

**Instituto Superior Minero Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad: Metalurgia y Electromecánica**

**REGENERACIÓN DE RESINAS DE
INTERCAMBIO IÓNICO PARA EL
TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA
EN LA EMPRESA ERNESTO CHE
GUEVARA.**

**Trabajo de diploma presentado en opción al título de
Ingeniero Metalúrgico.**

YANET LIZANIA RICARDO RODRÍGUEZ

MOA 2011



Instituto Superior Minero Metalúrgico
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad: Metalurgia Electromecánica

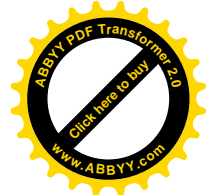
REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO PARA EL TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA EN LA EMPRESA ERNESTO CHE GUEVARA

**Trabajo de diploma presentado en opción al título de
Ingeniero Metalúrgico.**

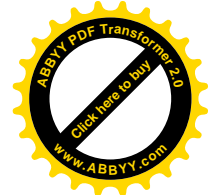
Autor: Yanet Lizania Ricardo Rodríguez

**Tutores: Ing. Emma Palacio Ramos
Prof. Aux. Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr. C**

Moa 2011



Pensamiento



PENSAMIENTO

"Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber".

Albert Einstein



Agradecimientos



AGRADECIMIENTOS

Con la presentación de esta tesis finaliza una importante etapa de mi vida. Han sido muchas las horas dedicadas para recibir una formación que me ha servido para adquirir los criterios y valores necesarios con los que afrontar las dificultades que nos ofrece tanto la vida personal como la profesional. Y todo esto no habría sido posible sin la ayuda de mis padres, de los que estoy eternamente agradecida.

Expreso mi agradecimiento a mis tutores Emma Palacio Ramos y Amaury Palacios Rodríguez por aceptar la propuesta para la realización de esta tesis.

*Al amor de mi vida Miguel Angel Díaz Jiménez por estar a mi lado incondicionalmente brindándome su cariño y comprensión.
Al grupo de tecnólogos de la planta Tratamiento Químico de Agua en la Empresa Ernesto Che Guevara, a mis amigas, y a todas las personas que me han ayudado para la culminación de esta tesis.*



Dedicataria

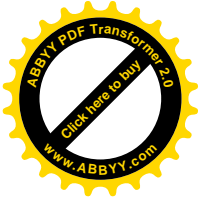


DEDICATORIA

En especial a mis padres Herley Ricardo Sánchez y Miriam Rodríguez Bárcenas, por guiarme en el largo camino de la vida, consagrándose para que hoy pueda lograr exitosamente mis metas. Y que además de mi existencia les debo todo lo que soy y lo que pueda ser mientras vivo.

Cariñosamente a mis hermanos por formar parte de mi vida y brindarme momentos felices.

Personalmente a Miguel Angel Díaz Jiménez por el amor que le tengo y por estar a mi lado apoyándome en todos los momentos de mi vida.



Resumen



RESUMEN

El propósito del Trabajo de Diploma fue racionalizar la cantidad de productos químicos que se utilizan durante la regeneración de resinas de intercambio iónico para el tratamiento químico de agua en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Durante la investigación se experimentó en el proceso de desmineralización cómo influye el nivel de regeneración sobre la capacidad útil de las resinas Amberlite IR 120 Na y Amberlite IRA 402 Cl. El análisis se estableció en Mayo y se compararon los resultados obtenidos con los de Marzo, además de evaluar el comportamiento de las resinas en el período de estudio.

Se utilizaron niveles de regeneración de 148 g/L de H_2SO_4 para la resina catiónica, y 78 g/L de NaOH para la resina aniónica. Se analizó la calidad del agua desmineralizada. Los resultados de los análisis químicos del agua tratada demostraron mejor estabilidad con los cambios realizados, lográndose aumento del tiempo de trabajo en los filtros aniónicos y un comportamiento similar en los catiónicos.

