por pie cúbico de resina pueden ser tratados durante un período operativo de muchos años.

Los cationes cargados positivamente y los aniones cargados negativamente permiten la conductancia de electricidad y se llaman electrolitos. La conductividad

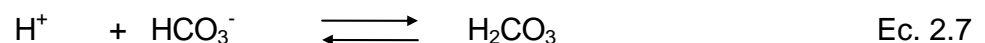
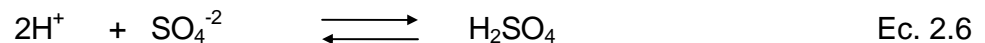
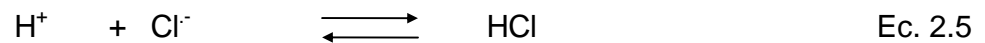
eléctrica es de esta forma una medida de la pureza de agua, una conductividad baja corresponde a una pureza alta. Los contaminantes ionizados débilmente tal como la sílice contribuyen solamente un poco a la conductividad de agua.

La desmineralización de intercambio iónico es básicamente un proceso de dos pasos que implica un tratamiento tanto con resinas catiónicas como con resinas aniónicas. Este tratamiento puede ser una operación en serie o en un lecho común según las condiciones y requerimientos del proceso. En este sistema de desmineralización, el agua se pasa primero a través del agente de intercambio catiónico. Aquí el  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^+$  son cambiados por  $\text{H}^+$ :



El grado de eliminación de estos iones depende de la selectividad del catión de la resina. Las resinas catiónicas muestran una selectividad mucho mayor para iones de calcio y de magnesio bivalentes que para iones de sodio monovalentes (también potasio si está presente). De esta forma, cualquier pérdida (no eliminación) del agente de cambio catiónico tiende a ser sodio más que calcio o magnesio.

Se puede considerar que los iones de hidrógeno formados en el intercambio catiónico forman ácido con los aniones presentes:



Los ácidos fuertes como  $\text{HCl}$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  están altamente disociados, por ejemplo las reacciones citadas arriba son fuertemente movidas a la izquierda quedando  $\text{H}^+$  libre.

La presencia de los iones de  $H^+$  tiende a limitar el alcance para que la reacción continúe. Por otra parte, el  $H_2CO_3$  es un ácido débil con tendencia al equilibrio a la derecha y dando una reducción neta de iones de  $H^+$  en solución. Esta condición permite la eliminación del ion de hidrógeno lo que hace que la reacción casi termine. Así, la pérdida de sodio está asociada solamente con el alto contenido de aguas de cloruro y de sulfato, pero no siempre con aguas de alta alcalinidad ( $HCO_3$ ,  $CO_3$ ,  $OH^-$ ).

Mientras el agua pasa a través de una columna de intercambio catiónico, el ion  $Na^+$  es continuamente cambiado por  $H^+$ . Como la concentración de  $Na^+$  disminuye y la concentración de ion hidrógeno aumenta, el equilibrio se vuelve cada vez más desfavorable para la futura eliminación de  $Na^+$ . Como el agotamiento de resina procede, ésta contiene proporcionalmente más  $Na^+$  y menos  $H^+$ . Finalmente, la zona de intercambio pasará al fondo del lecho y el sodio se romperá a través del efluente. En este momento, la resina es tomada cerca de la corriente y se regenera.

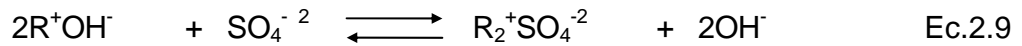
Con el desarrollo de ácidos débiles al mismo tiempo que el agua filtrada pasa a través de la resina catiónica, el valor de pH del efluente de unidad catiónica será de aproximadamente 3.5. El proceso de desmineralización es continuo pasando el agua descatonizada completamente a través del desgasificador.

El desgasificador de tiro forzado se diseña para que el agua se rocíe a través del empaque. Al mismo tiempo el aire despojado entra en la torre por debajo del empaque y sube a contra corriente con el agua. El empaque de la torre separa el agua para permitir contacto íntimo con el aire.

El aire sirve para diluir los gases presentes bajando su presión parcial, su solubilidad y manteniendo una fuerza impulsora para que el dióxido de carbono se libere.

El proceso de desmineralización es completado por el tratamiento con resina aniónica. Estos aniones presentes en los ácidos formados previamente, son cambiados por el ión  $OH^-$ .

El hidróxido neutraliza el ácido mientras el agua continúa a través de la columna. La elección del intercambio aniónico de la resina es muy crítica a la calidad de agua alcanzable y la economía del sistema. Cuando se requiere agua de alta calidad, se utiliza una resina de intercambio aniónico de base fuerte:



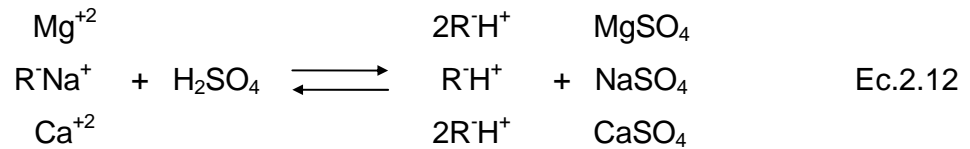
Desde entonces el  $OH^-$  liberado es neutralizado por los ácidos, dando a lugar un equilibrio ácido-base favorable y no hay una pérdida de ácido. Incluso la sílice y el dióxido de carbono se reducen a niveles muy bajos. La regeneración es realizada por una solución de base fuerte tal como la cáustica.

#### 2.7.4 Proceso de regeneración catiónica en contra-corriente de la unidad

Las resinas catiónicas débilmente ácidas tienen un grupo funcional ácido-débil (ácido carboxílico). A menos que el pH esté por encima de 8, el ácido carbónico es solo ionizado débilmente en agua. Por esta razón, las resinas ácidas débiles son solamente efectivas para remover la dureza asociada con la alcalinidad del carbonato y el sodio asociado con una base fuerte (NaOH); en el proceso, ellos también desalcalinizan el agua. Su uso primario radica en alta-alcalinidad, alta dureza del agua, porque tienen capacidades superiores que las resinas de ácido fuertes y se regeneran más eficazmente.

Una reacción de intercambio iónico puede continuar solamente mientras el material de intercambio pueda suministrar el hidrógeno para reemplazar los cationes del agua fresca. El lecho de intercambio debe ser regenerado a ciertos intervalos para reponer el ion sustituible en el material de intercambio.

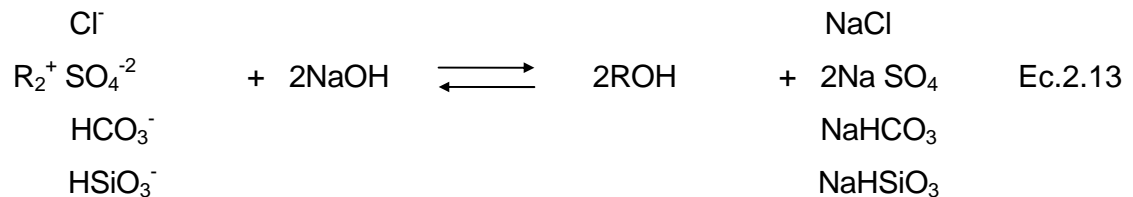
Cuando el agente de intercambio catiónico no tiene larga capacidad de intercambio, se debe devolver a su estado original mediante la regeneración con ácido diluido. La secuencia de regeneración está constituida por 11 fases. En una de esas fases se hace pasar desde abajo hacia arriba la sustancia regeneradora, en este caso una solución de ácido sulfúrico. El proceso de regeneración es indicado por las reacciones siguientes:



El ácido sulfúrico debe ser de 93% en peso y se diluye a 1,5% y 3% con agua desmineralizada durante esta fase de regeneración. El consumo estimado de ácido sulfúrico durante el primer pase a 1,5% es de 880 L/h (1.608 Kg/h), en 16 minutos aproximadamente. Durante el segundo pase a 3% para otros 16 minutos, el caudal cambia a 1.770 L/h (3.234 Kg/h.), lo cual da un consumo total de ácido sulfúrico de 707 L (1.291 Kg) por tren de regeneración de agua desmineralizada. Normalmente es regenerado un tren de agua desmineralizada por día.

### 2.7.5 Proceso de regeneración aniónica en contra-corriente de la unidad

La regeneración de los materiales de intercambio aniónico es similar a la regeneración catiónica. Cuando el material no es capaz de cambiar, se devuelve a su estado original por el uso de base. Se utiliza soda cáustica para los agentes de intercambio aniónico.



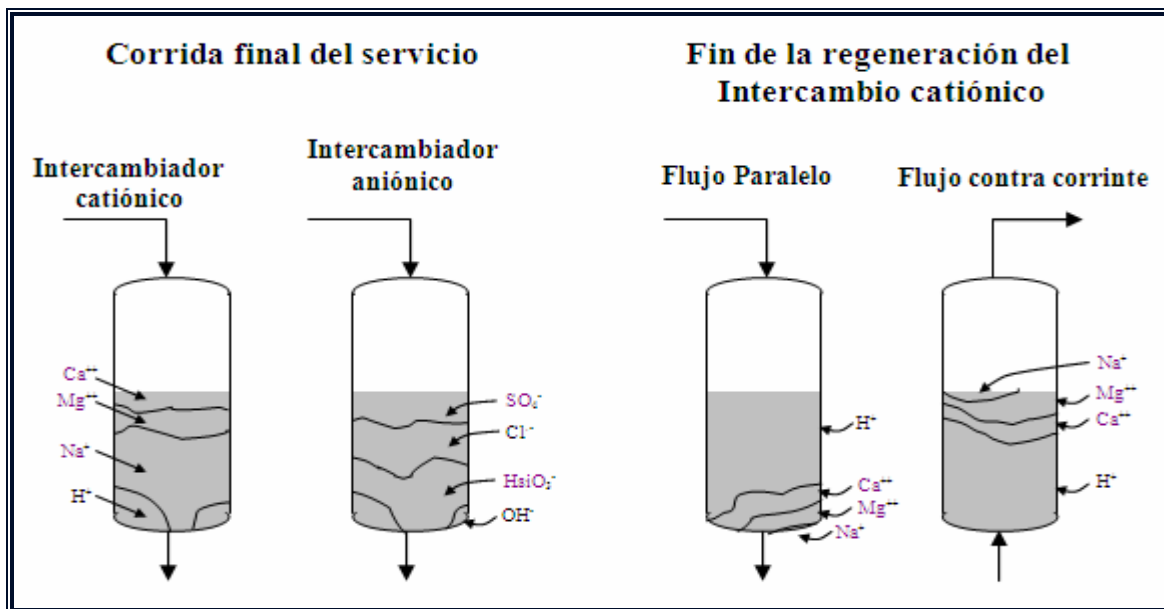
Se deben regenerar las unidades aniónicas con agua descationizada o desmineralizada para impedir los depósitos de carbonato cálcico e hidróxido de magnesio del ensuciamiento de la resina.

Antes de la inyección química, se precalienta el intercambiador aniónico de base fuerte con agua a 40°C para conseguir una óptima eliminación de sílice durante la regeneración.

La soda cáustica diluida utilizada para regenerar la resina de base aniónica fuerte no es descargada al desecho sino que se dirige al intercambiador aniónico de base débil para regenerar la resina de base débil. La soda cáustica para ser usada debe

ser de 50% en peso y se diluye a 1,5% y 3% con agua desmineralizada durante la fase de regeneración aniónica. Durante el primer pase a 1,5% aproximadamente en 15 minutos, el consumo estimado de soda cáustica es 880 L/h (1.342 Kg/h). Durante el segundo pase en 3% para otros 15 minutos, el caudal cambia a 1.750 L/h (2.669 Kg/h), lo cual da un consumo total de soda cáustica de 658 L (1.003 Kg) por tren de regeneración de agua desmineralizada.

La regeneración de las resinas de intercambio aniónico es un proceso lento en comparación con la regeneración de resina catiónica. Para los intercambiadores aniónicos, un tiempo de contacto largo es importante. El tiempo de contacto, es el tiempo que toma el volumen entero de solución en pasar una vez en algún lugar del lecho. Normalmente parte del tiempo de contacto es obtenido mientras el regenerante está siendo procesado y el resto usado durante el desplazamiento.



**Figura 2.10** Esquema representativo del servicio de regeneración (SINCOR, 2000).

La dirección del flujo regenerante afecta la eficiencia del proceso, subsiguiente la pérdida de ion. El flujo hacia abajo produce los perfiles de impureza aniónica y catiónica mostrados en la corrida final de servicio. La regeneración simultánea produce un perfil como se muestra en el flujo paralelo; en el flujo contracorriente se

invierte el perfil que impide la temprana pérdida de impureza en la siguiente corrida de servicio (Figura 2.10).

## **CAPÍTULO III**

### **DESARROLLO DEL PROYECTO**

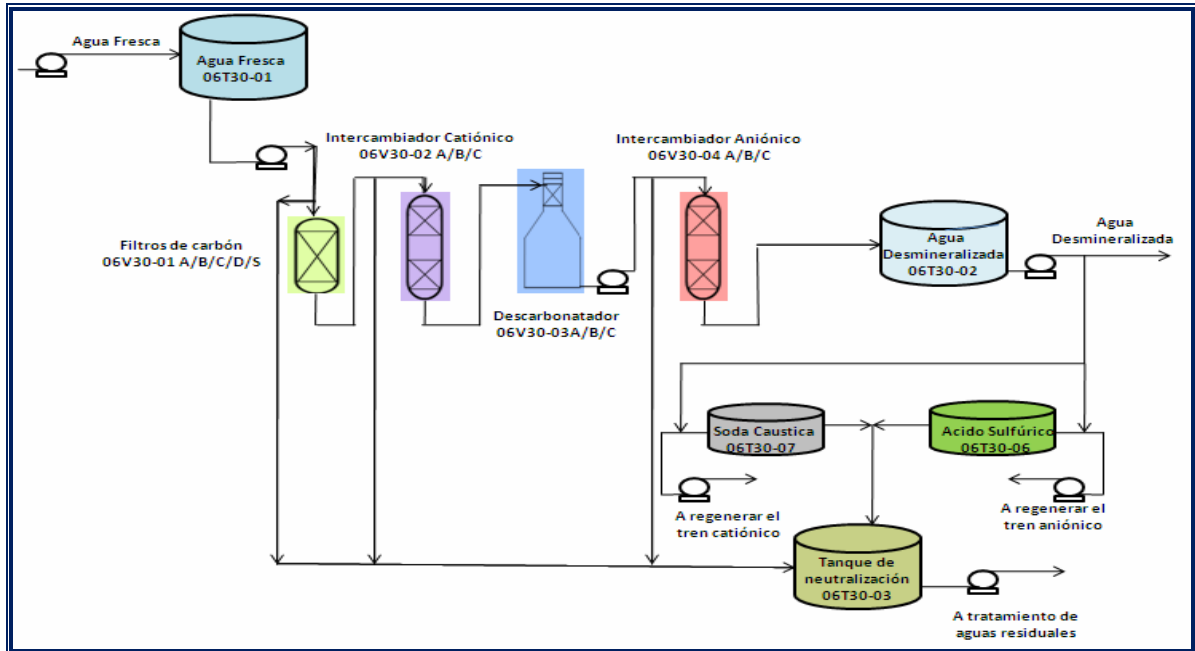
#### **3.1 Identificación de las variables que intervienen en el proceso de producción de agua desmineralizada**

Para la elaboración de esta parte del proyecto, se realizó una revisión de los manuales operacionales, diagramas de flujo de procesos (DFP's) y los diagramas de tuberías e instrumentación de la planta (DTI's), específicamente de la sección de producción de agua desmineralizada (unidad 6300), adicionalmente se recopiló información, a través de las diferentes herramientas de trabajo que ofrece el sistema automatizado de la empresa, como lo son la adquisición de datos de laboratorio (MPro), adquisición de datos de procesos (PI System) y la biblioteca virtual de reportes de los eventos que acontecen en la planta (Log Book). Se llevaron a cabo entrevistas no estructuradas a ingenieros y técnicos encargados del área, así como a panelistas encargados de controlar la unidad desde sala de control, quienes a través de su amplia experiencia dieron a conocer dichas variables.

##### **3.1.1 Visualización del proceso de desmineralización de agua**

Para la ubicación de las variables de la unidad de desmineralización, se identificó el área de operación de los equipos principales, paquetes de químicos para el servicio de regeneración de las resinas y dispositivos específicos (válvulas y analizadores) involucrados en todo el proceso (Figura 3.1).





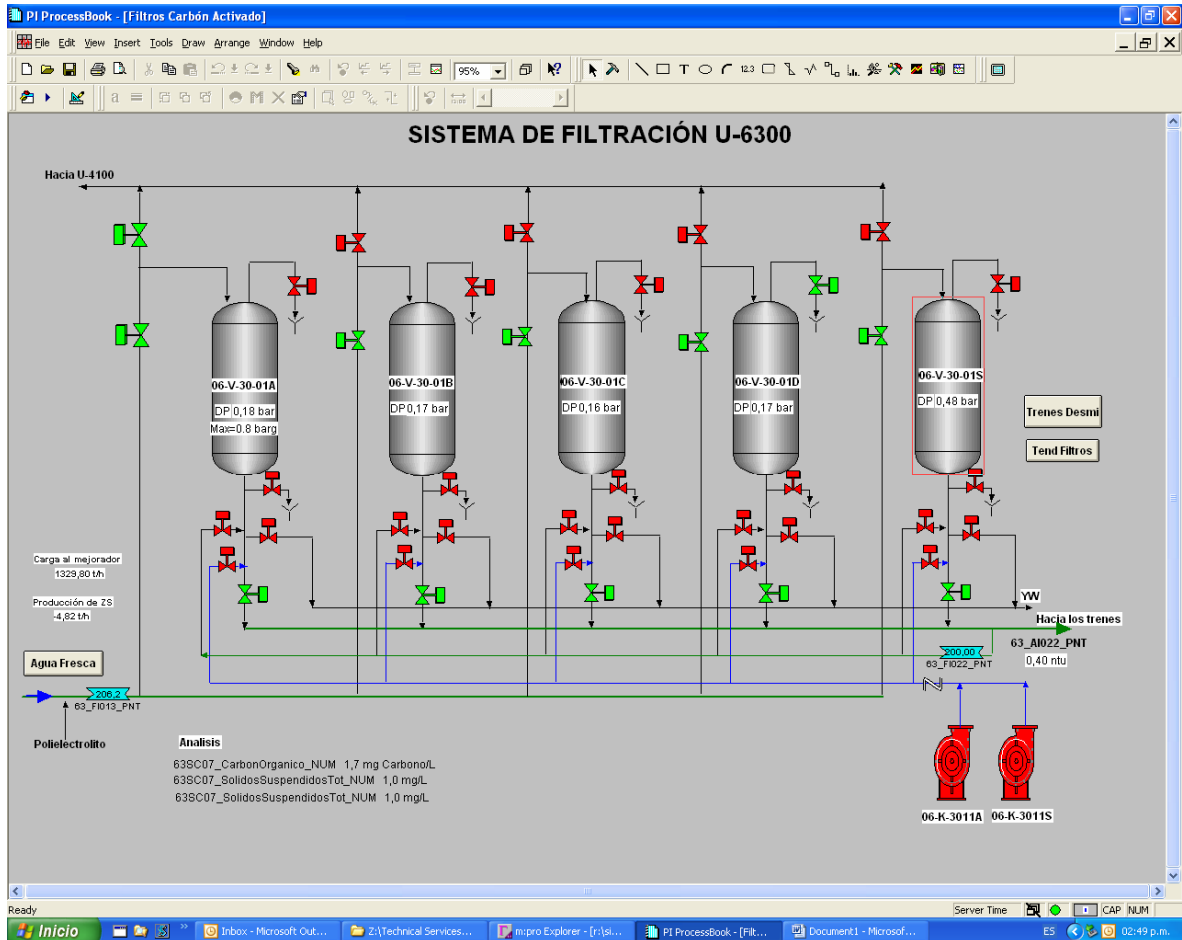
**Figura 3.1 Diagrama simplificado del proceso de desmineralización de agua.**

Para cada uno de estos equipos, sistemas y paquetes se detalló su interrelación y funcionamiento operacional y de diseño, lo que ayudó a conocer las variables involucradas en el proceso y cómo son controladas.

### 3.1.1.1 Variables operacionales asociadas al sistema de filtración de carbón activado

En el anexo A se muestra un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) para la sección de filtración con carbón activado, a través del cual se pudieron identificar las variables que se controlan y los equipos asociados, haciendo uso de las etiquetas de los equipos o variables del proceso (TAG's) correspondientes.

Adicionalmente se utilizó el programa PI System por medio del cual se validaron las variables controladas y visualizadas en el proceso de producción de agua filtrada, con este programa se pudo observar en tiempo real la operación y el control de dicho proceso, (Figura 3.2), lo cual ayudó no sólo con la identificación de las variables sino con la comprensión del proceso y su relación aguas abajo de éste.

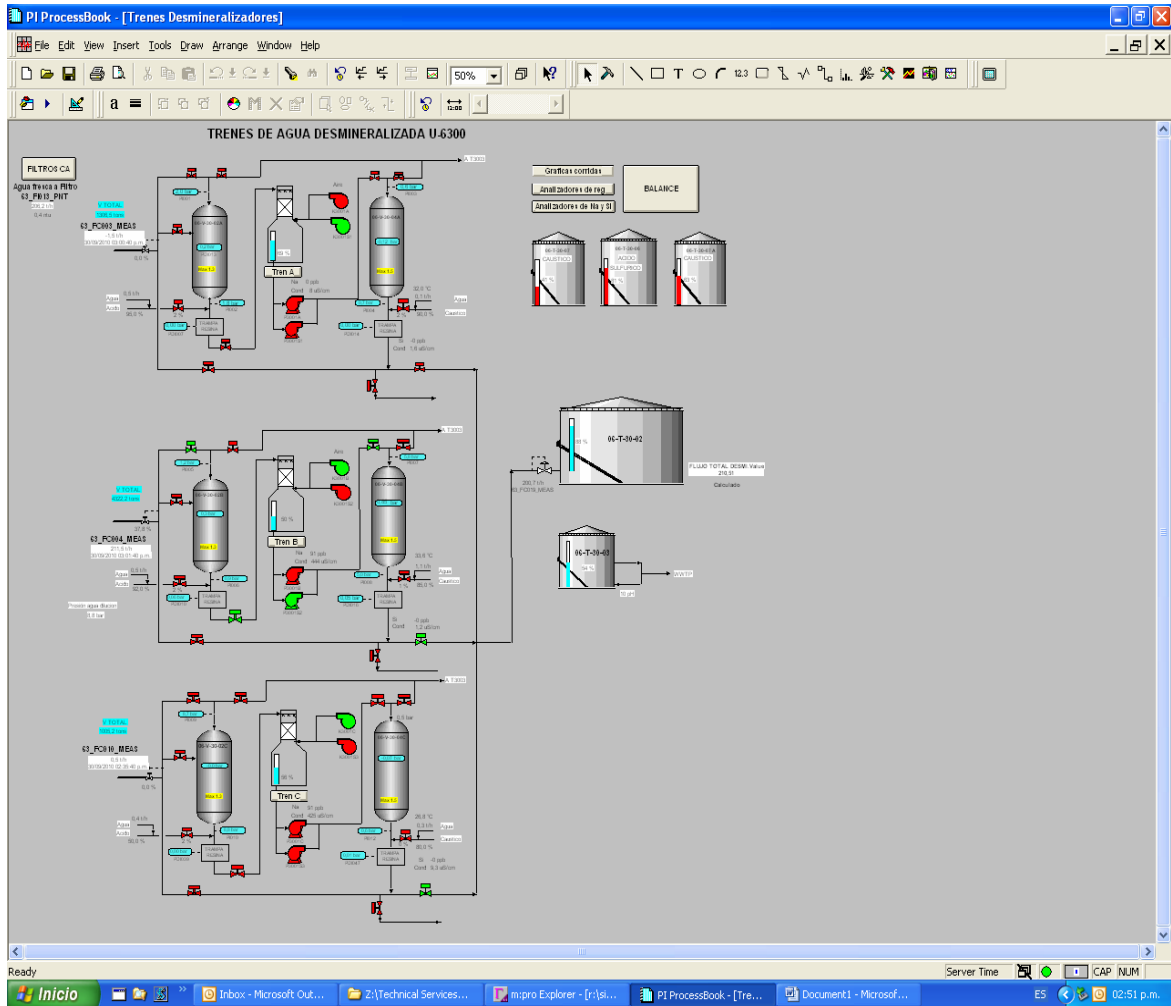


**Figura 3.2 Visualización de los filtros de carbón activado, en el programa PI System.**

### 3.1.1.2 Variables operacionales asociadas al sistema de intercambio iónico

De igual manera que para la etapa de filtración, en el anexo A se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) del sistema de desmineralización de agua para identificar las variables que intervienen en esta parte del proceso.

En la figura 3.3 se muestra la ventana del PI System para la etapa de desmineralización de agua, a través del cual se puede monitorear el proceso de producción, así como también visualizar el nivel del tanque de almacenamiento de agua y los tanques de almacenamiento de los químicos regenerantes.



**Figura 3.3 Visualización de los trenes de desmineralización de agua, en el programa PI System.**

Adicionalmente se recopiló información de las variables operacionales del sistema por medio de la visualización en el panel de control, acerca de la operación en tiempo real de la unidad. En la figura 3.4 se muestra la ventana del tren de desmineralización visualizado por el operador para controlar el proceso.

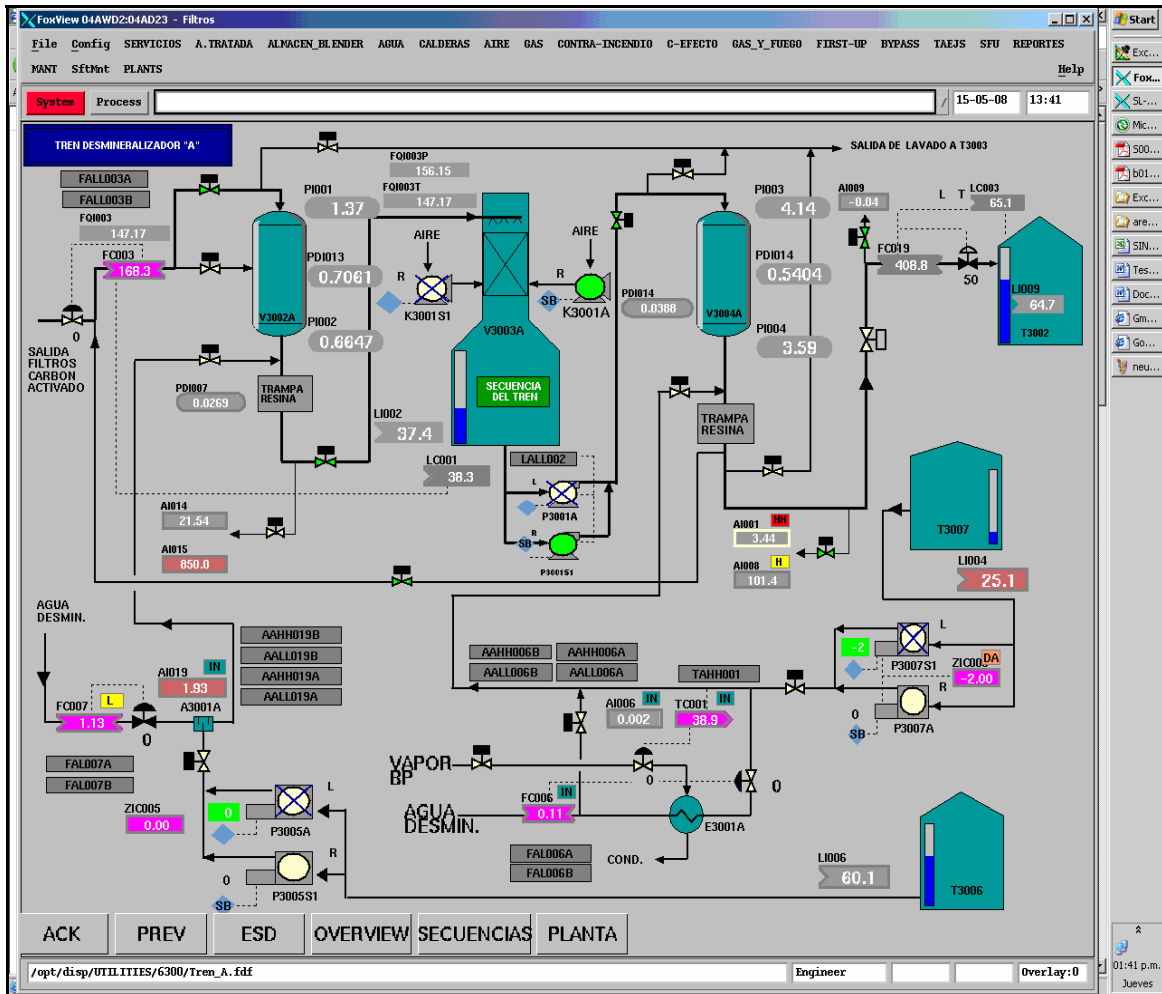


Figura 3.4 Ventana de visualización en el panel de control del tren de desmineralización.

### 3.2 Revisión del funcionamiento de todos los componentes de los sistemas de filtración de carbón activado y de intercambio iónico

Se realizó un levantamiento en campo para verificar las condiciones de operatividad de los equipos, válvulas y analizadores que pertenecen a los sistemas de filtración de carbón activado e intercambio iónico, relacionadas con las variables operacionales identificadas previamente.

La información recopilada se organizó de acuerdo con el área de operación de cada uno de los sistemas, indicando si los equipos, válvulas y analizadores estaban en servicio (E/S) o fuera de servicio (F/S).

A continuación se muestran las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, donde se resume la condición de los equipos del sistema de filtración de carbón activado, intercambio iónico e inyección de químicos, respectivamente.

**Tabla 3.1 Condición de los equipos del sistema de filtración de carbón activado**

TAG	Equipo	Estado
06-V-30-01A	Filtro Carbón Activado A	E/S
06-V-30-01B	Filtro Carbón Activado B	E/S
06-V-30-01C	Filtro Carbón Activado C	E/S
06-V-30-01D	Filtro Carbón Activado D	E/S
06-V-30-01S	Filtro Carbón Activado S	E/S
06-K-30-11A	Soplador Retrolavado Filtros	F/S
06-K-30-11S	Soplador Retrolavado Filtros	E/S
06-P-30-12A	Bomba Dosificadora Coagulante	F/S
06-P-30-12S	Bomba Dosificadora Coagulante	F/S

**Tabla 3.2 Condición de los equipos del sistema de desmineralización del tren A**

TAG	Equipo	Estado
06-P-30-01A	Bomba Tren Desmi. A	E/S
06-P-30-01S1	Bomba Tren Desmi. S1	F/S
06-V-30-02A	Intercambiador Catiónico A	E/S
06-F-30-01A	Trampas de Resina A	E/S
06-V-30-03A	Descarbonatador A	E/S
06-K-30-01A	Soplador del Descarbonatador A	E/S
06-K-30-01S1	Soplador del Descarbonatador S1	F/S
06-V-30-04A	Intercambiador Aniónico A	E/S
06-F-30-02A	Trampas de Resina A	E/S

Nota: Las tablas para los trenes B y C de desmineralización se encuentra en el anexo B.

**Tabla 3.3 Condición de los equipos del sistema de inyección de ácido sulfúrico y soda cáustica**

TAG	Equipo	Estado
06-P-30-07A	Bomba dosificadora cáustico	E/S
06-P-30-07S1	Bomba dosificadora cáustico	F/S
06-P-30-07B	Bomba dosificadora cáustico	E/S
06-P-30-07S2	Bomba dosificadora cáustico	F/S
06-P-30-07C	Bomba dosificadora cáustico	E/S
06-P-30-07S3	Bomba dosificadora cáustico	F/S
06-P-30-05A	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-05S1	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-05B	Bomba dosificadora de ácido	F/S

**Tabla 3.3 Condición de los equipos del sistema de inyección de ácido sulfúrico y soda cáustica. (Continuación)**

TAG	Equipo	Estado
06-P-30-05S2	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-05C	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-05S3	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-13*	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-14*	Bomba dosificadora de ácido	E/S
06-P-30-15*	Bomba dosificadora de ácido	F/S
06-P-30-16*	Bomba dosificadora de ácido	E/S

Nota: \* Sistema nuevo de inyección de ácido

A continuación se muestran las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 de las válvulas y analizadores del sistema de filtración de carbón activado, intercambio iónico e inyección de químicos.

**Tabla 3.4 Condición de las válvulas del filtro A de carbón activado**

TAG	Ubicación	Tamaño	Estado
UV-069	Agua de Servicios	6"	E/S

UV-070	Desecho de retrolavado	8"	E/S
UV-096	Agua de drenaje	4"	E/S
UV-098	Drenaje del filtro	6"	E/S
UV-097	Salida de enjuague	6"	E/S
UV-071	Agua retrolavado A	8"	E/S
UV-073	Agua servicios tren A	6"	E/S
UV-134	Entrada aire retrolavado	6"	E/S

Nota: Las tablas para los filtros de carbón B, C, D y S se encuentra en el anexo B.

**Tabla 3.5 Condición de las válvulas del tren A de intercambio iónico**

	TAG	Ubicación	Tamaño	Estado
CATION	UV-141	Retrolavado A	8"	E/S
	UV-140	Alimentación del filtro	8"	E/S
	UV-139	Desecho de retrolavado	8"	E/S
	UV-142	Ácido sulfúrico diluido	8"	E/S
	UV-012	Agua descationizada	8"	E/S
ANIÓN	UV-019	Agua descarbonatada	8"	E/S
	UV-021	Desecho de retrolavado	6"	E/S
	UV-031	Cáustica diluida A	6"	E/S
	UV-128	Reciclo a inter. catiónico	6"	E/S
	UV-023	Salida enjuague de anión	6"	E/S
	UV-024	Salida de intercambio aniónico	8"	E/S

Nota: Las tablas para los trenes B y C de desmineralización se encuentra en el anexo B.

**Tabla 3.6 Condición de los analizadores de la unidad de agua desmineralizada**

TAG	Ubicación	Estado	Rango de medida
06-30-AT-001	Anión 06-V-30-04 A	E/S	0 - 10 $\mu$ S/cm
06-30-AT-002	Anión 06-V-30-04 B	E/S	0 - 10 $\mu$ S/cm
06-30-AT-005	Anión 06-V-30-04 C	E/S	0 - 10 $\mu$ S/cm
06-30-AT-014	Catión 06-V-30-02 A	E/S	0 – 1.000 $\mu$ S/cm
06-30-AT-007	Catión 06-V-30-02 B	E/S	0 – 1.000 $\mu$ S/cm

06-30-AT-013	Catión 06-V-30-02 C	E/S	0 – 1.000 $\mu$ S/cm
06-30-AT-008	Anión 06-V-30-04 A	F/S	0 - 100 ppb Sílice
06-30-AT-016	Anión 06-V-30-04 B	F/S	0 - 100 ppb Sílice
06-30-AT-012	Anión 06-V-30-04 C	F/S	0 - 1 ppm Sodio
06-30-AT-015	Catión 06-V-30-02 A	F/S	0 - 1 ppm Sodio
06-30-AT-017	Catión 06-V-30-02 B	F/S	0 - 1 ppm Sodio
06-30-AT-018	Catión 06-V-30-02 C	F/S	0 - 1 ppm Sodio
06-30-AT-009	06-T-30-02	F/S	0 - 100 ppb Sílice
06-30-AT-010	06-P-30-09 A/S	F/S	1 - 14 pH
06-30-AT-019	Bomba 06-P-30-05 A/S	F/S	0 - 8 % H SO
06-30-AT-020	Bomba 06-P-30-05 B/S	F/S	0 - 8 % H SO
06-30-AT-021	Bomba 06-P-30-05 C/S	F/S	0 - 8 % H SO
06-30-AT-003	Bomba 06-P-30-07 B	F/S	0 - 8 % NaOH
06-30-AT-004	Bomba 06-P-30-07 C	F/S	0 - 8 % NaOH
06-30-AT-006	Bomba 06-P-30-07 A	F/S	0 - 8 % NaOH
06-30-AT-022	06-V-30-01 S	E/S	0 - 50 NTU

### 3.3 Comparación de las condiciones de operación actual de la unidad con las condiciones de diseño

Se identificaron los parámetros de calidad del agua a la entrada y salida del proceso de desmineralización (filtros de carbón activado y trenes de intercambio iónico) que se establecieron por diseño, y se recopilaron los datos de análisis de laboratorio durante un período de seis meses, a través de un registro virtual que posee la empresa con el programa llamado M-Pro (Figura 3.4), el cual vincula los datos requeridos al programa Excel, exportándolos directamente a este último para ser manipulados cómodamente.



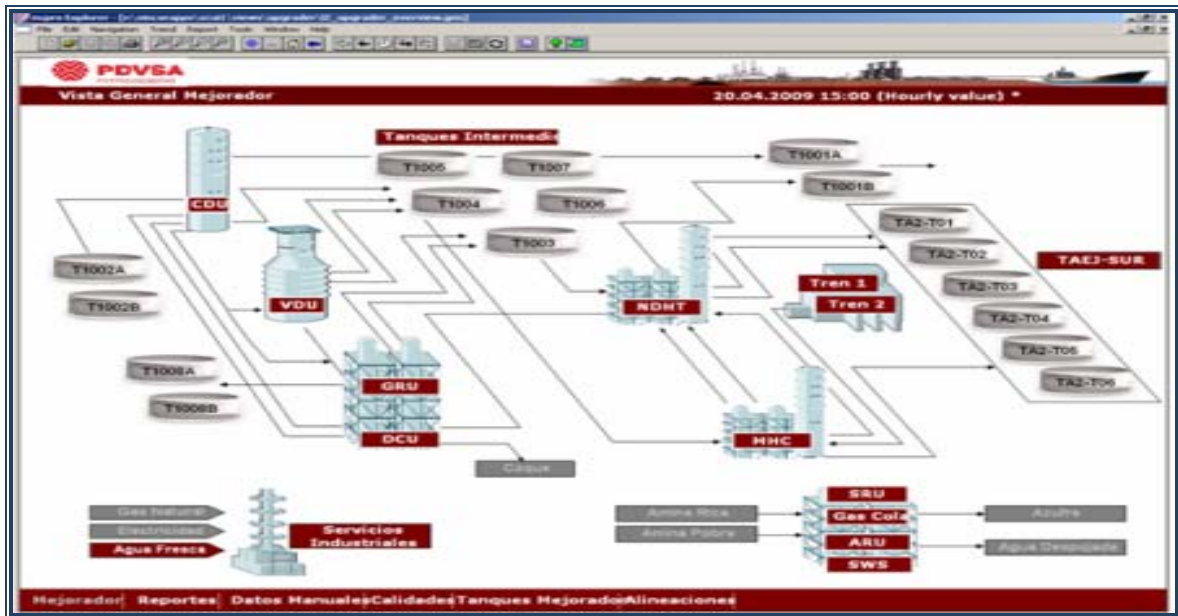


Figura 3.5 Vista de la ventana principal del programa M-Pro

Las características de los parámetros de calidad del agua fresca de entrada a la unidad de desmineralización, establecidos por diseño de acuerdo con los métodos estándares para análisis de agua (standard methods) se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Características por diseño del agua fresca y filtrada de la unidad

Parámetro	Fresca	Filtrada	Unidad
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	7 - 8	8	ppm SiO <sub>2</sub>
Hierro total (Fe)	0 - 0,3	0,1	ppm Fe
Aluminio (Al)	0 - 0,2	0,1	ppm Al
Cloro Libre	0,1-1,1	0	ppm Cl <sub>2</sub>
Sólidos suspendidos (SST)	0 - 12	< 3	ppm
Materia orgánica (COT)	9 - 18	máximo 10	ppm KMnO <sub>4</sub>
Temperatura	18 - 28	18 - 28	°C
Dióxido de carbono libre	5	5	ppm CO <sub>2</sub>
pH	6,9 – 8,0	6,9 – 8,0	adimensional
Alcalinidad total	63 - 136	63 - 136	ppm CaCO <sub>3</sub>

Dureza total	100 - 160	100 - 160	ppm CaCO <sub>3</sub>
Aceites y grasa	0	0	ppm
Turbidez	0 -5	1	NTU

En la tabla 3.8 y 3.9 se muestra un reporte de los análisis realizados al agua fresca y filtrada, respectivamente, durante un período de 6 meses.

**Tabla 3.8 Reporte de la calidad del agua fresca**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/L)	Cloro Residual (mg/L)	Hierro Total (mg/L)	SST(mg/L)	Turbidez (NTU)	pH
04/01/2010	0,031	0,02	0,146	NR	NR	7,75
05/01/2010	NR	NR	NR	0	0,47	NR
06/01/2010	0,345	0	0,075	NR	NR	NR
07/01/2010	NR	NR	NR	0	0,67	NR
08/01/2010	0,376	0,01	0,422	NR	NR	7,66
11/01/2010	0,254	0,01	0,309	NR	NR	7,74
12/01/2010	NR	NR	NR	0	0,56	NR
13/01/2010	0,173	0,03	0,121	NR	NR	NR
14/01/2010	NR	NR	NR	2	0,93	NR
15/01/2010	0,331	0,02	0,212	NR	NR	7,71
18/01/2010	0,188	0	NR	NR	NR	7,62
19/01/2010	NR	NR	NR	1	0,57	NR
20/01/2010	0,205	0,02	0,198	NR	NR	NR
21/01/2010	NR	NR	NR	0	0,86	NR
22/01/2010	0,149	0	0,184	NR	NR	7,9
25/01/2010	0,18	0	0,049	NR	NR	7,84
26/01/2010	NR	NR	NR	3	0,37	NR

27/01/2010	0,302	0,01	0,06	NR	NR	NR
28/01/2010	NR	NR	NR	4	0,52	NR
29/01/2010	0,281	0	0,195	NR	NR	7,71
01/02/2010	0,078	0,01	0,238	NR	NR	7,63
02/02/2010	NR	NR	NR	2	0,64	NR
03/02/2010	0,43	0,02	0,051	NR	NR	NR
04/02/2010	NR	NR	NR	1	0,46	NR
05/02/2010	0,404	0,02	0,084	NR	NR	7,67
08/02/2010	0,164	0	0,131	NR	NR	7,86
09/02/2010	NR	NR	NR	0	0,45	NR
10/02/2010	NR	0	0,096	NR	NR	NR
11/02/2010	NR	NR	NR	5	0,75	NR
12/02/2010	0,151	0,1	0,199	NR	NR	7,79
17/02/2010	0,119	0,03	0,078	NR	NR	NR
22/02/2010	0,549	1,16	NR	NR	NR	7,63
23/02/2010	NR	NR	NR	1	0,57	NR

**Tabla 3.8 Reporte de la calidad del agua fresca. (Continuación)**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/L)	Cloro Residual (mg/L)	Hierro Total (mg/L)	SST(mg/L)	Turbidez (NTU)	pH
25/02/2010	NR	NR	NR	1	0,35	NR
26/02/2010	0,163	0,02	NR	NR	NR	8,06
01/03/2010	NR	0,03	0,098	NR	NR	7,7
03/03/2010	NR	0,03	0,124	NR	NR	NR
04/03/2010	NR	NR	NR	0	0,63	NR
05/03/2010	NR	0,01	0,156	NR	NR	8,2

08/03/2010	NR	NR	0,141	NR	NR	NR
10/03/2010	NR	0,01	0,112	NR	NR	NR
11/03/2010	NR	NR	NR	5	1,09	NR
12/03/2010	NR	0,02	0,135	NR	NR	7,57
16/03/2010	NR	NR	NR	5	0,33	NR
17/03/2010	NR	0,1	0,173	NR	NR	NR
19/03/2010	NR	0	0,098	NR	NR	7,56
22/03/2010	NR	0,01	0,034	NR	NR	7,75
23/03/2010	NR	NR	NR	10	0,56	NR
25/03/2010	NR	NR	NR	0	0,6	NR
26/03/2010	NR	0,02	0,075	NR	NR	6,9
05/04/2010	NR	NR	0,104	NR	NR	NR
06/04/2010	NR	NR	NR	3	0,38	NR
07/04/2010	NR	0,01	0,066	NR	NR	NR
08/04/2010	NR	NR	NR	0	0,45	NR
09/04/2010	NR	0,02	0,12	NR	NR	7,35
12/04/2010	NR	0,05	0,137	NR	NR	7,86
13/04/2010	NR	NR	NR	3	0,55	NR
14/04/2010	NR	0,01	0,043	NR	NR	NR
15/04/2010	NR	NR	NR	3	0,34	NR
16/04/2010	NR	0,03	NR	NR	NR	7,37
19/04/2010	1,390	NR	0,087	NR	NR	NR
21/04/2010	2,061	0,02	NR	NR	NR	NR
22/04/2010	NR	NR	NR	3	0,5	NR
23/04/2010	1,378	0,01	0,053	NR	NR	7,59
26/04/2010	1,898	0,04	NR	NR	NR	7,67
27/04/2010	NR	NR	NR	4	0,45	NR

**Tabla 3.8 Reporte de la calidad del agua fresca. (Continuación)**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/L)	Cloro Residual (mg/L)	Hierro Total (mg/L)	SST(mg/L)	Turbidez (NTU)	pH
28/04/2010	NR	0,02	NR	NR	NR	NR
29/04/2010	NR	NR	NR	0	1,25	NR
30/04/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,07
03/05/2010	NR	0,12	NR	NR	NR	7,78
04/05/2010	NR	NR	NR	0	0,38	NR
05/05/2010	NR	0,01	NR	NR	NR	NR
06/05/2010	NR	NR	NR	1	0,34	NR
07/05/2010	2,198	0,1	NR	NR	NR	7,52
10/05/2010	1,312	0,03	NR	NR	NR	7,6
11/05/2010	NR	NR	NR	0	1,37	NR
12/05/2010	1,041	0	NR	NR	NR	NR
13/05/2010	NR	NR	NR	0	0,5	NR
14/05/2010	0,989	0,04	NR	NR	NR	7,39
17/05/2010	0,944	0	NR	NR	NR	7,77
18/05/2010	NR	NR	NR	0	2,03	NR
19/05/2010	NR	0,01	NR	NR	NR	NR
20/05/2010	NR	NR	NR	5	0,83	NR
21/05/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,75
24/05/2010	1,875	0,02	NR	NR	NR	7,22
25/05/2010	NR	NR	NR	0	0,9	NR
27/05/2010	NR	NR	NR	2	0,6	NR
31/05/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,64
03/06/2010	NR	NR	NR	2	2,33	NR
04/06/2010	NR	0	NR	NR	NR	8,16
07/06/2010	NR	0	0,148	NR	NR	7,32

08/06/2010	NR	NR	NR	3	0,58	NR
09/06/2010	NR	0	0,022	NR	NR	NR
10/06/2010	NR	NR	NR	3	0,58	NR
11/06/2010	NR	0	0,049	NR	NR	7,77
14/06/2010	NR	0	0,017	NR	NR	7,45
15/06/2010	NR	NR	NR	0	0,68	NR
16/06/2010	NR	0	0,025	NR	NR	NR
17/06/2010	NR	NR	NR	1	0,81	NR

**Tabla 3.8 Reporte de la calidad del agua fresca. (Continuación)**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/L)	Cloro Residual (mg/L)	Hierro Total (mg/L)	SST(mg/L)	Turbidez (NTU)	pH
18/06/2010	NR	0	0.038	NR	NR	7,9
21/06/2010	NR	0,02	0,154	NR	NR	7,92
22/06/2010	NR	NR	NR	10	1,3	NR
23/06/2010	NR	0,02	0,142	NR	NR	NR
24/06/2010	NR	NR	NR	0	0,66	NR
25/06/2010	NR	0	0,125	NR	NR	6,7
28/06/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,49
29/06/2010	NR	NR	NR	6	1,57	NR
30/06/2010	NR	0,03	0,154	NR	NR	NR

**Tabla 3.9 Reporte de la calidad del agua filtrada**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg)	Cloro Residual (mg/l)	Hierro Total (mg/l)	SST(mg/l)	Turbidez (NTU)	pH
-------	-----------------------------	-----------------------	---------------------	-----------	----------------	----

	Carbono/l)					
04/01/2010	0,38	0,02	0,076	NR	NR	7,42
05/01/2010	NR	NR	NR	0	0,36	NR
06/01/2010	0,063	0	0,175	NR	NR	NR
07/01/2010	NR	NR	NR	0	0,39	NR
08/01/2010	0,101	0,01	0,163	NR	NR	7,34
11/01/2010	0,092	0	0,132	NR	NR	7,34
12/01/2010	NR	NR	NR	1	2,39	NR
13/01/2010	0,147	0,02	0,1	NR	NR	NR
14/01/2010	NR	NR	NR	0	0,39	NR
15/01/2010	0,035	0,01	0,186	NR	NR	7,39
18/01/2010	0,094	0	NR	NR	NR	7,32
19/01/2010	NR	NR	NR	0	0,29	NR
20/01/2010	0,14	0	0,101	NR	NR	NR
21/01/2010	NR	NR	NR	0	0,53	NR
22/01/2010	0,188	0	0,13	NR	NR	7,98
25/01/2010	0,079	0	0,142	NR	NR	7,52
26/01/2010	NR	NR	NR	2	0,3	NR
27/01/2010	0,358	0	0,12	NR	NR	NR
28/01/2010	NR	NR	NR	2	0,49	NR

**Tabla 3.9 Reporte de la calidad del agua filtrada. (Continuación)**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/l)	Cloro Residual (mg/l)	Hierro Total (mg/l)	SST(mg/l)	Turbidez (NTU)	pH
29/01/2010	0,137	0	0,19	NR	NR	7,48
01/02/2010	0,023	0,04	0,105	NR	NR	7,42

02/02/2010	NR	NR	NR	1	0,6	NR
03/02/2010	0,305	0,02	0,19	NR	NR	NR
04/02/2010	NR	NR	NR	0	0,26	NR
05/02/2010	0,02	0,01	0,126	NR	NR	7,53
08/02/2010	0,164	0	0,25	NR	NR	7,56
09/02/2010	NR	NR	NR	0	0,19	NR
10/02/2010	NR	0	0,182	NR	NR	NR
11/02/2010	NR	NR	NR	1	0	NR
12/02/2010	0,114	0	0,463	NR	NR	7,54
17/02/2010	0,034	0,01	0,105	NR	NR	NR
22/02/2010	0,196	0	NR	NR	NR	7,47
23/02/2010	NR	NR	NR	0	0,29	NR
25/02/2010	NR	NR	NR	1	0,22	7,3
26/02/2010	0,09	0,01	NR	NR	NR	7,38
01/03/2010	NR	0,02	0,142	NR	NR	7,44
03/03/2010	NR	0,01	0,186	NR	NR	NR
04/03/2010	NR	NR	NR	1	0,76	NR
05/03/2010	NR	0	0,18	NR	NR	7,65
08/03/2010	NR	NR	0,177	NR	NR	NR
10/03/2010	NR	0,01	0,14	NR	NR	NR
11/03/2010	NR	NR	NR	8	2,02	NR
12/03/2010	NR	0,01	0,13	NR	NR	7,48
16/03/2010	NR	NR	NR	4	1,52	NR
17/03/2010	NR	0	0,089	NR	NR	NR
19/03/2010	NR	0	0,349	NR	NR	7,47
22/03/2010	NR	0	0,006	NR	NR	7,54
23/03/2010	NR	NR	NR	11	3,74	NR
25/03/2010	NR	NR	NR	1	0,57	NR



26/03/2010	NR	0,01	0,081	NR	NR	7,23
05/04/2010	NR	NR	0,068	NR	NR	NR
06/04/2010	NR	NR	NR	2	0,11	NR

**Tabla 3.9 Reporte de la calidad del agua filtrada. (Continuación)**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/l)	Cloro Residual (mg/l)	Hierro Total (mg/l)	SST(mg/l)	Turbidez (NTU)	pH
07/04/2010	NR	0	0,038	NR	NR	NR
08/04/2010	NR	NR	NR	1	0,17	NR
09/04/2010	NR	0,01	0,047	NR	NR	7,25
12/04/2010	NR	0,07	0,044	NR	NR	7,55
13/04/2010	NR	NR	NR	2	0,14	NR
14/04/2010	NR	0,01	0,026	NR	NR	NR
15/04/2010	NR	NR	NR	1	0,09	NR
16/04/2010	NR	0,02	NR	NR	NR	7,41
19/04/2010	1,467	NR	0,144	NR	NR	NR
21/04/2010	1,346	0,01	NR	NR	NR	NR
22/04/2010	NR	NR	NR	0	0,18	NR
23/04/2010	1,508	0	0,03	NR	NR	7,38
26/04/2010	1,381	0,02	NR	NR	NR	7,38
27/04/2010	NR	NR	NR	0	0,4	NR
28/04/2010	NR	0,01	NR	NR	NR	NR
29/04/2010	NR	NR	NR	1	0,66	NR
30/04/2010	NR	0,01	NR	NR	NR	7,12
03/05/2010	NR	0,08	NR	NR	NR	7,4

04/05/2010	NR	NR	NR	0	0,12	NR
05/05/2010	NR	0,01	NR	NR	NR	NR
06/05/2010	NR	NR	NR	0	0,24	NR
07/05/2010	1,923	0,04	NR	NR	NR	7,63
10/05/2010	1,054	0	NR	NR	NR	7,85
11/05/2010	NR	NR	NR	0	0,62	NR
12/05/2010	0,571	0,03	NR	NR	NR	NR
13/05/2010	NR	NR	NR	0	0,75	NR
14/05/2010	0,652	0,01	NR	NR	NR	7,41
17/05/2010	0,555	0	NR	NR	NR	7,48
18/05/2010	NR	NR	NR	0	0,72	NR
19/05/2010	NR	0,01	NR	NR	NR	NR
20/05/2010	NR	NR	NR	3	0,22	NR
21/05/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,21
24/05/2010	1.547	0,01	NR	NR	NR	7,18

**Tabla 3.9 Reporte de la calidad del agua filtrada. (Continuación)**

Fecha	Carbono Orgánico Total (mg Carbono/l)	Cloro Residual (mg/l)	Hierro Total (mg/l)	SST(mg/l)	Turbidez (NTU)	pH
25/05/2010	NR	NR	NR	0	0,32	NR
27/05/2010	NR	NR	NR	0	0,37	NR
31/05/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,69
03/06/2010	NR	NR	NR	0	0,86	NR
04/06/2010	NR	NR	NR	NR	NR	7,84
07/06/2010	NR	0	0,145	NR	NR	7,17

08/06/2010	NR	NR	NR	2	0,24	NR
09/06/2010	NR	0	0,022	NR	NR	NR
10/06/2010	NR	NR	NR	0	0,07	NR
11/06/2010	NR	0	0,029	NR	NR	7,39
14/06/2010	NR	0	0,105	NR	NR	7,12
15/06/2010	NR	NR	NR	0	0,81	NR
16/06/2010	NR	0	0,02	NR	NR	NR
17/06/2010	NR	NR	NR	0	0,22	NR
18/06/2010	NR	0	0,102	NR	NR	7,19
21/06/2010	NR	0	0,109	NR	NR	7,02
22/06/2010	NR	NR	NR	9	0,06	NR
23/06/2010	NR	0,02	0,126	NR	NR	NR
24/06/2010	NR	NR	NR	0	0,24	NR
25/06/2010	NR	0	0,106	NR	NR	6,73
28/06/2010	NR	0	NR	NR	NR	7,18
29/06/2010	NR	NR	NR	4	0,7	NR
30/06/2010	NR	0,01	0,234	NR	NR	NR

NR: No reportado ó no realizado.

Una vez realizado todo el proceso de desmineralización del agua fresca, se debe verificar que la calidad de esta agua cumpla con los estándares que se requiere para el sistema de generación de vapor, ya que los equipos aguas abajo son susceptibles operacionalmente a los cambios mínimos que se produzcan en la calidad del agua desmineralizada, por tal razón se identificaron cuales son los valores dentro de los que debe obtenerse los parámetros de esta agua. En la tabla 3.10 se muestran los parámetros de calidad del agua establecidos por diseño.

**Tabla 3.10 Parámetros de calidad del agua desmineralizada, establecidos por diseño.**

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	18-28	°C
Dureza total	< 0,5	ppm CaCO <sub>3</sub>
Conductividad	< 10	μS/cm (a 25°C)
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	< 0,02	ppm SiO <sub>2</sub>
Sodio	1	ppm (como Na <sup>+</sup> )
Hierro	< 0,02	ppm (como Fe)
Carbonatos	0	ppm CaCO <sub>3</sub>
pH	7,5 -8,8	adimensional
Materia orgánica (COT)	< 3	ppm KmnO <sub>4</sub>
Cloro Libre	0	ppm Cl <sub>2</sub>
Sólidos disueltos Totales (TDS)	< 1	ppm
Sólidos Suspendidos totales(TSS)	<0,03	ppm
Aluminio	No localizable	ppm (como Al)
CO <sub>2</sub> disuelto	No detectable	ppm
Aceite y grasa	0	ppm
Cobre Cu	No detectable	ppm (como Cu)

Nota: Los valores indicados deben ser cumplidos, como valores instantáneos, durante el ciclo de servicio completo.

En la tabla 3.11 se muestra el reporte de los análisis realizados al agua ya desmineralizada correspondiente al tren A durante un período de 6 meses, los reportes para los trenes B, C y el tanque de agua desmineralizada se encuentra en las tablas B.10, B.11 y B.12, respectivamente.

**Tabla 3.11 Reporte de la calidad del agua desmineralizada del tren A**

Fecha	Conductividad (μS/cm)	Dureza Total (ppm)	Sílice (mg/l)	pH
24/01/2010	1,58	NR	NR	7,78
27/01/2010	9,76	0,173	0,036	9,4

31/01/2010	3,45	0,159	NR	8,54
01/02/2010	6,85	NR	NR	9,32
03/02/2010	2,17	0,357	0,057	6,79
05/02/2010	23,69	0,923	NR	9,69
10/02/2010	3,99	0,121	NR	8,76

**Tabla 3.11 Reporte de la calidad del agua desmineralizada del tren A.  
(Continuación)**

Fecha	Conductividad ( $\mu$ S/cm)	Dureza Total (ppm)	Sílice (mg/l)	pH
17/02/2010	3,23	0,176	0,017	8,83
24/02/2010	10,14	0,038	0,005	9,61
24/02/2010	15,49	0,126	0,008	9,8
25/02/2010	2,38	0,639	0,004	8,92
26/02/2010	2,38	0,516	0,008	9,98
03/03/2010	2,56	0,381	0,004	6,6
07/04/2010	5,68	0,463	0,02	9,26
09/04/2010	NR	NR	NR	10,14
14/04/2010	32,23	0,643	0,099	10,11
05/05/2010	14,49	0,104	0,014	8,96
06/05/2010	9,56	NR	NR	9,83
12/05/2010	5,16	0,345	0,11	8,76
14/05/2010	61,22	NR	NR	12,96
15/05/2010	7,29	NR	NR	8,74
16/05/2010	5,13	NR	NR	NR
18/05/2010	4,68	NR	NR	8,79
19/05/2010	129,5	0,103	0,025	10,39
21/05/2010	NR	NR	NR	8,77
24/05/2010	12,51	NR	NR	9,17
02/06/2010	158,4	NR	NR	10,49
09/06/2010	37,73	0,153	0,049	9,05
16/06/2010	8,89	0,181	0,028	9,36

30/06/2010	8,34	0,0008	0,632	9,13
------------	------	--------	-------	------

NR: No realizado ó no reportado

Las condiciones de operación establecidas por diseño para los equipos de la unidad de producción de agua desmineralizada se recopilaron revisando el manual de descripción de la unidad, la información se refleja en la tabla 3.12, la cual se utilizó como patrón para comparar y verificar la condición de operación actual de estos equipos, a su vez la operatividad de la unidad.

**Tabla 3.12 Parámetros de diseño de la unidad de desmineralización**

Equipo	Cantidad	Variable	Rango de operación
Filtro de carbón	5	Flujo (m <sup>3</sup> /h)	120-480
		Presión diferencial, (bar)	0,5 – 0,8
Intercambiador catiónico	3	Flujo (m <sup>3</sup> /h)	240-480
		Presión diferencial (bar)	1,0 - 1,3
		Presión dif. trampa (bar)	0,02
Descarbonatador	3	Nivel (%)	50
Intercambiador aniónico	3	Flujo (m <sup>3</sup> /h)	240-480
		Presión diferencial (bar)	1,0 - 1,5
		Presión dif. trampa (bar)	0,02
Tanque de agua desmineralizada	1	Nivel (%)	80- 90
Tanque de Soda Caustica	1	Nivel (%)	76 - 87

Tanque de Ácido sulfúrico	1	Nivel (%)	76 - 87
---------------------------	---	-----------	---------

Los datos recopilados para el sistema de filtración con carbón activado se muestran en la tabla 3.13, para estos se obtuvo el registro de flujo y presión diferencial, durante un período de seis meses de operación.

**Tabla 3.13 Flujo y presión diferencial del sistema de filtración con carbón activado.**

Tiempo	Agua fresca (ton/h)	Presión diferencial (bar)				
		Filtro A	Filtro B	Filtro C	Filtro D	Filtro S
01/01/2010	118,74	0,0000	0,2654	0,2574	0,2667	0,0000
07/01/2010	143,88	0,0000	0,0930	0,2593	0,2524	0,1961
14/01/2010	57,05	0,0000	0,1908	0,1911	0,1905	0,1598
21/01/2010	236,70	0,0000	0,4582	0,4526	0,4621	0,3062
28/01/2010	321,44	0,3069	0,3987	0,4031	0,4069	0,6402
07/02/2010	511,81	0,6195	0,6636	0,7018	0,7323	0,5155
14/02/2010	471,82	0,6301	0,6131	0,6539	0,6907	0,5083
21/02/2010	361,31	0,5649	0,5453	0,5484	0,5699	0,5083
28/02/2010	377,48	0,7303	0,6902	0,6929	0,7237	0,5083
07/03/2010	368,22	0,4286	0,5011	0,7751	0,5448	0,5083
14/03/2010	389,71	0,4800	0,5285	0,4313	0,5319	0,8661
21/03/2010	392,10	0,4181	0,5030	0,4281	0,4755	0,4984

**Tabla 3.13 Flujo y presión diferencial del sistema de filtración con carbón activado. (Continuación)**

Tiempo	Agua fresca (ton/h)	Presión diferencial (bar)				
		Filtro A	Filtro B	Filtro C	Filtro D	Filtro S

28/03/2010	387,84	0,4064	0,4591	0,3427	0,4361	0,7152
07/04/2010	351,41	0,4240	0,4682	0,3374	0,4448	0,7152
14/04/2010	405,35	0,2418	0,3989	0,3396	0,3959	0,6082
21/04/2010	333,11	0,4093	0,4771	0,4318	0,4758	0,6067
28/04/2010	372,54	0,4143	0,4496	0,3627	0,4170	0,3511
07/05/2010	385,26	0,6449	0,6803	0,5302	0,6595	0,5835
14/05/2010	279,33	0,3321	0,2855	0,3131	0,3266	0,3159
21/05/2010	364,12	0,6047	0,5154	0,5880	0,6186	0,6118
28/05/2010	389,09	0,6429	0,6069	0,6390	0,6965	0,3382
07/06/2010	425,90	0,4634	0,3255	0,4501	0,4657	0,4043
14/06/2010	243,21	0,3546	0,3130	0,3560	0,3594	0,4043
21/06/2010	331,88	0,6216	0,5811	0,6318	0,6513	0,4043
28/06/2010	284,68	0,5354	0,5371	0,5474	0,4859	0,4043

La información recopilada acerca del nivel de los tanques de almacenamiento de agua desmineralizada y los químicos utilizados para la regeneración iónica, se muestra en la tabla 3.14, los datos corresponden a un período de operación de seis meses.

**Tabla 3.14 Niveles de los tanques de agua desmineralizada, soda caustica y ácido sulfúrico.**

Tiempo	Tanque de agua desmi. (%)	Tanque de soda caustica (%)	Tanque de ácido sulfúrico (%)
01/01/2010	91,92	60,41	79,52
07/01/2010	96,48	38,82	68,62
14/01/2010	94,59	62,52	62,15
21/01/2010	91,03	42,53	50,38
28/01/2010	81,90	53,76	57,78
07/02/2010	84,03	64,98	40,82



14/02/2010	51,81	56,57	31,72
21/02/2010	53,95	67,36	22,79
28/02/2010	53,41	84,07	51,75

**Tabla 3.14 Niveles de los tanques de agua desmineralizada, soda caustica y ácido sulfúrico. (Continuación)**

Tiempo	Tanque de agua desmi. (%)	Tanque de soda caustica (%)	Tanque de ácido sulfúrico (%)
07/03/2010	43,24	93,90	82,32
14/03/2010	48,72	71,41	75,76
21/03/2010	54,56	58,68	71,25
28/03/2010	55,84	66,87	89,65
07/04/2010	57,70	65,95	37,19
14/04/2010	48,56	90,87	70,44
21/04/2010	75,43	45,15	73,22
28/04/2010	37,38	86,18	83,01
07/05/2010	36,60	83,53	82,76
14/05/2010	81,61	86,28	76,99
21/05/2010	94,34	83,69	68,03
28/05/2010	79,89	91,10	62,43
07/06/2010	65,62	44,19	69,84
14/06/2010	94,88	65,16	65,22
21/06/2010	92,67	61,72	69,68
28/06/2010	91,49	77,32	77,54

En la tabla 3.15 se muestran las variables operacionales que fueron recopiladas durante un período de seis meses de operación del tren A de desmineralización de agua, los datos recopilados para los trenes B y C se encuentran reflejados en las tablas B.13 y B.14 respectivamente de la sección de anexos.

**Tabla 3.15 Datos operacionales del tren A de desmineralización de agua.**

Tiempo	Alim. tren	Inter. Catiónico	Trampa Inter. catiónico	Descarb onatado r	Trampa Inter. aniónico	Inter. aniónico	Inter. Aniónico
	Flujo (ton/h)	Presión dif. (bar)	Presión dif. (bar)	Nivel (%)	Presión dif. (bar)	Cond (µS/cm)	Presión dif. (bar)
01/01/2010	52,25	0,04111	0,00360	51,98	0,01201	2,17	0,06309
07/01/2010	137,48	0,23125	0,02075	51,84	0,03069	0,46	0,45423
14/01/2010	89,37	0,10378	0,01237	51,96	0,01891	1,17	0,20777
21/01/2010	134,04	0,26000	0,02148	51,95	0,03169	2,15	0,40772

**Tabla 3.15 Datos operacionales del tren A de desmineralización de agua.**

**(Continuación)**

Tiempo	Alim. tren	Inter. Catiónico	Trampa Inter. catiónico	Descarb onatado r	Trampa Inter. aniónico	Inter. aniónico	Inter. Aniónico
	Flujo (ton/h)	Presión dif(bar)	Presión dif (bar)	Nivel (%)	Presión dif (bar)	Cond (µS/cm)	Presión dif(bar)
28/01/2010	149,06	0,38997	0,02893	49,46	0,04065	3,71	0,53226
07/02/2010	177,82	0,50452	0,03640	50,41	0,05084	9,19	0,59554

0								
14/02/201								
0	207,31	0,69265	0,04940	52,48	0,06496	7,66	0,73095	
21/02/201								
0	201,23	0,73779	0,04742	50,86	0,06248	4,24	0,73973	
28/02/201								
0	220,48	0,92532	0,05372	51,00	0,06958	4,78	0,87264	
07/03/201								
0	207,02	0,95538	0,04909	53,67	0,06370	4,84	0,75791	
14/03/201								
0	213,26	0,94946	0,04935	51,44	0,06750	6,72	0,87755	
21/03/201								
0	202,77	0,90937	0,04902	45,53	0,06530	5,36	0,76450	
28/03/201								
0	216,22	0,96098	0,04906	43,79	0,06693	4,16	0,79763	
07/04/201								
0	224,40	1,03986	0,06134	51,57	0,07310	4,71	0,91885	
14/04/201								
0	178,47	0,78066	0,04527	48,82	0,05185	8,31	0,58771	
21/04/201								
0	189,05	0,85957	0,04982	46,54	0,05472	8,23	0,69139	
28/04/201								
0	201,55	0,92923	0,05488	46,34	0,06017	5,73	0,71094	
07/05/201								
0	199,39	0,91314	0,05660	53,82	0,05795	7,16	0,73309	
14/05/201								
0	113,61	0,56678	0,02270	61,90	0,02986	10,07	0,27697	
21/05/201								
0	61,89	0,31555	0,01241	55,66	0,01628	5,88	0,12534	

28/05/201	0	145,46	0,66594	0,03894	53,00	0,03862	6,83	0,48517
07/06/201	0	205,50	1,01748	0,05693	46,47	0,06169	6,32	0,73785
14/06/201	0	87,15	0,53551	0,02241	48,94	0,02197	4,85	0,26285
21/06/201	0	176,49	0,93506	0,04705	52,13	0,04644	4,52	0,59028
28/06/201	0	152,29	0,81566	0,04215	55,70	0,04146	6,18	0,48967

### 3.4 Detección de las desviaciones operacionales que causan que el proceso disminuya su eficiencia o producción

#### 3.4.1 Análisis de simulación de los trenes de desmineralización

Este objetivo se desarrolló con el fin de detectar fallas a nivel operacional que impacten la eficiencia en la remoción de cationes y aniones, en el que se contó con el apoyo de la empresa proveedora de las resinas para realizar una simulación del sistema de desmineralización de agua, a través del programa Lewatit, por medio del cual se pudieron verificar las condiciones de funcionamiento de la unidad, comparándolo con los datos operacionales del sistema, de esta manera se contribuyó al análisis para detectar fallas y tomar medidas correctivas para mejorar el sistema. En la tabla 3.16 se muestran los parámetros de calidad del agua (agua filtrada) utilizados para correr la simulación.

**Tabla 3.16 Parámetros de calidad del agua filtrada, utilizados para la simulación con el programa Lewatit**

Parámetro	Unidades	Método	Valor
pH	Unidades de pH	SM 4500-H+B	7,0 a 19,7 °C

Cloro residual	mg/L	SM 4500-Cl G	0,7
Turbidez	NTU	SM 2130 B	3,1
Color real	UC	SM 2120 B	4 a pH 7,0
Dureza total	mg/L	SM 2340 C	116
Dureza cálcica	mg/L	SM 3500 Ca B	107
Sulfatos	mg/L	ASTM D 516	31,4
Cloruros	mg/L	SM 4500-Cl- D	10,2
Alcalinidad total	mg/L	SM 2320-B	72
Conductividad	µmhos/cm	SM 2510 B	250 a 25°C
Fosfatos	mg/L	SM 4500 PE	< 0,03
Sólidos disueltos	mg/L	SM 2540 C	128
Hierro	mg/L	SM 3500 Fe B	0,03

Otros datos requeridos para realizar la simulación fueron los valores de los parámetros de calidad del agua desmineralizada producida, en la tabla 3.17 se muestran los parámetros comúnmente monitoreados.

**Tabla 3.17 Datos de los parámetros principales monitoreados a la salida del proceso de producción de agua desmineralizada**

Fecha	pH	Conductividad (µS/cm)	Sílice (mg/l)	Dureza (mg/l)
02-ago-10	8,29	1,58	NR	NR
03-ago-10	8,24	2,93	NR	NR
04-ago-10	8,11	24,36	0,012	0,637
05-ago-10	8,68	2,99	NR	NR
06-ago-10	8,55	1,36	NR	NR
09-ago-10	6,46	7,83	NR	NR
10-ago-10	7,64	15,23	NR	NR

**Tabla 3.17 Datos de los parámetros principales monitoreados a la salida del proceso de producción de agua desmineralizada. (Continuación)**

Fecha	pH	Conductividad	Sílice (mg/l)	Dureza (mg/l)
-------	----	---------------	---------------	---------------

		( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		
11-ago-10	8,29	2,02	0,006	0,862
12-ago-10	7,75	2,16	NR	NR
13-ago-10	8,01	3,14	NR	NR
16-ago-10	8,69	11,9	NR	NR
17-ago-10	7,9	6,68	NR	NR
18-ago-10	6,98	2,18	0,026	0,067
19-ago-10	6,93	4,34	NR	NR
20-ago-10	7,75	4,4	NR	NR
24-ago-10	8,94	6,17	NR	NR
25-ago-10	8,94	25,19	0,044	1
26-ago-10	8,29	3,33	NR	NR
30-ago-10	8,52	3,27	NR	NR
31-ago-10	8,48	25,4	NR	NR
01-sep-10	7,32	3,74	0,021	0,159
02-sep-10	7,44	43,2	NR	NR
03-sep-10	8,44	0,18	NR	NR
06-sep-10	9,01	3,61	NR	NR
09-sep-10	8,92	19,77	NR	NR
10-sep-10	10,2	3,74	NR	NR
13-sep-10	9,34	40,19	NR	NR
14-sep-10	8,95	7,48	NR	NR

### 3.4.2 Análisis del tren B de desmineralización de agua

Adicional a la simulación se realizó una prueba de campo en la que se monitoreó el comportamiento del tren B de intercambio iónico, luego de haber pasado por la etapa de regeneración se pudo verificar la carga promedio de agua producida, lo que sirvió como indicador para realizar el muestreo diario quedando distribuido de la siguiente manera:

- Primer muestreo a 200 ton de agua producida (1 h aproximadamente).

- Segundo muestreo a las 1.500 ton de agua producida (a las 6 h aproximadamente).
- Tercer muestreo a las 3.000 ton de agua producida (a las 12 h aproximadamente).

La prueba fue realizada durante una semana, se tomaron muestras a la salida del intercambiador catiónico y aniónico simultáneamente para verificar los parámetros de calidad como sílice, dureza, conductividad y pH. Todas estas muestras obtenidas durante el proceso de desmineralización se analizaron en el laboratorio de Petrocedeño conjuntamente con la ayuda del personal que labora en dicho laboratorio. En la tabla 3.18 se muestra el resumen de la frecuencia de análisis y muestreos realizados durante las pruebas de campo.

**Tabla 3.18 Reporte de los análisis realizados durante el proceso de desmineralización de agua en el tren B**

Días	Intercambiador	Agua producida (ton)	Análisis			
			Sílice (mg/l)	Dureza(ppm)	Cond (µS/cm)	pH
Lunes	Catiónico	200	NR	NR	416,2	3,06
		1500	NR	NR	426,9	3
		3000	NR	NR	366,7	3,12
	Aniónico	200	0	0,442	1,413	6,4
		1500	0,032	0,525	1,102	6,02
		3000	0,01	0,614	1,008	6,51
Martes	Catiónico	200	NR	NR	539,5	2,86
		1500	NR	NR	473,3	2,95
		3000	NR	NR	420,3	3,1
	Aniónico	200	0,02	0,351	1,897	6,62
		1500	0,011	0,344	2,275	6,85
		3000	0,018	0,374	18,32	9,78

Miércoles	Catiónico	200	NR	NR	470,2	3,1
		1500	NR	NR	452,1	2,99
		3000	NR	NR	342,7	3,14
	Aniónico	200	0,02	0,244	2,3	6,79
		1500	0,018	0,162	1,186	6,6
		3000	0,02	2,83	62,18	10,33
Jueves	Catiónico	200	NR	NR	625,7	2,82
		1500	NR	NR	470,5	2,93
		3000	NR	NR	465,4	2,93
	Aniónico	200	0,01	0,38	3,502	6,89
		1500	0,028	0,257	4,034	7,01
		3000	0,017	0,113	1,455	7,25

**Tabla 3.18 Reporte de los análisis realizados durante el proceso de desmineralización de agua en el tren B. (Continuación)**

Días	Intercambiador	Agua producida (ton)	Análisis			
			Sílice (mg/l)	Dureza(ppm)	Cond (µS/cm)	pH
Viernes	Catiónico	200	NR	NR	473,8	2,93
		1500	NR	NR	465,4	2,9
		3000	NR	NR	460,3	2,83
	Aniónico	200	0,137	1	6,432	9,09
		1500	0,031	1	4,778	9,04
		3000	0,036	1,5	7,9	9,1

➤ **Cálculo del porcentaje de desviación de los parámetros analizados**



Se cálculo el porcentaje de desviación de cada uno de los parámetros analizados con respecto a lo que debería ser por diseño, tomando en cuenta únicamente los resultados de los análisis realizados a la salida del proceso, es decir, la calidad del agua ya producida. A continuación se presenta una muestra de estos cálculos, tomando los datos de sílice para el intercambiador aniónico reflejados de la tabla 3.18.

✓ **Cálculo del promedio de la muestra diaria**

Se procedió a calcular el promedio de las muestras recopiladas en el día lunes, a través de la ecuación 3.1.

$$\bar{X}_d = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec 3.1}$$

Donde:

X d: promedio de la muestra del día.

X<sub>i</sub>: muestra correspondiente a cada producción de agua en el día.

n: número de muestras del día.

$$\bar{X}_d = \frac{0 + 0,032 + 0,01}{3} = 0,014$$

✓ **Cálculo del promedio general**

Por medio de la ecuación 3.2, se pudo calcular el promedio general de las muestras realizadas durante la semana.

$$\bar{X}_g = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Ec 3.2}$$

Donde:

X g: promedio general de la semana

$X_i$ : muestra correspondiente al promedio diario.

$n$ : número de muestras en la semana.

$$\bar{X}_g = \frac{0,014 + 0,016 + 0,019 + 0,018 + 0,068}{5} = 0,027$$

### ✓ Cálculo del porcentaje de desviación

Por medio de la ecuación 3.3, se pudo calcular el porcentaje de desviación del promedio con respecto al valor establecido por diseño.

$$\% Des = \left| \frac{VD - \bar{X}_g}{VD} \right| \cdot 100 \quad Ec 3.3$$

Donde:

% Des: porcentaje de desviación.

VD: valor establecido por diseño para cada parámetro de calidad del agua.

$X_g$ : promedio general de la semana

$$\% Des = \left| \frac{0,02 - 0,027}{0,02} \right| \cdot 100 = 35,00\%$$

Todos los resultados calculados para el parámetro de sílice se encuentran reflejados en la tabla 4.5, de igual forma se realizó para el resto de los parámetros de calidad del agua analizados como la dureza, conductividad y pH.

### **3.5 Propuesta de las acciones necesarias para la producción de agua desmineralizada con la calidad requerida.**

Con el fin de solventar la deficiencia en las áreas de operación para la producción de agua desmineralizada, se realizaron algunas propuestas para actualizar, cambiar, mejorar y mantener los sistemas de operación en línea como los analizadores, válvulas, indicadores (flujo, presión, nivel), bombas, sopladores y equipos principales, lo cual ayude a contribuir con el mejoramiento del sistema de filtración e intercambio iónico. Se propuso la activación completa de la fase de retrolavado de los filtros con carbón activado y de la regeneración de los mismos. Inspección de las resinas catiónicas y aniónicas de los trenes de intercambio iónico. Por otra parte también se planteo un reajuste en el cronograma para la rutina de análisis correspondientes al sistema de producción de agua desmineralizada.

**CAPÍTULO IV**  
**DISCUSIÓN DE RESULTADOS,**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**4.1 Identificación de las variables que intervienen en el proceso de producción de agua desmineralizada**

El monitoreo y control de las variables de proceso para el sistema de filtración con carbón activado, se realiza principalmente para el flujo de alimentación de agua fresca y las caídas de presión en los filtros. En este proceso son removidos sólidos suspendidos y materia orgánica lo cual se refleja en una reducción de la turbidez, compuestos orgánicos totales (COT) y cloro libre presente en el agua obteniéndose de esta manera el agua filtrada, por esta razón estos son los parámetros monitoreados a la salida del proceso.

En la tabla 4.1 se muestran las variables controladas y monitoreadas en el proceso de filtración con carbón activado, a través de los TAG's vinculados al programa PI System. Se pudieron visualizar fácilmente y en tiempo real el seguimiento de cada una de estas variables en esta parte del proceso. De los parámetros de calidad del agua, solo la turbidez cuenta con un sistema de monitoreo y análisis en línea, mientras que los parámetros como la dureza, sólidos suspendidos, materia orgánica, hierro, cloro residual y pH se obtienen mediante análisis diarios en el laboratorio.

**Tabla 4.1 Lista de variables controladas en el sistema de filtración con carbón activado**

Equipo/Línea	Variable Controlada	TAG	Rango de control	Unidad
Alimentación de agua a los filtros	Flujo	FI013	120-480	T/h
Filtro A	Presión diferencial	PDI003	0,5-0,8	bar

Filtro B	Presión diferencial	PDI053	0,5-0,8	bar
Filtro C	Presión diferencial	PDI035	0,5-0,8	bar
Filtro D	Presión diferencial	PDI066	0,5-0,8	bar
Filtro S	Presión diferencial	PDI055	0,5-0,8	bar
Salida de agua de los filtros	Turbidez	AI022	1 max.	NTU

El agua que se obtiene al final del proceso de desmineralización requiere cumplir con las especificaciones necesarias para ingresar a la caldera de generación de vapor, por tal razón los parámetros que se monitorean en el proceso son pH, la dureza total, sílice y conductividad, este último presenta gran atención ya que es el indicativo de cuando se debe parar un tren de desmineralización para entrar en la etapa de regeneración. Las variables como el flujo, la presión y el nivel son monitoreados y controlados durante la operación del proceso para regular las variaciones en la calidad de agua producida. Es la tabla 4.2 se muestra un listado de las variables correspondientes de acuerdo con los tres trenes, se identificaron sus TAG's y la unidad de medida de la variable.

**Tabla 4.2 Lista de variables controladas en el proceso de intercambio iónico**

	Equipo/Línea	Variable Controlada	Rango de control		Unidad
			TAG		
Tren A	Alimentación de agua al tren	Flujo	FC003	240	T/h
	Intercambiador catiónico	Presión diferencial	PDI013	1,0-1,3	bar

	Trampa del Intercambiador catiónico	Presión diferencial	PDI007	0,02	bar
	Descarbonatador	Nivel	LC001	50	%
	Intercambiador aniónico	Presión diferencial	PI003-PI004	1,0-1,5	bar
	Trampa del Intercambiador aniónico	Presión diferencial	PDI014	N.E	bar
	Flujo salida del tren	Conductividad	AI001	<10	µS/cm
Tren B	Alimentación de agua al tren	Flujo	FC004	240	T/h
	Intercambiador catiónico	Presión diferencial	PDI015	1,0-1,3	bar
	Trampa del Intercambiador catiónico	Presión diferencial	PDI010	0,02	bar
	Descarbonatador	Nivel	LC007	50	%
	Intercambiador aniónico	Presión diferencial	PI007-PI008	1,0-1,5	bar
	Trampa del Intercambiador aniónico	Presión diferencial	PDI016	0,02	bar
	Flujo salida del tren	Conductividad	AI002	<10	µS/cm
Tren C	Alimentación de agua al tren	Flujo	FC010	240	T/h
	Intercambiador catiónico	Presión diferencial	PDI017	1,0-1,3	bar
	Trampa del Intercambiador catiónico	Presión diferencial	PDI039	0,02	bar
	Descarbonatador	Nivel	LC010	50	%
	Intercambiador aniónico	Presión diferencial	PI011-PI012	1,0-1,5	bar
	Trampa del Intercambiador aniónico	Presión diferencial	PDI047	0,02	bar

	Flujo salida del tren	Conductividad	AI005	<10	μS/cm
--	-----------------------	---------------	-------	-----	-------

El almacenamiento del agua desmineralizada y químicos utilizados en el proceso de regeneración de las resinas (catiónicas y aniónicas) también es monitoreado, controlando el nivel en los tanques, tal como se muestra en la tabla 4.3, el nivel es medido en forma porcentual, por lo que debe mantenerse dentro de los valores límites para que no ocurran fallas en el proceso.

**Tabla 4.3 Variables controladas en el almacenamiento de agua desmineralizada y químicos (soda y ácido)**

Equipo/Línea	Variable Controlada	TAG	Rango de control	Unidad
Tanque de agua desmineralizada	Nivel	LC003	80- 90	%
Tanque de soda cáustica	Nivel	LI004	76 - 87	%
Tanque de ácido sulfúrico	Nivel	LI006	76 - 87	%

Para facilitar el trabajo al momento de requerir información acerca de la variables monitoreadas y controladas en el proceso de desmineralización, se realizó un listado en una hoja de Excel, donde se identificó el TAG vinculado con el programa PI System, rango de operación de la variable, unidades de la variable, y valores promedios que pueden ser visualizados en un momento específico (Figura 4.1).

DESCRIPCIÓN VARIABLE OPERACIÓN	TAG	TAG PI	RANGO OPERACIÓN	LÍMITE	PROMEDIO DÍA ANTERIOR	VALOR ACTUAL	UNIDADES
Alimentación de agua hacia los filtros de Agua Desmi	FI013	63_FI013_PNT	600		305,3	202,1	t/h
Presión diferencial del filtro de Carbón 06-V-3001 A	PDI003	63_PDI003_PNT	0,5	0,8 max	0,3	0,2	bar
Presión diferencial del filtro de Carbón 06-V-3001 B	PDI053	63_PDI053_PNT	0,5	0,8 max	0,2	0,2	bar
Presión diferencial del filtro de Carbón 06-V-3001 C	PDI035	63_PDI035_PNT	0,5	0,8 max	0,3	0,2	bar
Presión diferencial del filtro de Carbón 06-V-3001 D	PDI066	63_PDI066_PNT	0,5	0,8 max	0,0	0,0	bar
Presión diferencial del filtro de Carbón 06-V-3001 S	PDI055	63_PDI055_PNT	0,5	0,8 max	0,3	0,2	bar
Turbidez a la salida de los filtros	A022	63_A022_PNT		1 max	0,4	0,3	ntu
Flujo de alimentación al tren A	FC003	63_FC003_MEAS		200 max	145,0	-1,0	t/h
Flujo total de alimentación al tren A	FQI003	63_FQI003_OUT		5000 max	914,3	1809,9	tons
Presión diferencial del Catión A 06-V-3002 A	PDI013	63_PDI013_PNT		1,3 max	0,8	0,2	bar
Presión diferencial de la trampa del Catión A 06-V-3002 A	PDI007	63_PDI007_PNT			0,0	0,0	bar
Nivel del tanque descarbonatador tren A 06-V-3003 A	LC001	63_LC001_MEAS	50%		57,5	58,9	%
Presión diferencial del Anión A 06-V-3004 A	PI003-PI004	63_Pi003_PNT-63_Pi004_PNT		1,5 max	0,4	-0,1	bar
Presión diferencial de la trampa del Anión A 06-V-3004 A	PDI014	63_PDI014_PNT			0,0	0,0	bar
Conductividad a la salida del Anión 06-V-3004 A	A001	63_A001_PNT		1 max	5,4	10,1	uS/cm
Flujo de alimentación al tren B	FC004	63_FC004_MEAS		200 max	0,0	0,0	t/h
Flujo total de alimentación al tren B	FQI004	63_FQI004_OUT		6000 max	4095,6	4095,6	tons
Presión diferencial del Catión 06-V-3002 B	PDI015	63_PDI015_PNT		1,3 max	0,0	0,0	bar
Presión diferencial de la trampa del Catión 06-V-3002 B	PDI010	63_PDI010_PNT			0,0	Over Range	bar

**Figura 4.1 Visualización de la hoja resumen, en Excel de las variables monitoreadas y controladas en el proceso de producción de agua desmineralizada.**

#### **4.2 Revisión del funcionamiento de todos los componentes de los sistemas de filtración de carbón activado y de intercambio iónico**

Para efectuar la revisión de los componentes de ambos sistemas, se hizo un seguimiento de su funcionamiento a través de un levantamiento en campo a fin de determinar el estatus de los equipos y la instrumentación asociada a la unidad, específicamente del catión 06 con dispositivos tales como analizadores en líneas, bombas, válvulas, puntos de muestreo y controladores, verificando cuales presentan fallas de operación o se encuentran dañados.

##### **✓ Descripción general de fallas en el sistema**

Los equipos y dispositivos que están fuera de servicio por presentar fallas o daños se encuentran listados en la tabla 4.4, en la cual se describe brevemente la condición por la cual están fuera de servicio.



**Tabla 4.4 Lista de los componentes del sistema de filtración y de intercambio iónico que se encuentran fuera de servicio**

Sistema	Equipo/Dispositivo	TAG	Condición
Filtración	Soplador Retrolavado Filtros	06-K-30-11A	No tiene correa para su funcionamiento
	Bomba Dosificadora Coagulante	06-P-30-12A	No se está usando coagulante en el sistema
	Bomba Dosificadora Coagulante	06-P-30-12S	No se está usando coagulante en el sistema
	Válvula (Agua de Servicios 6")	UV-092	Tiene pase
	Válvula (Desecho de retrolavado 8")	UV-091	Problemas con el interruptor. Falla al cerrar
	Válvula (Agua de drenaje 4")	UV-114	Presenta falla al abrir
	Drenaje de filtro 6"	UV-113	Problemas con el interruptor.
Intercambio iónico	Bomba Tren Desmi. S1	06-P-30-01S1	No se encuentra en el sitio
	Soplador del Descarbonatador S1	06-K-30-01S1	No está el motor ni el soplador
	Soplador del Descarbonatador S2	06-K-30-01S2	Falta el motor y cambio de filtros
	Soplador del Descarbonatador C	06-K-30-01C	No posee motor ni soplador
	Soplador del Descarbonatador S3	06-K-30-01S3	Motor dañado
	Anal. Sílice (Anión 06-V-30-04A)	06-30-AT-008	Válvula de inyección dañada
	Anal. Sílice (Anión 06-V-30-04B)	06-30-AT-016	Reemplazar tarjeta electrónica
	Anal. Sodio (Anión 06-V-30-04C)	06-30-AT-012	Sensor dañado

**Tabla 4.4 Lista de los componentes del sistema de filtración y de intercambio iónico que se encuentran fuera de servicio. (Continuación)**

Sistema	Equipo/Dispositivo	TAG	Condición
---------	--------------------	-----	-----------

<b>Intercambio Iónico</b>	Anal. Sodio (Cación 06-V-30-02A)	06-30-AT-015	Sensor dañado
	Anal. Sodio (Cación 06-V-30-02B)	06-30-AT-017	Sensor dañado
	Anal. Sodio (Cación 06-V-30-02C)	06-30-AT-018	Sensor dañado
	Anal. Sílice (06-T-30-02)	06-30-AT-009	Válvula de inyección dañada
	Anal. pH (06-P-30-09 A/S)	06-30-AT-010	Sensor dañado
<b>Paquete de Químicos</b>	Anal. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Bomba 06-P-30-05 A/S)	06-30-AT-019	Reemplazar válvula de flujo de muestra
	Anal. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Bomba 06-P-30-05 B/S)	06-30-AT-020	Reemplazar válvula de flujo de muestra
	Anal. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Bomba 06-P-30-05 C/S)	06-30-AT-021	Reemplazar válvula de flujo de muestra
	Anal. NaOH (Bomba 06-P-30-07B)	06-30-AT-003	Reemplazar válvula de flujo de muestra
	Anal. NaOH (Bomba 06-P-30-07C)	06-30-AT-004	Reemplazar válvula de flujo de muestra
	Anal. NaOH (Bomba 06-P-30-07A)	06-30-AT-006	Reemplazar válvula de flujo de muestra
	Bomba dosificadora cáustico	06-P-30-07S1	No se encuentra en el sitio
	Bomba dosificadora cáustico	06-P-30-07S2	No se encuentra en el sitio
	Bomba dosificadora cáustico	06-P-30-07S3	No se encuentra en el sitio
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-05A	No se usa el sistema. Presenta problemas recurrentes como lo son fugas, problemas de corrosión en las líneas, las bombas trabajan de manera deficiente, entre otros.
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-05S1	
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-05B	
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-05S2	

	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-05C	
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-05S3	
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-13*	No está el motor
	Bomba dosificadora de ácido	06-P-30-15*	Se encuentra desacoplada y presenta fugas

Nota: \* Sistema nuevo de inyección de ácido

Luego de haber observado todos los componentes del sistema de desmineralización, se recomienda tomar las acciones necesarias para recuperar o cambiar los equipos y dispositivos que se encuentran dañados.

Referente al uso de coagulante en el sistema, este no se está inyectando debido a que el agua de alimentación presenta condiciones dentro de los límites de operatividad.

Los analizadores reportados en la tabla 4.4 requieren ser sustituidos por otros nuevos, ya que son de vital importancia para mantener el control de los parámetros de calidad del agua dentro de los valores requeridos para la operación. A pesar de que no se monitorea porque están dañados los analizadores, el sistema opera; en el caso de la inyección de químicos se realiza por ensayo y error. Para los analizadores de los parámetros de calidad como sílice y sodio, estos se miden con un valor diario y puntual a través de análisis de laboratorio, lo cual no permite observar las incidencias o los cambios que ocurren durante el día.

Cabe resaltar que el diseño original del paquete de químicos eran dos bombas de ácido en cada tren, una en servicio y otra en respaldo, actualmente el sistema nuevo consta de cuatro bombas, las cuales pueden usadas para todos los trenes, el problema que presentan estas bombas es que no responden a los movimientos de los ajustes desde el sistema de control distribuido (DCS), debido a que los variadores tienen un ajuste fijo, lo que ocasiona que durante las regeneraciones se tienda a gastar más agua desmineralizada para poder alcanzar las concentraciones deseadas. La solución de este problema es que los variadores sean reparados para que el

proceso de regeneración se realice como debe ser y no se tenga que gastar más agua de la que se requiere para la regeneración de las resinas.

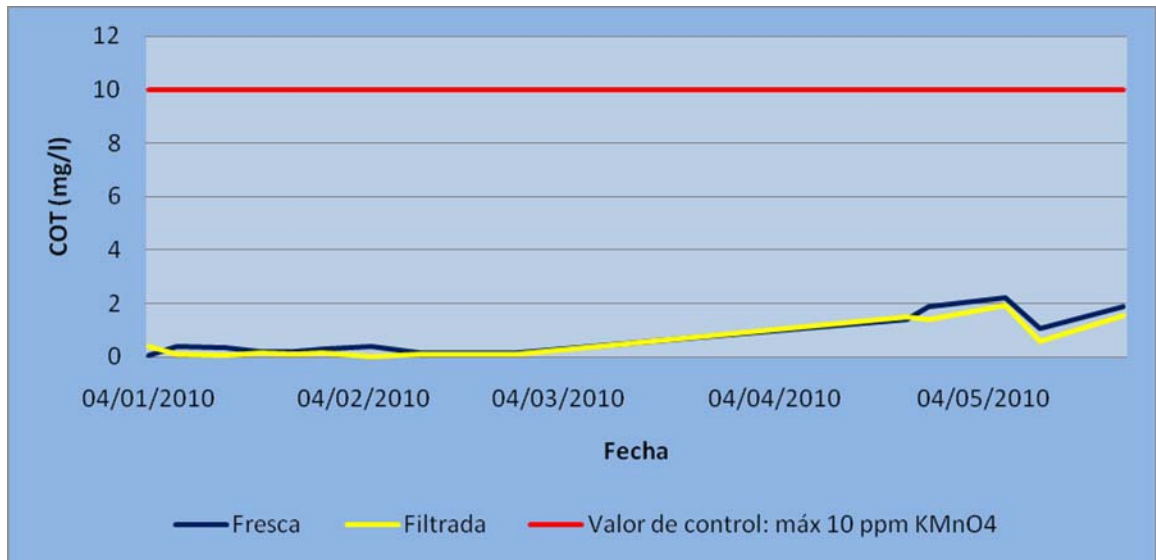
### **4.3 Comparación de las condiciones de operación actual de la unidad con las condiciones de diseño**

Después de recopilados los datos se procedió a realizar las gráficas correspondientes a los parámetros de calidad del agua y las condiciones operacionales del proceso, tomando como base un período de tiempo de 6 meses. A continuación se muestran los resultados obtenidos para los sistemas de filtración y desmineralización.

#### **4.3.1 Sistema de filtración de agua**

Los parámetros que fueron monitoreados para el control de la calidad del agua fresca y agua filtrada fueron carbón orgánico total, cloro residual, hierro, sólidos suspendidos, turbidez y pH. Cabe resaltar que el agua fresca que ingresa al sistema de filtración de Petrocedeño es comprada al condominio de Pequiven (Aguas Industriales Jose), siendo esta un agua tratada que cumple con los parámetros de diseño requeridos para ingresar al sistema. Por otro lado los parámetros operacionales que se monitorearon son el flujo de agua fresca que ingresa a la unidad y la caída de presión o presión diferencial que se genera en cada uno de los filtros por efecto de la retención de sólidos.

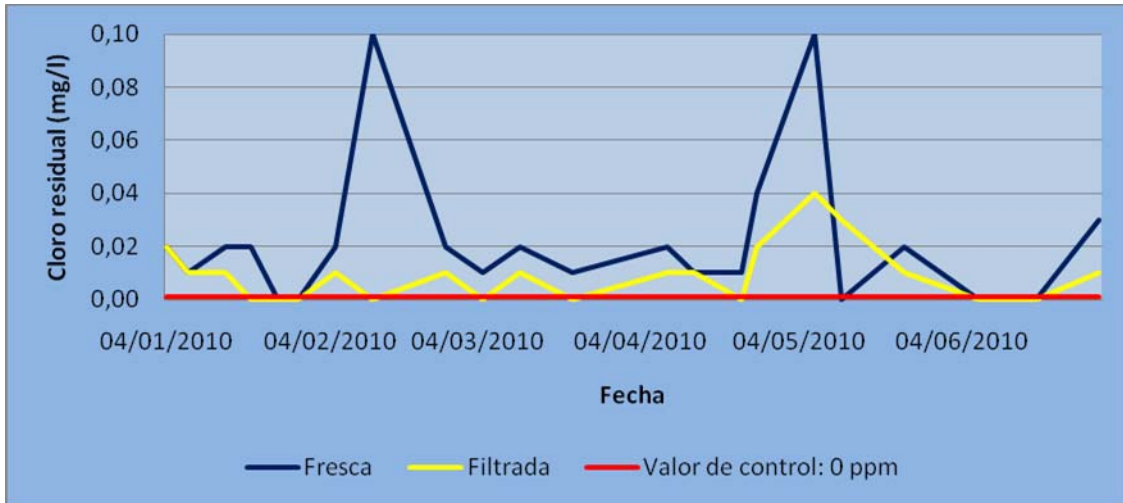
En la Figura 4.5 se muestra la gráfica representativa del carbón orgánico total presente en el agua fresca (línea de color azul) y en el agua filtrada (línea de color amarillo), donde se puede observar que existe un solapamiento entre las líneas de color azul y amarillo, lo que quiere decir que durante el proceso de filtración es removida poca materia orgánica, lo cual es entendible ya que el agua fresca que ingresa al sistema de filtración presenta niveles por debajo de 2mg/l de carbono orgánico total, este valor se encuentra muy por debajo del rango de control de 9-18 mg/l para el agua fresca y de un máximo de 10mg/l establecido por diseño para el agua filtrada.



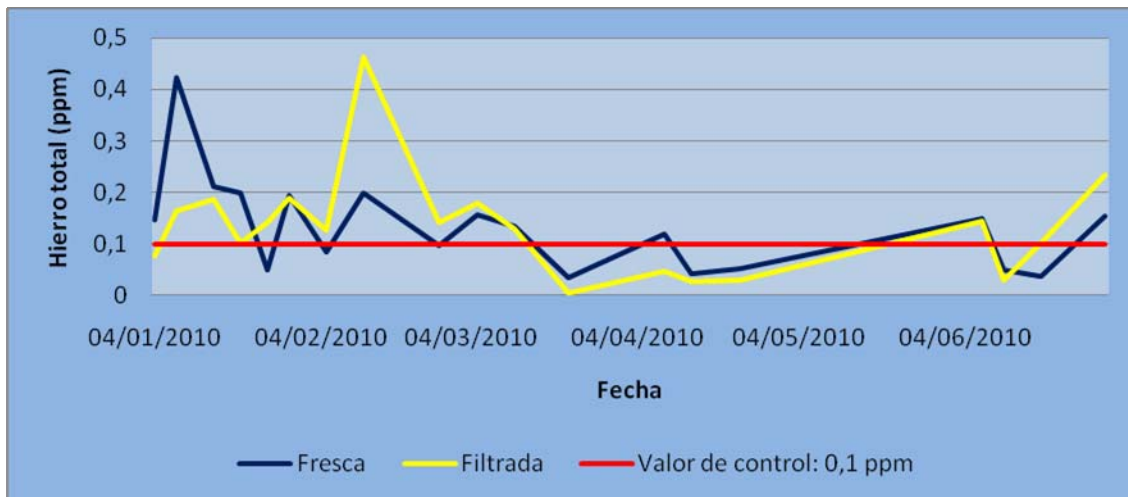
**Figura 4.5 Comportamiento del carbón orgánico total en el agua fresca y filtrada**

En la figura 4.6 se observa el comportamiento de cloro residual en el agua fresca (color azul) y agua filtrada (color amarillo), notándose que el agua fresca presenta una tendencia de 0,02 ppm por encima del rango de control establecido por diseño (0 ppm).

Los picos que se observan de hasta 0,1 ppm por encima de esta tendencia son valores puntuales de aumento de la cantidad de cloro residual presente en el agua fresca que ingresa al sistema, por otra parte el agua filtrada presenta una tendencia de aproximadamente 0,01 ppm por encima del valor establecido por diseño, reflejando que en parte se debe a que el agua viene con mas cloro del que debería y que los filtros no están removiendo el contenido de cloro en su totalidad. El valor del cloro debe ser obligatoriamente 0 ppm, debido a que la presencia del mismo, afecta a las resinas catiónicas en el sistema de desmineralización.



**Figura 4.6 Comportamiento del cloro residual en el agua fresca y filtrada**



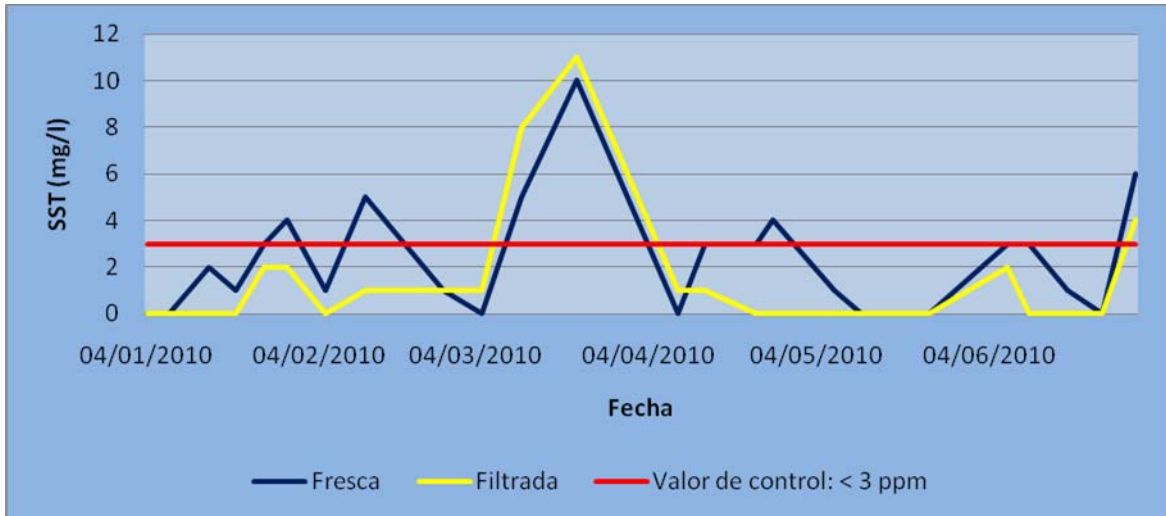
**Figura 4.7 Comportamiento del hierro en el agua fresca y filtrada**

Con respecto al contenido de hierro en el agua fresca y filtrada se puede observar en la figura 4.7 que durante los tres primeros meses el contenido de hierro estaba por encima del valor de control establecido por diseño para el agua filtrada (0,1ppm), presentando valores promedios de 0,2 ppm y eventualmente picos de 0,4 ppm por encima del parámetro de agua fresca, esto probablemente se debió a que ocurrió un aumento de flujo ocasionando turbulencia en los filtros, removiendo algunas partículas de hierro retenidas en el carbón activado. Durante los tres meses restantes el

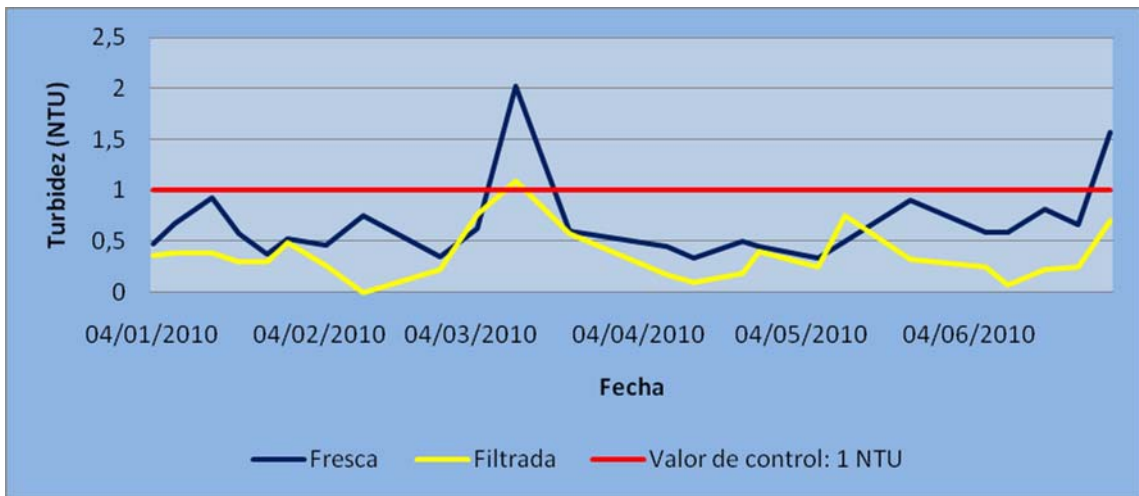
contenido de hierro se encontraba mayormente entre 0 y 0,1 ppm, esto pudo deberse a que la calidad del agua fresca que alimenta al sistema de filtración se encontraba por debajo del parámetro de control establecido para el agua filtrada, es decir más bajo que el valor requerido para el agua fresca (0 - 0,3 ppm), que recibe el mejorador. Para el último mes se observa un pico ligeramente por encima del parámetro de control. De manera general se puede decir que la cantidad de hierro removida fue baja, lo cual puede deberse a que los filtros con carbón activado no son específicamente para remover hierro, sino para eliminar o despejar olores desagradables, compuestos orgánicos y residuos de cloro.

En las figuras 4.8 y 4.9 se muestra el comportamiento del contenido de sólidos suspendidos y la turbidez, respectivamente en el agua fresca y filtrada. Se puede observar que los sólidos suspendidos en el agua filtrada se mantuvieron dentro de los parámetros de diseño ( 3ppm), a excepción de un pico ocurrido en el tercer mes del período de análisis, la elevación de ese pico por encima es consecuencia de la mala operatividad del sistema debido a que no se están retrolavando los filtros en el tiempo que debe hacerse (2.400 min), causando que el carbón activado pierda capacidad de adsorción. Otra posible causa de este fenómeno puede deberse a la excesiva turbulencia por un aumento en el flujo de agua, lo que explica que en vez de bajar, aumente la presencia de sólidos suspendidos.

El nivel de turbidez en el agua lo proporciona el contenido de sólidos suspendidos, ya que estas partículas ocasionan una desviación de los rayos de luz visibles que atraviesan el agua, por tal razón un aumento o disminución de estas partículas se verá reflejada inmediatamente en el parámetro de la turbidez. Se puede detallar la similitud que existe entre las figuras 4.8 y 4.9 donde se nota que la tendencia de estas gráficas mantiene una relación, por lo que los picos y valles generados en una son reflejo en la otra. Sin embargo el comportamiento del agua filtrada en el parámetro de turbidez está por debajo del valor de control (1 NTU), a excepción de un ligero pico durante el tercer mes, lo cual quiere decir que no hay presencia considerable de turbidez en el agua



**Figura 4.8 Comportamiento sólidos suspendidos en el agua fresca y filtrada**

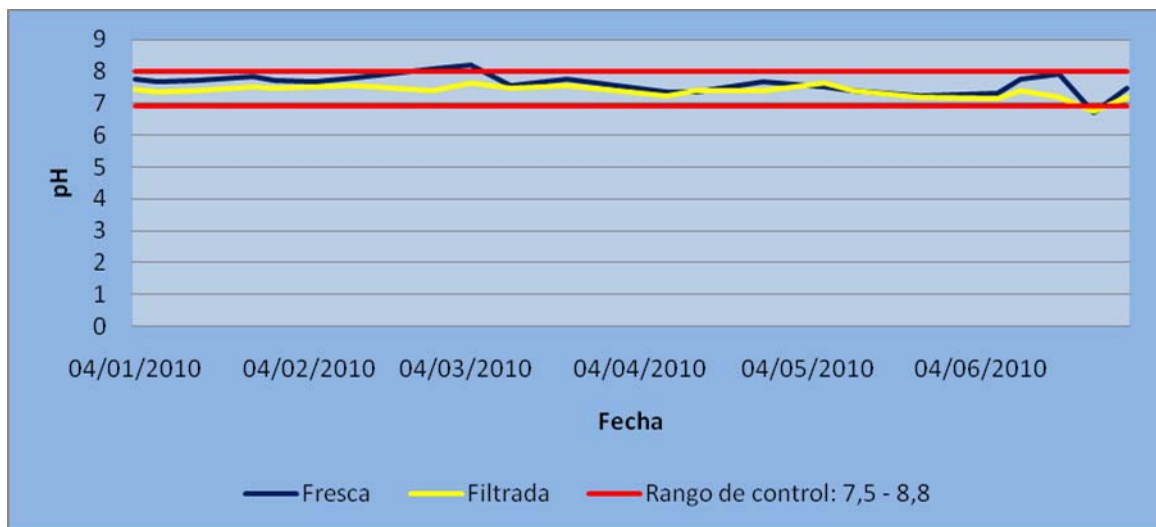


**Figura 4.9 Comportamiento de la turbidez en el agua fresca y filtrada**

En la figura 4.10 se muestra la representación gráfica del pH, el cual no tuvo prácticamente una variación considerable entre el agua fresca y filtrada manteniéndose además dentro del rango de control de 7,5-8,8. La razón por la cual el pH no fue alterado durante el proceso de filtración es debido a que en su mayoría se remueve partículas o sustancias de mayor tamaño como la materia orgánica, sólidos suspendidos y cloro residual, quedando prácticamente los iones de hidrógeno y de las sales disueltas en el agua, libres para pasar sin ser atrapados en los sitios activos del

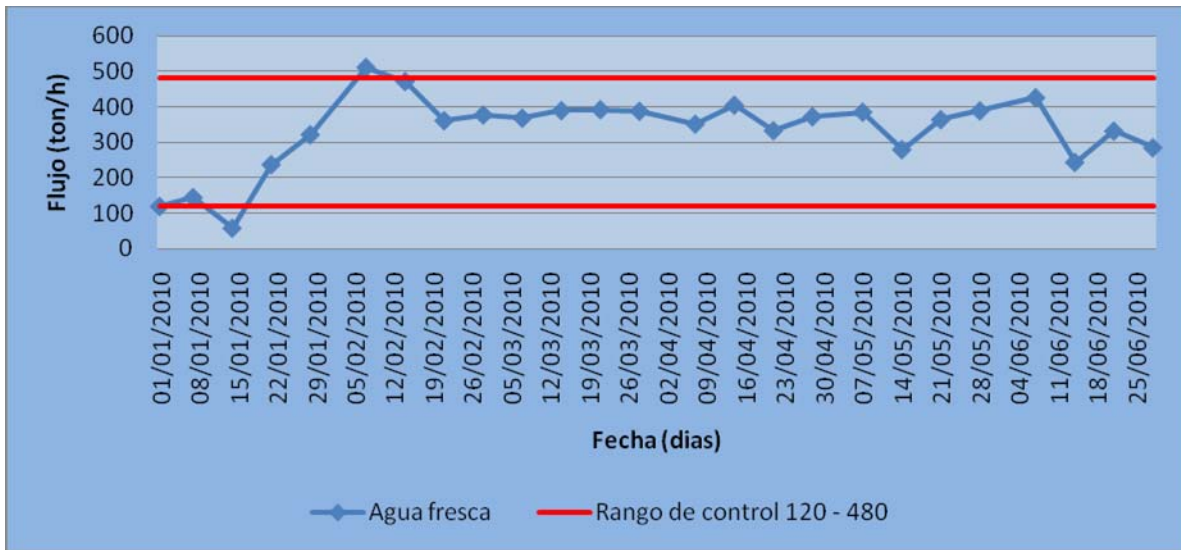


carbón activado, lo que mantiene el equilibrio en el balance de los iones entre el agua fresca y filtrada. El pH en este sistema no debe variar porque los filtros con carbón activado no hacen nada para que éste cambie.



**Figura 4.10 Comportamiento del pH en el agua fresca y filtrada**

A continuación se muestran las figuras 4.11 y 4.12 que representan el comportamiento del flujo de agua fresca que ingresa al sistema de filtración y las caídas de presión en los filtros, respectivamente. Se puede observar en la gráfica 4.11 que el flujo presenta una tendencia durante casi todo el período de análisis dentro del rango de control. En el inicio, el flujo se encontraba en el nivel más bajo (120 ton/h) del rango de control establecido por diseño (120 - 480) ton/h. Se puede notar un aumento en el flujo a partir del segundo mes del período de análisis hasta llegar a un valor de 500 ton/h, superando el valor máximo del rango de control (480 ton/h), ocasionando mayor carga al sistema y mayor esfuerzo para mantener parámetros en control, luego se observa un descenso en el flujo manteniéndose en aproximadamente (350-400) ton/h dentro del rango hasta finalizar el período de análisis.

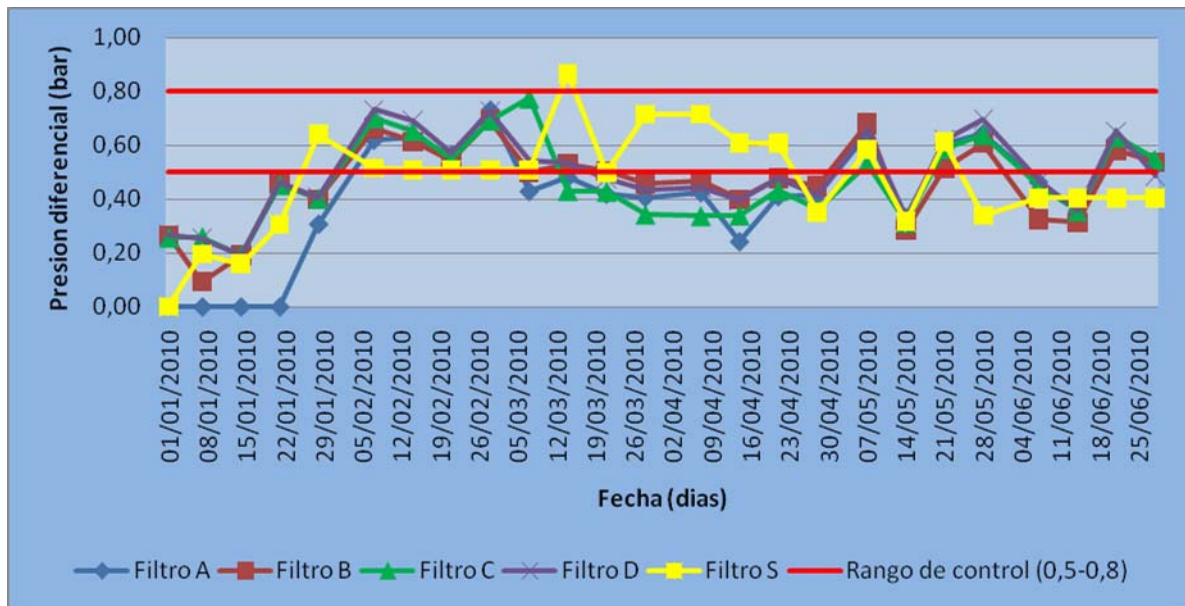


**Figura 4.11 Flujo de agua fresca que ingresa al sistema de filtración con carbón activado**

De igual forma en la figura 4.12 se puede detallar un comportamiento muy similar para la caída de presión (líneas de color azul, rojo, verde, morado y amarillo para los filtros A, B, C, D y S, respectivamente), ya que esta se relaciona con las variaciones en el flujo que ingresa al sistema, observándose en el primer mes del período de análisis que existen niveles bajos en la caída de presión para los filtros con valores que estaban entre (0 y 0,3) bar aproximadamente, encontrándose por debajo del rango de control establecido para la caída de presión (0,5-0,8) bar, lo cual es comprensible ya que el flujo de agua para ese período era bajo y se operaba a las condiciones mínimas de 120 ton/h. Cabe resaltar que para ese flujo y caída de presión es probable que el proceso de filtración se realice con menor eficiencia, ya que existe mayor tiempo de residencia de las partículas presentando baja velocidad de difusión para llegar a los sitios activos y ser adsorbidas por el carbón activado, es por ello que se debe mantener un flujo por encima de las 400 ton/h de agua para garantizar que la caída de presión se encuentre dentro del rango de operación.

Con respecto al resto del período de análisis se puede observar que a medida que el flujo de agua fue aumentando, la caída de presión lo hacía de igual manera,

llegando a registrar la mayor cantidad de valores bastante aproximados al rango de control, a mayor flujo de agua. Sin embargo se puede observar que la caída de presión no alcanzó el nivel mínimo del rango de control, esto debido a que el flujo de agua si bien era alto, no se encontraba a la máxima capacidad de producción, sino alrededor de 350 a 400 ton/h aproximadamente, por lo tanto las caídas de presión reflejadas son inherentes a la cantidad del flujo circulante en ese momento.

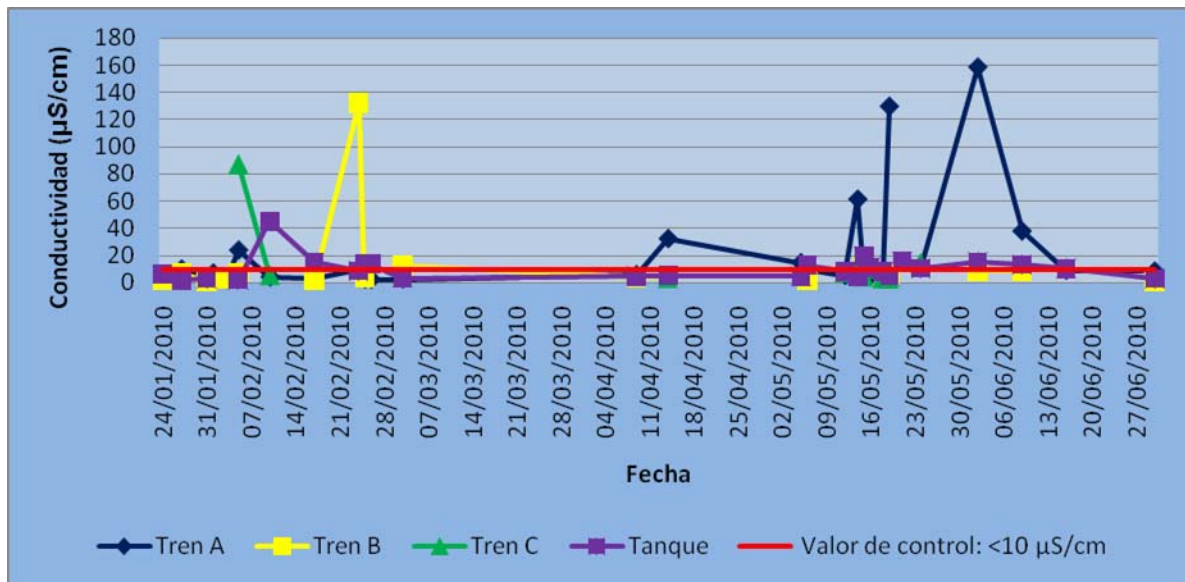


**Figura 4.12 Caída de presión en el sistema de filtración con carbón activado**

#### 4.3.2 Trenes de desmineralización de agua

Los parámetros que fueron monitoreados para el control de la calidad de producción de agua en el sistema de desmineralización de los trenes de intercambio iónico y el tanque de almacenamiento fueron la conductividad, dureza, sílice y pH. Adicional a esto se monitorearon los parámetros operacionales como el flujo de agua producida, presión diferencial de los intercambiadores catiónicos y aniónicos y sus respectivas trampas de resina, nivel de agua en los descarbonatadores, nivel del tanque de almacenamiento de agua desmineralizada y los tanques de almacenamiento de los químicos (soda cáustica y ácido sulfúrico), utilizados para la regeneración iónica.

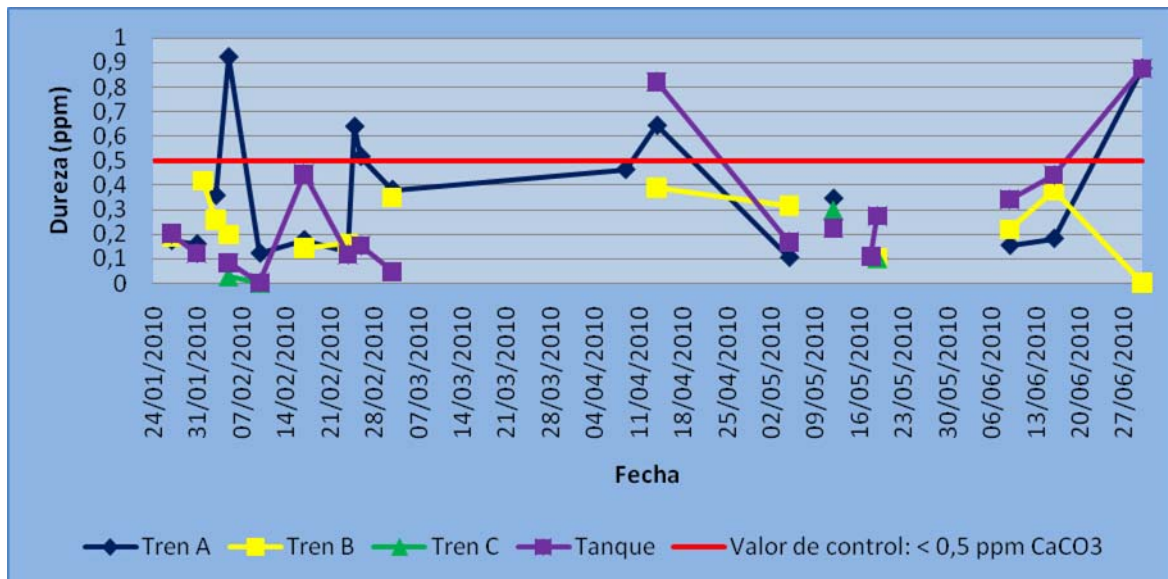
En la figura 4.13 se muestra la gráfica de los datos recopilados de la conductividad en el agua desmineralizada a la salida de los intercambiadores aniónicos de los trenes A, B, C y el tanque de almacenamiento de agua (líneas de color azul, amarillo, verde y morado, respectivamente), en las cuales se puede observar el comportamiento desarrollado durante el período de análisis, donde la conductividad del agua almacenada (línea de color morada), podría decirse que se mantuvo dentro de especificación ( $< 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) con pocas variaciones. A pesar de obtenerse muchos picos puntuales en el agua de los trenes, también se puede observar la dispersión y ausencia de puntos para el tren C, ya que la frecuencia de análisis para este parámetro es sólo uno semanal. El tren C casi siempre se encontraba fuera de servicio, debido a que no estaba operando bien por falta de cambio de resinas. Todos los picos observados podrían ser ocasionados por la mala regeneración en los trenes.



**Figura 4.13 Comportamiento de la conductividad en el agua desmineralizada de los trenes A, B y C y el tanque de almacenamiento**

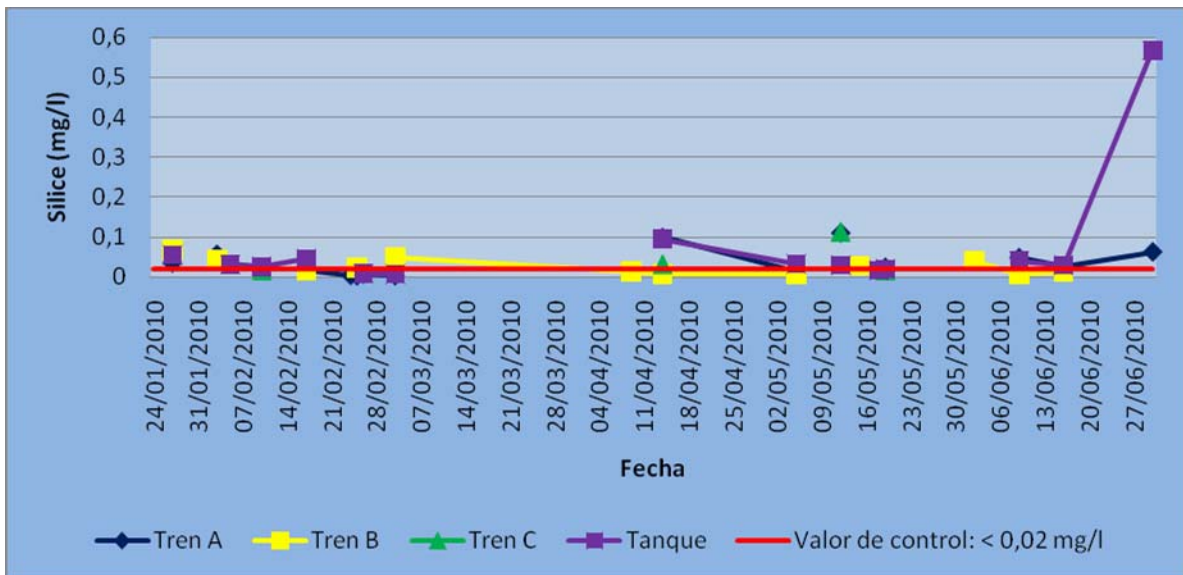
En la figura 4.14 se muestra el comportamiento del parámetro de dureza en el agua desmineralizada producida por los trenes A, B, C y en el tanque de almacenamiento,

representado por las líneas de color azul, amarillo, verde y morado, respectivamente. Se puede observar que los resultados se encuentran mayormente dentro del valor de control (<0,5 ppm), sin embargo para el tren A superan este valor de manera puntual, lo cual se tradujo también en un aumento en el tanque de almacenamiento como consecuencia de ello. Cabe resaltar cierta dispersión y discontinuidad de los puntos de este parámetro en la gráfica, lo que impide poder detallar una tendencia de su comportamiento en los intercambiadores iónicos. Esta discontinuidad en los datos graficados, es debido a que la frecuencia de análisis para este parámetro es poca, incluso como se puede observar en las tablas 3.11 del capítulo 3 y B.10, B.11 y B.12 de anexos, se realizan sólo dos por semana. La dureza es un parámetro que debe ser monitoreado diariamente en cada guardia, ya que es causante de incrustaciones que forman una película aislante en las paredes de las calderas y en el sistema de suministro de agua, lo que puede traducirse en una pérdida o reducción de transferencia de carga térmica y peor aun un sobrecalentamiento en los tubos que pueden causar el subsiguiente rompimiento de estos, es por ello entonces que debe realizarse un mayor seguimiento.



**Figura 4.14 Comportamiento de la dureza en el agua desmineralizada de los trenes A, B, C y el tanque de almacenamiento**

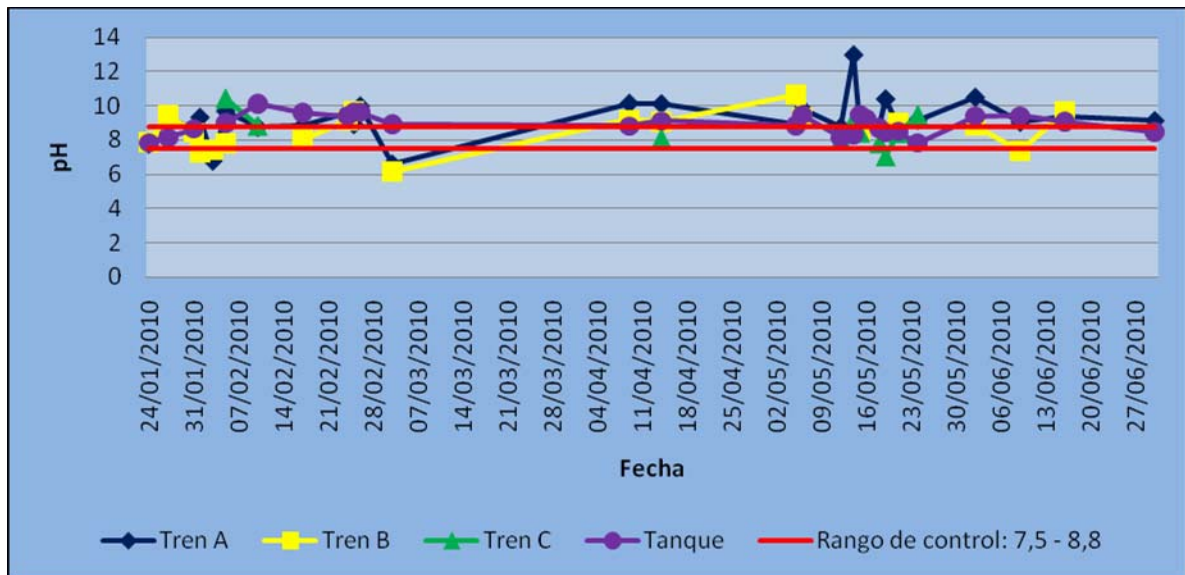
En la figura 4.15 se muestra el monitoreo del control del sílice en el agua, ya que al igual que la dureza amerita ser constantemente verificada y controlada, por ser formadora de depósitos tales como sílice amorfa y silicato de magnesio, que también tienen propiedades de aislamiento y puede provocar rupturas en los tubos, además puede destilarse de la caldera en forma de ácido silícico, formando depósitos en los alabes de las turbinas. En la gráfica se puede observar que el parámetro del sílice durante el período de análisis, se mantuvo bastante cercano al valor de control (< 0,02 mg/l), con algunos valores puntuales por encima de este, específicamente para el tanque de agua, donde se observan picos de hasta 0,55 mg/l, debido a que previo a la medición de ese punto hubo un aumento de sílice por encima del parámetro de control el cual se vio reflejado tiempo después ya que la composición tarda en manifestar su efecto. También se puede observar la carencia y discontinuidad de puntos graficados, lo cual se debe a la frecuencia de análisis para este parámetro que es realizado una vez a la semana.



**Figura 4.15 Comportamiento de la sílice en el agua desmineralizada de los trenes A, B,C y el tanque de almacenamiento**



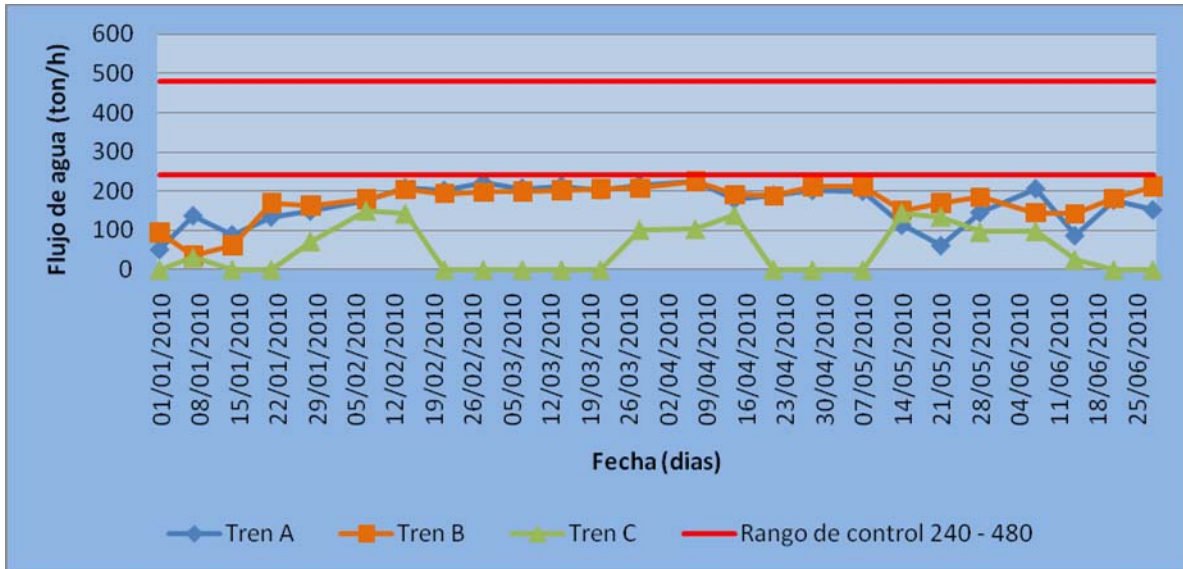
El pH del sistema de desmineralización también fue monitoreado y en la figura 4.16 se muestra el comportamiento de esta variable, donde se puede observar que la tendencia de las curvas de los trenes A, B y C (curvas de color azul, amarillo y verde, respectivamente), superan en la mayor parte del período de análisis el valor máximo de control de 8,8; sin embargo la tendencia en el tanque de almacenamiento (curva de color morado), se mantuvo cercano a este valor, esto debido a que se produce un dilución de la concentración de los iones excedentes en el tanque a pesar de que el agua proveniente de los trenes de intercambio iónico tenía un nivel elevado de pH, lo cual permite que aguas abajo del proceso se opere a las condiciones deseadas. Un pH más alto del valor normal puede indicar agotamiento de la resina aniónica, pérdida, ensuciamiento o mala regeneración, lo que puede justificar los valores por encima del nivel de control para este parámetro. Se puede detallar que prácticamente no se tienen registro de valores de pH para el tren C de desmineralización de agua, debido a la fallas que este ha venido presentando continuamente con la resinas ya que se saturaban a las pocas horas de producción.



**Figura 4.16 Comportamiento del pH en el agua desmineralizada de los trenes A, B, C y el tanque de almacenamiento**

Para la figura 4.17 se puede observar, a través de las curvas representativas de los trenes A, B y C (líneas de color azul, naranja y verde, respectivamente), el comportamiento del flujo de agua desmineralizada producida por cada tren durante el período de análisis. En el gráfico con respecto a la línea de color verde (tren C), se puede verificar la intermitencia en la producción de agua desmineralizada debido a que este tren presentó fallas operacionales con respecto a las resinas aniónicas, ya que de acuerdo con los reportes técnicos, se observaban valores muy altos de conductividad al poco tiempo de haber sido regenerado el tren, por tal condición se dejaba fuera de servicio, lo que ocasionó que la producción de agua desmineralizada se redujera a la mitad con la operación de los trenes A y B, cada tren tiene una capacidad de 240 ton/h pero al estar fuera el tren C no se podría alcanzar la capacidad máxima de 480 ton/h quedando uno solo operativo, mientras el otro en la fase de regeneración. Con respecto a la operación de producción de agua desmineralizada con los trenes A y B se puede notar claramente que al inicio del período de análisis el flujo de agua era de aproximadamente 100 ton/h, aumentando durante los dos primeros meses hasta mantenerse en aproximadamente 200 ton/h, este comportamiento es muy similar a descrito por el agua filtrada, ya que las variaciones en el flujo del sistema de filtración se verán reflejadas en el sistema de desmineralización. Para satisfacer la demanda se necesita un tanque de almacenamiento de agua desmineralizada anexo al ya existente de menor capacidad, para cuando ocurran fallas en los trenes de intercambio iónico que reduzcan su producción a la mitad.





**Figura 4.17 Flujo de agua desmineralizada producida por los trenes A,B,C**

En la figura 4.18 y 4.19 se muestran la caída de presión en los intercambiadores catiónicos y aniónicos, donde las curvas de color azul, naranja y verde corresponden a los trenes A, B y C, respectivamente. La caída de presión en el intercambiador catiónico (figura 4.18) muestra que el tren C (curva de color verde), tuvo un valor promedio cercano a cero, lo cual refleja la condición de variabilidad en el flujo de producción por los problemas presentados con las resinas, por su parte los trenes A y B mantuvieron una caída de presión que fue aumentando desde el inicio del período de estudio hasta el segundo mes, ya que el flujo inicial era bastante bajo, a pesar de que los flujos para ambos trenes se mantuvieron muy cercanos (Figura 4.17), sus caídas de presión guardaron desde del segundo mes hasta el último mes de análisis una diferencia lo cual puede atribuirse a que la resina A se satura más rápidamente que la resina B, lo que ocasiona que su caída de presión sea siempre mayor.

Para los intercambiadores aniónicos en la figura 4.19, se observa que en los trenes A y B (curvas de color azul y naranja respectivamente), la tendencia de la caída de presión entre ellos fue similar, mostrando un aumento los dos primeros meses hasta estabilizarse cerca del límite bajo establecido por control, en cambio, por su parte el tren C, tuvo una tendencia oscilante que al igual como consecuencia de la

variación en el flujo. Vale resaltar que en el intercambiador catiónico la caída de presión llegó a alcanzar valores cercanos a cero sin embargo en el intercambiador aniónico se observaron datos de presión diferentes de cero, esto puede deberse a la presencia del descarbonatador (Figura 4.20), que mantiene una cantidad de agua acumulada lo puede explicar que se mantuviera una pequeña tasa de flujo y a su vez la caída de presión.

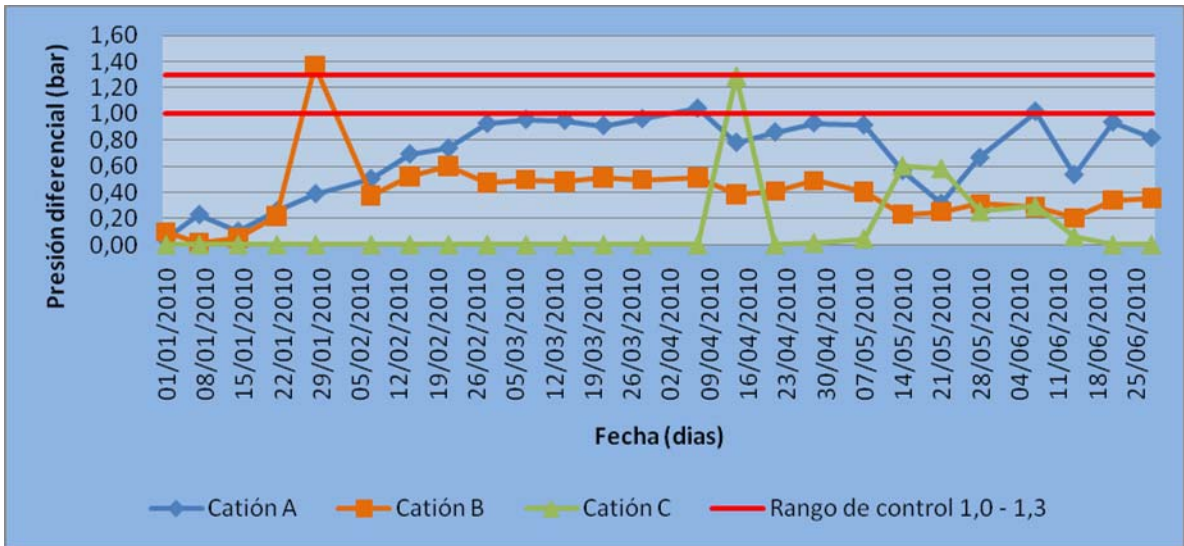
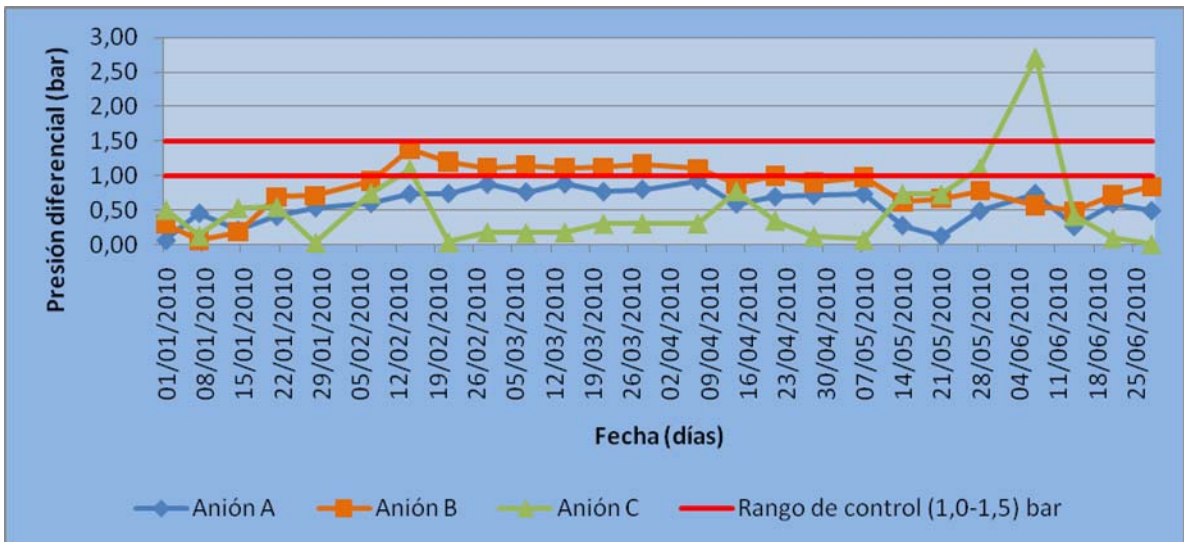
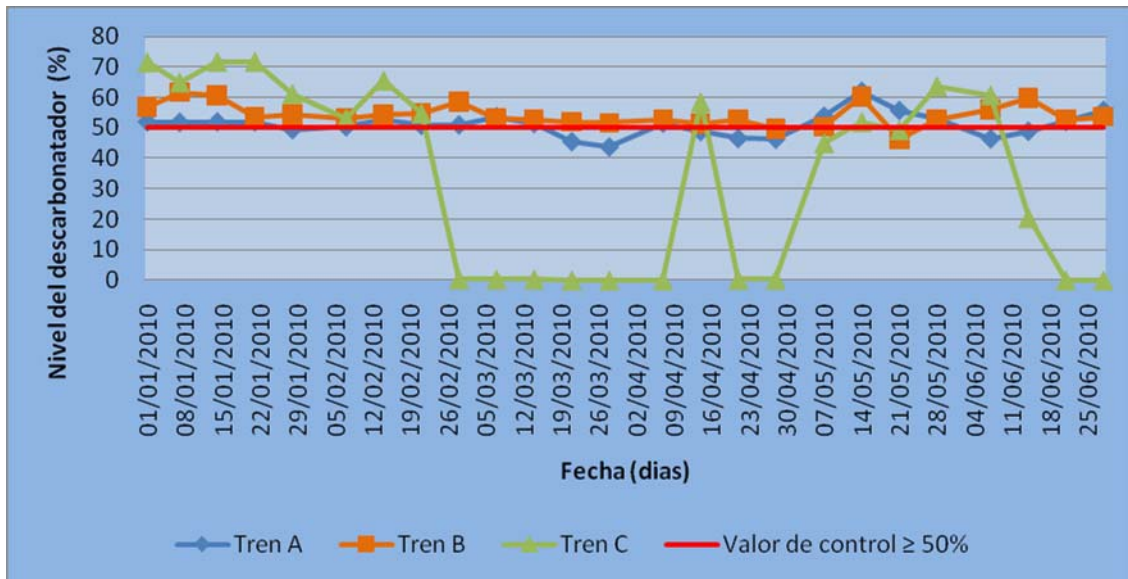


Figura 4.18 Presión diferencial de los intercambiadores catiónicos, de los trenes A,B y C



**Figura 4.19 Presión diferencial de los intercambiadores aniónicos, de los trenes A,B y C**

El nivel del agua en el descarbonatador se ve reflejado en la figura 4.20, donde las curvas de color azul, naranja y verde, representan los trenes A, B y C, respectivamente. Puede notarse que la tendencia del nivel en los trenes A y B es bastante cercana al valor de control de 50%, mientras que el nivel en el tren C sufrió variaciones, debido a los problemas de adsorción con las resinas lo cual redujo la tasa de producción hasta detenerla en algunos períodos como se pudo observar en la figura 4.17 de la tasa de flujo de agua que ingresa al tren.



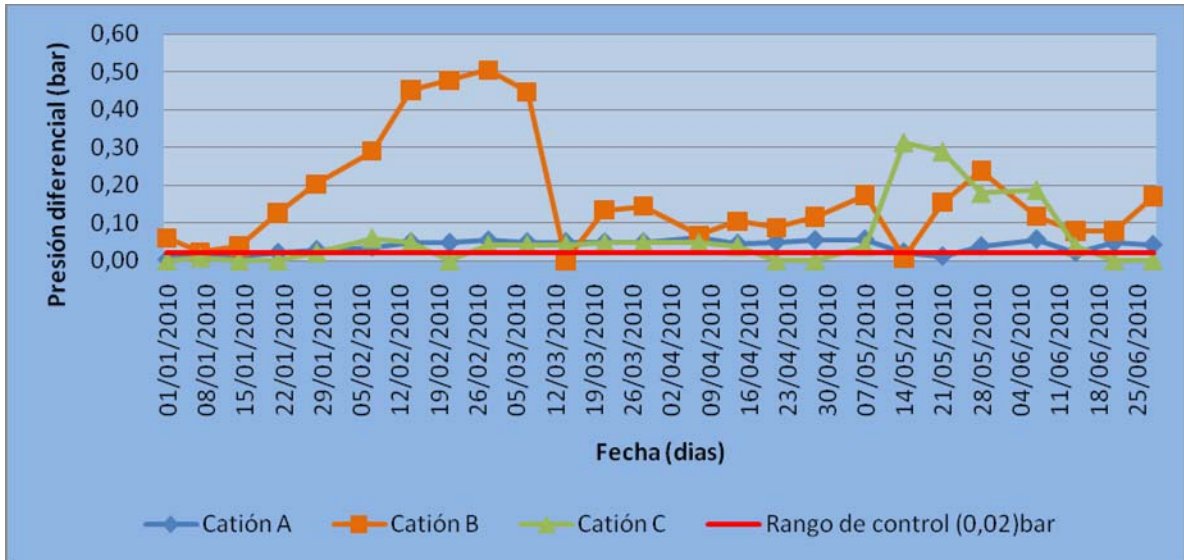
**Figura 4.20 Nivel de agua en los descarbonatadores de los trenes A,B,C de desmineralización**

La caída de presión en las trampas es un indicativo de la pérdida o fuga de resinas (catiónicas y aniónicas), en las figuras 4.21 y 4.22 se muestran las curvas de color azul, naranja y verde para los intercambiadores catiónicos y aniónicos de los trenes A, B y C, respectivamente. Para las trampas de resinas catiónicas en la figura 4.21, de los trenes A y C, se describe una caída de presión relativamente constante y bastante alta con un valor aproximado de 0,05 bar a excepción del último mes de análisis

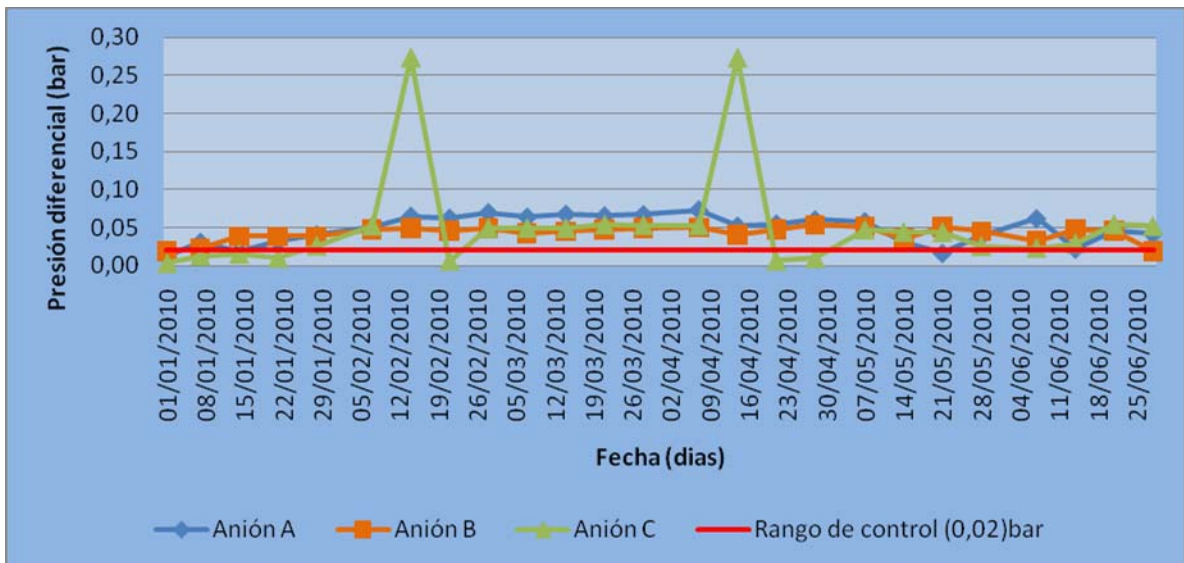
donde la trampa del tren C tuvo un incremento considerable en la caída de presión llegando a alcanzar un valor de 0,4 bar; por otro lado el comportamiento de la curva para la trampa del tren B presento variaciones en la caída de presión durante los tres primeros meses del período de análisis, en el cual se observó un aumento que alcanzó un valor máximo de 0,5 bar, descendiendo hasta valores oscilante entre (0-0,2) bar.

La caída de presión en las trampas de las resinas aniónicas para cada tren permaneció baja con un valor aproximado de 0,05 bar tal como se muestra en la figura 4.22. La uniformidad en la caída de presión representa una estabilidad del lecho de resina que se encuentra dentro de los intercambiadores, mientras esta presión permanezca con pocas perturbaciones en el punto de trampas indicará al operador que poca o ninguna cantidad de resina esta fugando, cabe resaltar que para los trenes de intercambio catiónico se observó una considerable perturbación en la caída de presión para el tren C, lo que puede redundar en fugas o pérdidas de resinas en este intercambiador por lo que debe realizarse un continuo seguimiento de este punto para encontrar las posibles causas.

La presión diferencial en las trampas de resinas, de acuerdo con las tendencias de la gráfica y los picos observados, se puede observar que los intercambiadores catiónicos del tren B y C y los intercambiadores aniónicos del tren C, presentaron valores por encima del valor de control de 0,02 bar lo que puede ser traducido en fugas de resinas, siendo los intercambiadores catiónicos los que presentan una mayor probabilidad de fugas ya que las presiones son muy elevadas con respectos a las trampas de resina aniónica.



**Figura 4.21 Presión diferencial en las trampas de los intercambiadores catiónicos, trenes A,B y C**

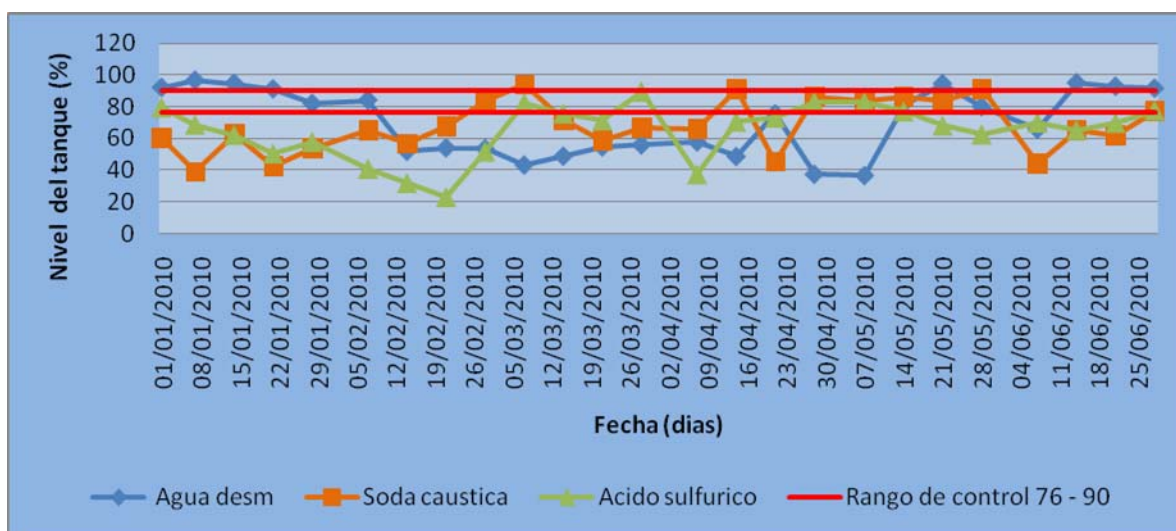


**Figura 4.22 Presión diferencial en las trampas de los intercambiadores aniónicos, trenes A,B y C**

El nivel en los tanques de agua desmineralizada, soda cáustica y ácido sulfúrico (curvas de color azul, naranja y verde respectivamente), también fue monitoreado y en



la figura 4.23 se puede observar el comportamiento de esta variable, donde lo más importante es cuidar que se mantenga un nivel considerable de agua y químicos en sus respectivos tanques para mantener la continuidad en el proceso y evitar fallas principalmente en las bombas de distribución. En la curva representativa del nivel de agua desmineralizada (color azul), se observa un descenso al inicio del período de análisis, lo cual se debió a que la cantidad de agua desmineralizada producida por los trenes sufrió un descenso, es decir la cantidad de agua que ingresa ahora al tanque es menor y si la demanda de vapor se mantiene, se ve reflejado en la disminución del nivel del agua en el tanque, por otro lado el nivel de los químicos (soda cáustica y ácido sulfúrico) es bastante variable ya que su suministro a los tanques no es constante, sino que debe ser comprado y trasegado por camiones contenedores, lo cual retrasa la nivelación de los químicos en sus respectivos tanques por lo que los niveles han llegado a alcanzar hasta un 20% de la capacidad.



**Figura 4.23 Nivel de los tanques de almacenamiento de agua desmineralizada y de los químicos utilizados para la regeneración iónica**

#### **4.4 Detección de las desviaciones operacionales que causan que el proceso disminuya su eficiencia o producción**

Luego de haber reconocido la deficiencia operacional referente a los retrolavados de los filtros con carbón activado y regeneración de las resinas en los trenes de desmineralización, se contó con una simulación de los intercambiadores catiónicos y aniónicos de los trenes B y C, a través del programa Lewatit.

También se llevó un seguimiento de los intercambiadores catiónicos y aniónicos del tren de desmineralización B, evaluando el comportamiento de cuatro parámetros de calidad como lo son sílice, dureza, conductividad y pH, durante un período de una semana, los cuales fueron representados en un gráfico de barras múltiples como se puede observar en las figuras 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27, para cada parámetro respectivamente.

##### **4.4.1 Resultados de la simulación con el programa Lewatit**

Referente a la simulación realizada por la empresa proveedora de la resina que se utiliza actualmente en la unidad de desmineralización, la primera simulación mostrada en la tabla C.1, corresponde al comportamiento esperado de los trenes de desmineralización según las condiciones de alimentación especificadas. El análisis de agua utilizado corresponde al enviado en el mes de septiembre del 2010, complementado con algunos datos históricos de meses anteriores. (En el último análisis no se incluye Sílice, Sodio, Potasio, TOC). Se tomó el volumen de resina por diseño. El tiempo del ciclo es de 22,58 horas aproximadamente. Luego de todo lo observado en dicha simulación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- ✓ En el análisis de agua, las sustancias orgánicas no polares no son adsorbidas por las resinas de intercambio iónico.
- ✓ Existe presencia de una gran cantidad de aniones débiles disueltos en relación al total de la cantidad de aniones.
- ✓ El análisis de agua no es constante, debido a que no existe suficiente data con respecto a algunos parámetros
- ✓ Con respecto a las resinas, la conductividad residual está referida a la salida del sodio (Na).

- ✓ En las regeneraciones, el tiempo de contacto con el ácido sulfúrico y la soda cáustica es demasiado corto.

Para el caso del Tren C, en la segunda simulación mostrada en la tabla C.2, se estima que el nivel de resina se encuentra a la mitad de lo especificado por diseño (para todas las resinas). Se evidencia que el tiempo de ciclo disminuye a 10,82 horas aproximadamente. Se confirma la alta dependencia del nivel de resina en el desempeño de los trenes de desmineralización. En este tren se llegaron a conclusiones muy similares:

- ✓ En el análisis de agua las sustancias orgánicas no polares no son adsorbidas por las resinas de intercambio iónico.
- ✓ Hay gran cantidad de aniones débiles disueltos en relación al total de la cantidad de aniones.
- ✓ El análisis de agua no es constante, debido a que no existe suficiente data con respecto a algunos parámetros
- ✓ En relación a las resinas, la conductividad residual está referida a la salida de sodio (Na).
- ✓ En la regeneración el tiempo de contacto del ácido sulfúrico y la soda cáustica es demasiado corto.

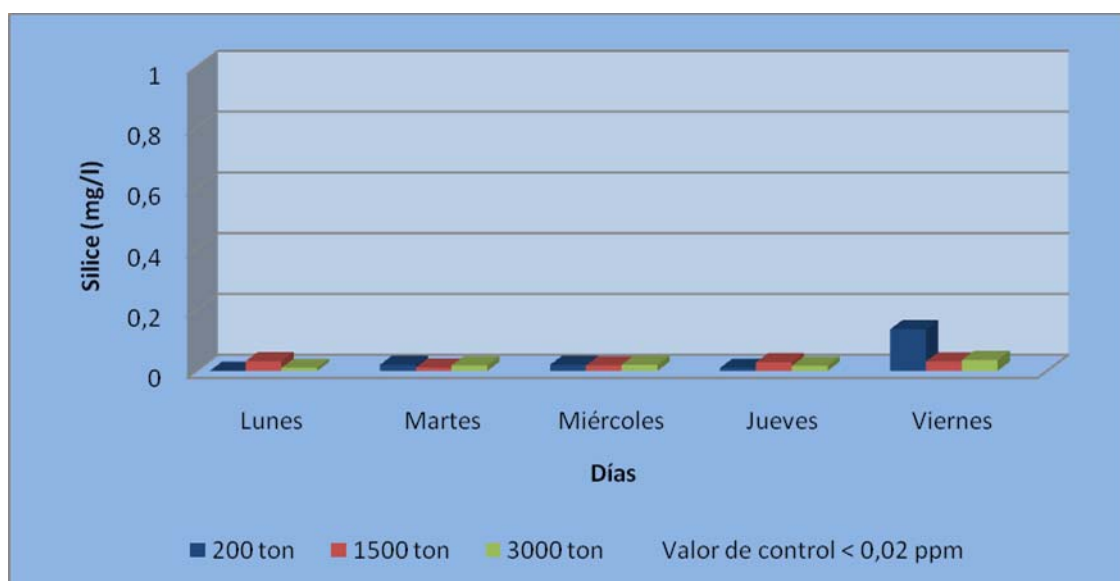
#### **4.4.2 Seguimiento operacional del tren B**

En la figura 4.24 se puede observar el comportamiento del parámetro de sílice en el agua desmineralizada, el cual se ve reflejado en la gráfica de barras múltiples, donde los colores azul, rojo y verde, representan la producción de agua de 200, 1.500 y 3.000 toneladas respectivamente, cada producción está referida al tiempo de operación del tren en el cual se tomaron las muestras para sus análisis, es decir a 1h, 6h y 12h de acuerdo con cada producción.

La tendencia esperada de las barras debería ser similar a una escalera creciente, ya que a medida que aumenta la producción de agua acercándose a las 3.000 ton, las resinas se aproximan al máximo de saturación. En la figura 4.24 se observan valores



por encima del valor de diseño de 0,02 mg/l. Puede notarse que la altura de las barras para cada día de acuerdo con la cantidad de agua producida presenta un comportamiento variado fuera de lo esperado, como se puede observar en el día viernes donde para una producción de 200 ton de agua, el sílice alcanzó un valor de 0,14 mg/l, muy elevado comparado con el valor de los días anteriores, esto pudo deberse a un mal muestreo o análisis de la muestra.

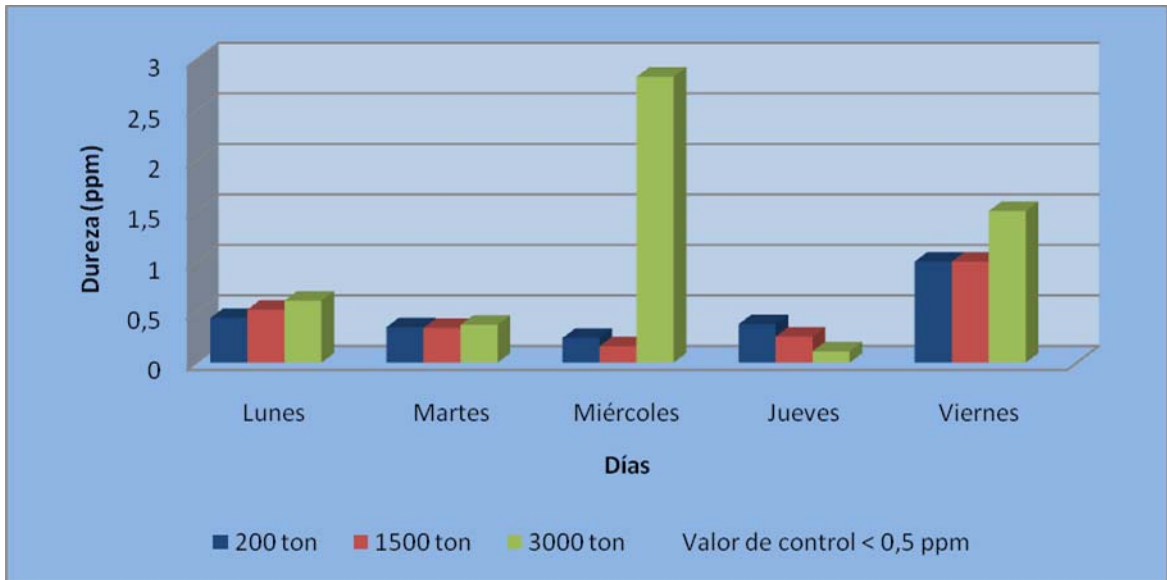


**Figura 4.24 Análisis de sílice durante el proceso de desmineralización de agua en el tren B**

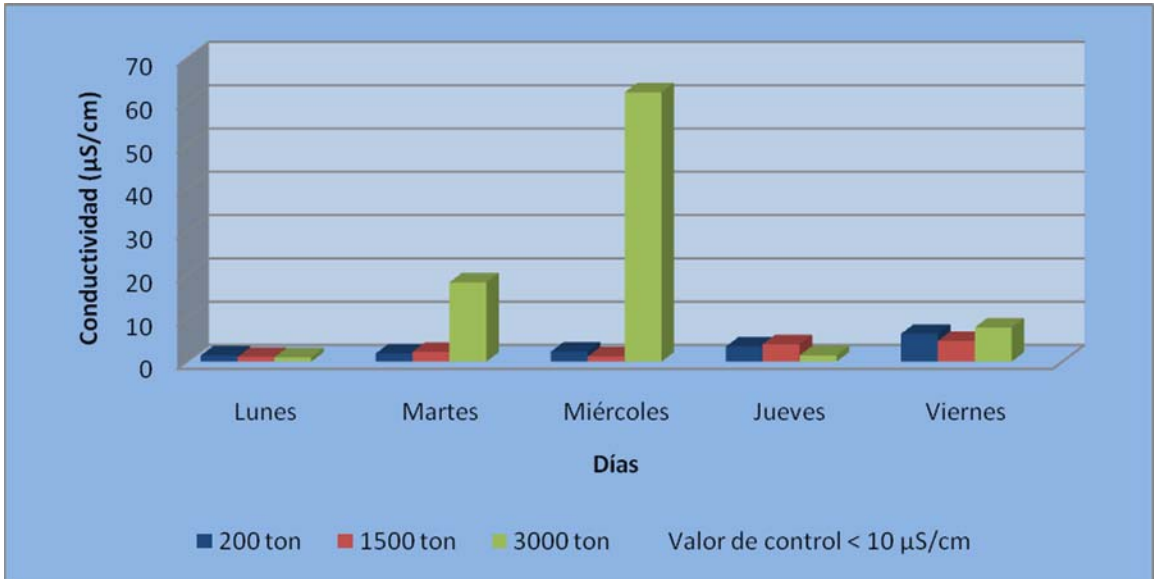
En la figura 4.25 se puede notar que las tendencias de las barras, los primeros dos días de prueba se encuentran dentro del valor de control de 0,5 ppm en el día miércoles el valor de la dureza sufre una elevación cuando la producción de agua alcanza el valor de 3.000 ton, esto puede deberse a que las resinas estuvieran saturadas lo que produjo el salto por no poder remover más cationes, por último se observa que el día final de la prueba alcanzaron 1 ppm excediendo el valor de control, pero en esta ocasión durante las tres carga de producción lo que puede deberse a una pobre regeneración de la resina.

La figura 4.26 muestra la tendencia de la conductividad en el agua desmineralizada, donde se observa que los días martes y miércoles, para una

producción de 3.000 ton (barra de color verde), hubo un incremento considerable del nivel de conductividad sobrepasando el nivel de diseño de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo cual puede deberse a que las resinas se saturaron de aniones, dando como resultado el excesivo valor de la conductividad del agua a la salida del tren. Con respecto a los demás días se observó que el nivel de conductividad se mantuvo dentro del parámetro de diseño para los tres muestreos a las diferentes cargas de agua producida.

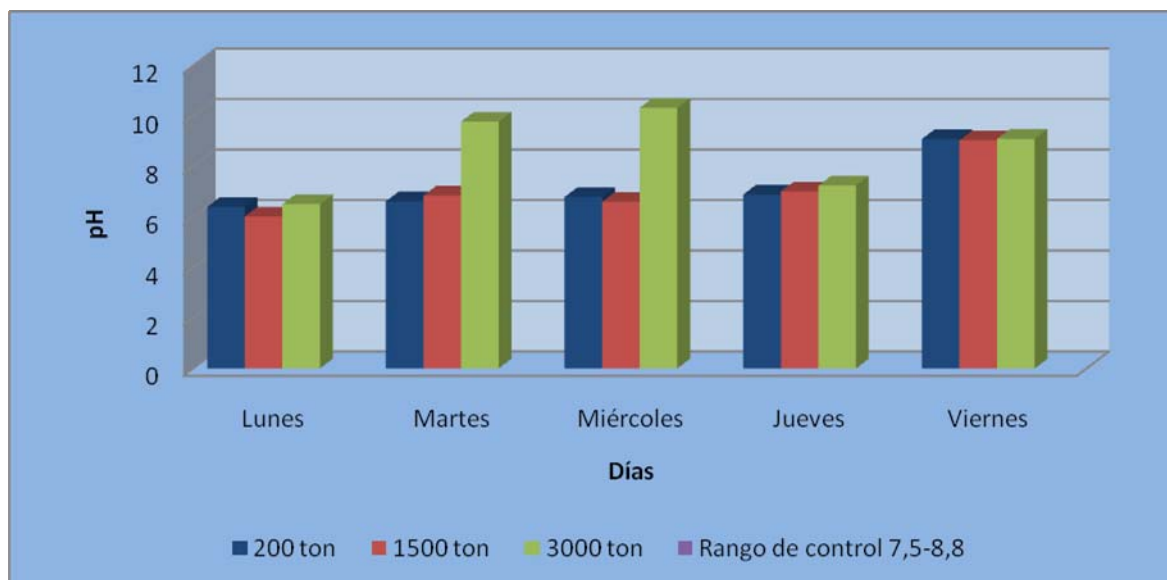


**Figura 4.25 Análisis de dureza durante el proceso de desmineralización de agua en el tren B**



**Figura 4.26 Análisis de conductividad durante el proceso de desmineralización de agua en el tren B**

En la figura 4.27 se muestra la representación grafica del pH en el agua a la salida del tren, donde se observa desde el día lunes hasta el día jueves que los valores del pH para las tres cargas del día, se encontraban por debajo del rango del control de 7,5 a 8,8, a excepción de los días martes y miércoles cuando para una producción de 3.000 ton se observa que los niveles de pH aumentaron considerablemente superando el valor máximo del rango de control, lo cual puede deberse al incremento de la conductividad producto de los aniones remanentes en el agua.



**Figura 4.27 Análisis de pH durante el proceso de desmineralización de agua en el tren B**

En la tabla 4.5 se muestran los resultados de los cálculos realizados a los promedios de las muestras tomadas diariamente, el promedio general de la semana y los porcentajes de desviación para cada parámetro de calidad del agua, que al ser comparados con los valores de control establecidos por diseño se obtuvo que la desviación para el pH, conductividad, dureza y sílice fueron de 4,767%, 20,145%, 35,147% y 35,00% respectivamente. El porcentaje de desviación hace referencia a los valores que salen fueran del parámetro de control tanto por encima como por debajo de este, por lo tanto se debe tomar en cuenta esta condición para tener una idea de lo variado que es el sistema. Se puede notar que el pH es un parámetro que presentó una desviación relativamente baja, esto es beneficioso ya que los valores de las desviaciones que se presenten por encima o por debajo no estarán tan alejados del rango de control. Por otra parte la conductividad, la dureza y el sílice presentaron una desviación medianamente elevada, que al compararla con las condiciones de diseño ( 10 $\mu$ S/cm, 0,5ppm, 0,02ppm respectivamente), representan restricciones que impiden que se supere el valor establecido, por lo tanto el interés del porcentaje de desviación para estos tres parámetros radica en el valor que esté por encima, ya que

si se supera implica un problema aguas abajo, por lo cual deberán realizarse correcciones en el sistema para hacer que estén dentro de los valores deseados.

**Tabla 4.5 Porcentaje de desviación de los parámetros de calidad del agua desmineralizada**

Parámetro	Promedios diarios					Prom Genera l	% Desviación
	Lune s	Marte s	Miércoles s	Jueve s	Viernes		
pH	6,310	7,750	7,907	7,050	9,077	7,619	4,767
Conductivid ad	1,174	7,497	21,889	2,997	6,370	7,985	20,145
Dureza	0,527	0,356	1,079	0,250	1,167	0,676	35,147
Sílice	0,014	0,016	0,019	0,018	0,068	0,027	35,000

#### **4.5 Propuesta de las acciones necesarias para la producción de agua desmineralizada con la calidad requerida**

En base al estudio realizado y al comportamiento observado del sistema de desmineralización de agua, se propuso un mejoramiento en los sistemas de operación en línea, la fase de retrolavado de los filtros con carbón activado y el chequeo periódico de la calidad o eficiencia de la resina de intercambio iónico (catiónicas y aniónicas).

El sistema de desmineralización de agua requiere de la realización de análisis periódicos para la verificación de la condición de operación del sistema y de la calidad del agua obtenida, por tal razón se propuso una actualización del programa para la rutina de análisis del agua del sistema.

A continuación se muestran las propuestas realizadas en aras de mejorar el sistema de desmineralización de agua.

#### **4.5.1 Mejoramiento del sistema de operación en línea de la unidad de desmineralización de agua**

En base a la verificación de la condición de los dispositivos, controladores y analizadores en línea mostrados en la tabla 4.4, se propone que sean suplantados por otros o reparados de acuerdo a la condición de deterioro o falla que presente. A su vez se propone la instalación de nuevos analizadores en algunos puntos donde se considere estratégicamente necesario para la evaluación del sistema. En la figura 4.28 se muestra a través de puntos identificados con el color rojo, la ubicación de los nuevos analizadores para el monitoreo de la calidad del sistema de desmineralización.

Punto 1. Analizadores a la salida de los filtros con carbón activado

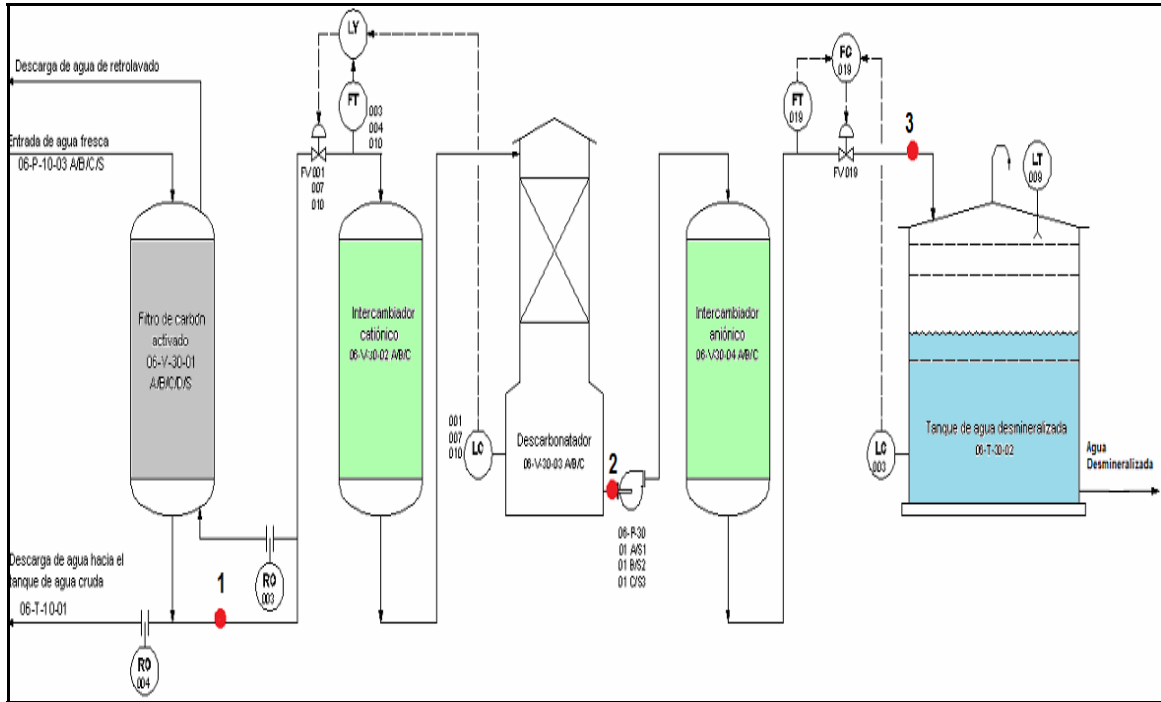
- Materia orgánica
- Sólidos Suspendidos
- Turbidez

Punto 2. Analizador a la salida del descarbonatador

- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

Punto 3. Analizadores a la salida del intercambiador aniónico

- pH
- Conductividad
- Sílice
- Alcalinidad



**Figura 4.28 Ubicación de los nuevos analizadores en línea de la unidad de desmineralización.**

#### **4.5.2 Activación completa de la fase de retrolavado y regeneración en los filtros de carbón activado**

El sistema de filtración con carbón activado, durante la fase de retrolavado y regeneración se realiza sólo con agua filtrada proveniente del cabezal principal del sistema, mientras que la filosofía de diseño para su operación establece que debe hacerse con aire y agua. El sistema de soplado por aire se encuentra actualmente fuera de servicio, lo que ocasiona que la fase de retrolavado opere parcialmente. Por tal razón se propuso reactivar el suministro de aire comprimido para mejorar el funcionamiento del sistema, ya que una de las formas para regenerar el carbón activado es a través del suministro de  $\text{CO}_2$ , vapor de agua y del oxígeno presente en el aire. Por lo tanto se deja en evidencia teórica la necesidad de reactivación del suministro de soplado de aire, lo cual permitiría aumentar la capacidad de adsorción del carbón activado, ya que el efecto combinado de agua y aire permite la liberación de los sitios activos donde el uso solamente de agua no es tan eficiente para conseguirlo. También es importante saber que los filtros no se están retrolavando con

la frecuencia que se debería hacer (cada 2.400 minutos). Este retrolavado no se está haciendo en el tiempo establecido sino esperando más tiempo, debido a que la línea a donde descargan los retrolavados presenta excesiva fuga.

A continuación se muestra la figura 4.29 de uno de los sopladores usados para el retrolavado de los filtros con carbón activado, el cual se encuentra actualmente fuera de servicio debido a que no posee correa para su funcionamiento.



**Figura 4.29** Soplador usado en el retrolavado de los filtros con carbón activado

#### **4.5.3 Inspección de las resinas catiónicas y aniónicas de los trenes de intercambio iónico**

Las resinas de los intercambiadores catiónicos y aniónicos de la unidad no presentan una evaluación en base a la presencia de contaminantes que ocasionan la disminución de su capacidad de remoción de iones, por tal razón se realizó una propuesta para la verificación de posibles contaminantes de las resinas (presencia de carbón activado en la resina catiónica y presencia de resina catiónica y carbón activado en la resina aniónica), a través de una prueba de campo o ensayo de laboratorio sencillo (prueba visual de coloración o por diferencia de densidades, ya que la resina aniónica es más densa que la catiónica), que permita una respuesta



rápida para tomar medidas correctivas en la unidad cuando ocurran este tipo de situaciones.

- Verificar la facilidad que presentan los intercambiadores catiónicos y aniónicos para tomar una muestra representativa de las resinas.
- Realizar un protocolo de prueba para la recolección de muestras indicando los lugares o los puntos donde debe tomarse la muestra y la prueba de campo o análisis a realizarse.
- Definir la frecuencia con la cual debe realizarse esta prueba de acuerdo con las condiciones de operación del sistema (parámetros de calidad y parámetros operacionales).

#### **4.5.4 Actualización del programa para la rutina de análisis de las muestras de agua del sistema de producción de agua desmineralizada**

La rutina de análisis para las muestras de agua del sistema de desmineralización, presenta deficiencia en cuanto a la cantidad y frecuencia de pruebas de laboratorio que se realizan durante la semana, por tal razón se propuso una mejora en la rutina de análisis, con el fin de establecer prioridad en la frecuencia de análisis de los parámetros de calidad más importantes, que permitan verificar el desempeño del sistema.

Se identificaron los puntos de muestreos correspondientes a las corrientes de agua que rutinariamente son analizadas, así como también las pruebas que se realizan al agua filtrada y el agua desmineralizada. En la tabla 4.6 se muestra la rutina que se lleva a cabo normalmente en el laboratorio del mejorador.

**Tabla 4.6 Muestreo rutinario del agua filtrada y desmineralizada de la unidad**

Puntos de muestreo	Código	63SC07	63SC08	63SC10	63SC11	63SC13	63SC-DESCRB-A	63SC-DESCRB-B	63SC-DESCRB-C	63SC09	63SC12	63SC14	06T3002
	Descripción	Agua fresca	Agua filtrada	Tren A catión	Tren B catión	Tren C catión	Descarbonatador tren A	Descarbonatador tren B	Descarbonatador tren C	Tren A anión	Tren B anión	Tren C anión	Tanq Agua Desm.
Análisis	Método												
pH	SM-4500-H+	L,V	L,V	L,M i	L,M i	L,M i	A	A	A	Mi	Mi	Mi	L-D
Conductividad	SM-2510-B	A	A	Mi	Mi	Mi	A	A	A	Mi	Mi	Mi	L-D
TSS	HACH-8006	M,J	M,J										
Turbidez	SM - 2130	M,J	M,J										
Dureza total	HACH-8374	A	A							Mi	Mi	Mi	Mi, V
Cloruros	HACH-8113	A	A	A	A	A	A	A	A	Mi	Mi	Mi	Mi
Sílice	HACH-8186	A	A	A	A	A	A	A	A	Mi	Mi	Mi	Mi
Sodio (ppb)	SM-3120-B			L,M i	L,M i	L,M i							Mi
TOC	SM-5310-B	L,Mi, V	L,Mi, V	A	A	A				A	A	A	
Metales (Na,K,Ca,Mg)	ASTM-1976	A	A	A	A	A				A	A	A	
SO <sub>4</sub>	HACH-8051	A	A	A	A	A				A	A	A	
Alcalinidad Total	SM- 2320	A	A	A	A	A				A	A	A	
Cloro Residual	HACH-8021	L,Mi, V	L,Mi, V										
Hierro	HACH-8147	L,Mi, V	L,Mi, V										

Nota: L, M, Mi, J, V, S, D, representan los días de la semana en los que se realizan los análisis y A que corresponde a los análisis realizados a requerimiento.

A esta rutina se le realizó una modificación en la frecuencia de los análisis de laboratorio para el monitoreo de la calidad del agua y el desempeño del sistema de filtración y desmineralización, en la tabla 4.7 se muestra resaltado en color rojo los arreglos realizados a la rutina de análisis propuesta.

**Tabla 4.7 Propuesta para el muestreo rutinario del agua filtrada y desmineralizada de la unidad**

Puntos de muestreo	Código	63SC07	63SC08	63SC10	63SC11	63SC13	63SC-DESCRB-A	63SC-DESCRB-B	63SC-DESCRB-C	63SC09	63SC12	63SC14	06T3002
	Descripción	Agua fresca	Agua filtrada	Tren A- catión	Tren B- catión	Tren C- catión	Descarbonador tren A	Descarbonador tren B	Descarbonador tren C	Tren A- anión	Tren B- anión	Tren C- anión	Tanq Agua Desm.
Análisis	Método												
pH	SM-4500-H+	L-V	L-V	L-V	L-V	L-V	A	A	A	L-V	L-V	L-V	L-D
Conductividad	SM-2510-B	L-V	L-V	L-V	L-V	L-V	A	A	A	L-V	L-V	L-V	L-D
TSS	HACH-8006	L,Mi, V	L,M,V										
Turbidez	SM - 2130	L,M,V	L,M,V										
Dureza total	HACH-8374	A	A							L-V	L-V	L-V	M,J
Cloruros	HACH-8113	M,J	M,J	A	A	A	A	A	A	A	A	A	M,J
Sílice	HACH-8186	A	A	A	A	A	A	A	A	L-V	L-V	L-V	M,J
Sodio (ppb)	SM-3120-B			L,Mi	L,M i	L,M i							Mi
TOC	SM-5310-B	L,Mi, V	L,Mi, V	A	A	A				A	A	A	
Metales (Na,K,Ca,Mg)	ASTM-1976	A	A	A	A	A				A	A	A	
SO <sub>4</sub>	HACH-8051	A	A	A	A	A				A	A	A	

Alcalinidad													M,J
Total	SM- 2320	A	A	A	A	A				L-V	L-V	L-V	
Cloro Residual	HACH- 8021	L,Mi, V	L,Mi, V										
Hierro	HACH-8147	L,Mi, V	L,Mi, V										

Nota: L, M, Mi, J, V, S, D, representan los días de la semana en los que se realizan los análisis y A que corresponde a los análisis realizados a requerimiento.

#### 4.6 Conclusiones

1. Las variables principales que se monitorean en el proceso de desmineralización de agua son, el caudal de agua del proceso, nivel de almacenamiento de agua desmineralizada y de los químicos utilizados (soda caustica y ácido sulfúrico) y las caídas de presión que se producen en los filtros y los trenes de desmineralización.
2. Se pudo constatar que el sistema de producción de agua desmineralizada presenta dispositivos como válvulas, bombas y analizadores fuera de servicio, por lo que se dificulta la respuesta efectiva a los problemas que se presentan en el proceso, debido a no permite alcanzar una operación automática, eficiente y confiable de la unidad.
3. Los parámetros de calidad para el agua filtrada y fresca, como la turbidez, sólidos suspendidos, materia orgánica y pH se encontraron dentro de los rangos establecidos como control, por otra parte los parámetros como el hierro total y cloro residual excedieron ampliamente los valores establecidos como control.
4. La cantidad de agua filtrada producida se encontró dentro del rango de control establecido por diseño 120 – 480 ton/h, pudiendo notarse un flujo variable entre 300 y 400 ton/h durante seis meses de producción.

5. La caída de presión en la operación de los filtros de carbón se pudo observar en un valor promedio 0,5 bar, lo cual es aceptable ya que cumple con el rango de control.
6. El control del nivel de los tanques de agua desmineralizada y de los químicos utilizados para la regeneración iónica, fue bastante oscilatorio observándose que algunos registros se encontraban muy por debajo del rango mínimo de control.
7. No se realizan los análisis de laboratorio con la debida frecuencia para monitorear la calidad del agua desmineralizada.
8. El flujo de agua desmineralizada que se produce actualmente se encuentra por debajo del rango establecido por diseño (240-480 ton/h), dando un promedio entre 200 y 240 ton/h, debido a que el tren C casi siempre está fuera de servicio
9. El nivel de agua dentro del descarbonatador se mantuvo dentro del valor de control de 50%.
10. Los parámetros de calidad del agua desmineralizada como el pH, conductividad, dureza y sílice, presentan un porcentaje de desviación de 4,767%, 20,145%, 35,147% y 35,00% respectivamente, con respecto a los parámetros de calidad establecidos por diseño.
11. De acuerdo a la simulación realizada al comportamiento de los trenes de desmineralización, el tiempo del ciclo de producción es de 22,58 horas, según las condiciones de alimentación y el volumen de resina especificado por diseño.
12. A través de la simulación realizada al tren C, el tiempo de ciclo se vio disminuido a 10,82 horas, debido a que el nivel de resina se encuentra a la mitad de lo establecido por diseño.

#### 4.7 Recomendaciones

- Realizar una evaluación técnico-económica, que permita comparar el sistema de desmineralización actual con un sistema que incluya lecho mixto para mejorar la calidad del agua, el cual tome en cuenta las ventajas y desventajas de instalar este sistema en el mejorador.
- Realizar una evaluación periódica de las resinas aniónicas, con el objeto de verificar la presencia de resinas catiónicas por efecto de fugas en las trampas de resinas, de esta manera prevenir problemas durante la regeneración.
- Aplicar lo más adosado posible el nuevo programa de muestreo, para contribuir con el mejor seguimiento de los parámetros de calidad del agua, así como también el desempeño del sistema de desmineralización de la unidad.
- Cambiar los sistemas de medición existentes que se encuentran dañados, por otros de mayor precisión y alcance.
- Colocar nuevos analizadores en las líneas donde se dificulta verificar la calidad del agua y evaluar el sistema.
- Debido a que se han observado valores altos de pH en la salida del proceso, se recomienda el monitoreo de pH en la primera y segunda pasada de soda caustica.
- Se debe completar el nivel de resina en el tren de desmineralización C, para así tener un mejor desempeño y aumentar el tiempo de operación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bayona, R. **Fundamentos en Desmineralización**. Sistemas de Separación Dow Latinoamérica, Colombia, (1995).
- Felder, R. **Principios elementales de los procesos químicos**. Segunda Edición. Editorial ALHAMBRA. México DF. (1991).
- Guape, N. **Proposición de mejoras al sistema de dosificación de ácido sulfúrico de la planta de agua desmineralizada en SINCOR año 2006**. Tesis de grado, Instituto Politécnico Santiago Mariño, Núcleo de Anzoátegui, (2006).
- Itriago, G. **Elaboración de los balances de masa de la unidad de agua cruda, sistemas de distribución de vapor y agua de alimentación a las calderas en un mejorador de crudo extrapesado**. Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, (2007).
- Lipesa, **Tratamiento Químico del Agua**. 2da edición. Venezuela: Impregraf. (1998).

- **Luces, G. Evaluación de oportunidades para mejorar el aprovechamiento de vapor, agua desmineralizada y condensados de una planta mejoradora de crudo extrapesado.** Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, **(2009)**.
- **Manual de adiestramiento “Tratamiento del agua en sistemas de enfriamiento”,** Nalco de Venezuela, C.A., **(1989)**.
- **Manual de adiestramiento “Unidad de Producción, almacenamiento y Distribución de Agua Desmineralizada”.** SINCOR, Jose, Venezuela **(2001)**.
- **Manual de Operaciones “Unidad 6300 – Agua Desmineralizada”.** SINCOR, Jose, Venezuela **(2000)**.
- **“Manual de Resinas de Intercambio Iónico”,** Gamma Química de Venezuela, **(1990)**.
- **Moreno, Y. Comprobación del balance de agua cruda total y determinación del consumo de químicos utilizados en el sistema de agua de enfriamiento y en la unidad de desmineralización de Súper Octanos, C.A., Jose-Edo. Anzoátegui.** Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, **(2001)**.
- **Perry, R. Manual del Ingeniero Químico.** 5ta edición. México. Editorial McGraw-Hill. **(1988)**.
- **Pinto, J. Diseño de un sistema de inyección de químicos para tratamiento de aguas de procesos.** Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, **(2004)**.
- **W. McCabe – J. Smith. “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química”.** Editorial McGraw-Hill. 4<sup>ta</sup> edición. España. **(1991)**.



**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO**

<b>TÍTULO</b>	<b>“Evaluación del proceso de producción de agua desmineralizada en un complejo mejorador de crudo extra pesado”</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

AUTOR (ES):

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CVLAC / E MAIL</b>
<b>Aguilar Rodríguez, Dayana Carolina</b>	CVLAC: V- 17.122.275 EMAIL: <a href="mailto:dayi120385@hotmail.com">dayi120385@hotmail.com</a>

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

**Desmineralización**

**Intercambio iónico**

**Carbón activado**

**Filtración**

**Agua desmineralizada**

## **METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>ÁREA</b>	<b>SUB ÁREA</b>
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

### **RESUMEN (ABSTRACT):**

Para evaluar el proceso de producción de agua desmineralizada del mejorador Petrocedeño, se realizó una identificación de todas las variables que intervienen en el proceso para conocer cómo se monitorea y controla, se revisó el funcionamiento de todos los componentes del sistema de filtración e intercambio iónico mediante un levantamiento en campo, verificando las condiciones de operatividad de los equipos, válvulas y analizadores. Además se compararon las condiciones de operación actual de la unidad de desmineralización con las condiciones de diseño, a través de los programas de registro virtual denominados M-Pro y PI System, que posee la empresa. Por medio de una prueba de campo realizada al tren B de intercambio iónico y la información suministrada a una empresa especialista de resinas para que realizara una simulación del sistema de desmineralización, se verificó la carga promedio de agua producida y los parámetros de calidad del agua. A través de la evaluación realizada se pudo determinar que el proceso de producción de agua desmineralizada presenta fallas para efectuar el retrolavado de los filtros ya que solo se utiliza agua, en lugar de agua y aire como lo establece el diseño; en los trenes de intercambio iónico no se está haciendo la regeneración e inyección de químicos regenerantes a los tiempos y concentraciones adecuados establecidos por diseño, trayendo como consecuencia que la calidad del agua esté fuera de los parámetros de control, arrojando porcentajes de desviación para el pH, la conductividad, la dureza y el sílice de 4,767%, 20,145%, 35,147% y 35,00%, respectivamente. Por medio de la simulación se obtuvo que el tiempo del ciclo de operación de cada tren es de 22,58 horas, de acuerdo con el volumen de carga de resina especificado por diseño. En el tren C, se estima que el nivel de resina se encuentra a la mitad, por lo cual el tiempo de ciclo disminuye a 10,82 horas aproximadamente. Finalmente, se realizaron cuatro propuestas en base al estudio y comportamiento observado en toda la unidad; para la primera se hizo énfasis en el mejoramiento del sistema de operación en línea, como controladores y analizadores; la segunda, la activación completa de la fase de retrolavado y regeneración de los filtros de carbón activado; la tercera, el chequeo periódico de la calidad o eficiencia de las resinas de intercambio iónico; y para la cuarta, se propuso una actualización del programa para la rutina de análisis del agua del sistema.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
<b>Moreno, Yuvi</b>	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
	CVLAC:	V-			
	E_MAIL	@.com			
	E_MAIL				
<b>Peña, José</b>	ROL	CA	AS(X)	TU	JU
	CVLAC:	V-			
	E_MAIL	@.com			
	E_MAIL				
<b>Álvarez, Lucas</b>	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:	V-			
	E_MAIL	@.com			
	E_MAIL				
<b>Silva, Héctor</b>	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
	CVLAC:	V-			
	E_MAIL	@.com			
	E_MAIL				

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

<b>2011</b>	<b>07</b>	<b>26</b>
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Evaluación_proceso_aguadesmineralizada_mejoradorcru doextrapesado.doc	Aplicación/ms word

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F G H I J K L M  
N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5  
6 7 8 9.

**ALCANCE**

**ESPACIAL:** Petrocedeño (OPCIONAL)

**TEMPORAL:** 6 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

**“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo al Consejo Universitario respectivo, para su aprobación.”**

**Aguilar Rodríguez, Dayana Carolina**  
**AUTOR**

**Ing. Yuvi Moreno**  
ASESOR

**Ing. Lucas Álvarez**  
JURADO

**Ing. Héctor Silva**  
JURADO

**Prof. Yraima Salas**  
POR LA SUBCOMISION DE TESIS