Con los cambios realizados se incurrió en un sobregasto de 579,79 CUC para el ácido sulfúrico y un ahorro de 2293,98 CUC para el hidróxido de sodio, aportando un ahorro total de 1714, 19 CUC .

Palabras claves: resinas, intercambio iónico, nivel de regeneración, capacidad útil.



Abstract



ABSTRACT

The purpose of the Work of Diploma was to rationalize the quantity of chemical products that it are used during the regeneration of resins of ionic exchange for the chemical treatment of water in the company "Major Ernesto Che Guevara". During the investigation it was experienced in the desmineralización process how it influences the regeneration level about the useful capacity of the resins Amberlite to IR 120 Na and Amberlite IRA 402 Cl. The analysis settled down in May and the results were compared obtained with those of March, besides evaluating the behavior of the resins in the period of study.

Levels of regeneration of 148 g/L of H_2SO_4 were used for the resin cationic, and 78 g/L of NaOH for the resin anionic. The quality of the water desmineralized was analyzed. The results of the chemical analyses of the treated water demonstrated better stability with the carried out changes, achieving you increase of the time of work in the filters anionic's and a similar behavior in the cationic's.

With the carried out changes it was incurred in a sobregasto of 579,79 CUC for the sulfuric acid and a saving of 2293,98 CUC for the hidroxide of sodium, contributing a total saving of 1714, 19 CUC.

Key words: resins, ionic exchange, regeneration level, useful capacity



Índice



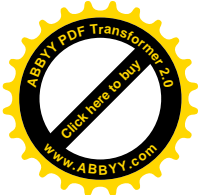
ÍNDICE	PÁG
<u>INTRODUCCIÓN</u>	571
<u>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO</u>	18
<u>1.1. Revisión bibliográfica y Antecedentes</u>	18
<u>1.1.1. Investigaciones nacionales</u>	21
<u>1.1.2. Investigaciones en la región de Moa</u>	21
<u>1.2. Fundamentos teóricos</u>	21
<u>1.2.1. Características del agua potable</u>	22
<u>1.2.2. Características de la planta de Tratamiento Químico de Agua</u>	23
<u>1.2.2.1. Indicadores de la calidad del agua</u>	23
<u>1.2.2.2. Criterios de agotamiento</u>	25
<u>1.2.3. Resinas de intercambio iónico</u>	25
<u>1.2.3.1. Propiedades y condiciones de operación establecidos</u> <u>por el fabricante</u>	26
<u>1.2.3.2. Regeneración</u>	27
<u>1.2.3.3. Vida útil</u>	28
<u>1.2.3.4. Selectividad</u>	28
<u>1.2.3.5. Capacidad de intercambio</u>	28
<u>1.2.4. Instalación tecnológica</u>	29
<u>1.3. Conclusiones del capítulo</u>	31
<u>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</u>	33
<u>2.1. Métodos</u>	33
<u>2.1.1. Métodos empíricos</u>	33
<u>2.2. Reactivos</u>	34
<u>2.3. Materiales</u>	34
<u>2.4. Equipos</u>	34
<u>2.5. Técnicas</u>	35
<u>2.5.1. Acidez mineral</u>	35



2.5.1.1. Procedimiento. Método del NaOH.....	35
2.5.1.2. Cálculos.....	35
2.5.2. Conductividad.....	35
2.5.2.1. Procedimiento. Método Conductímetro.....	35
2.5.3. Alcalinidad.....	36
2.5.3.1. Procedimiento. Método por valoración.....	36
2.5.3.2. Cálculos.....	36
2.5.4. Potencial de Hidrógeno.....	36
2.5.4.1. Procedimiento.....	37
2.5.5. Sílice en baja.....	37
2.5.5.1. Procedimiento. Método espectrofotométrico.....	37
2.6. Instalación empleada en la investigación.....	37
2.7. Principales indicadores que son controlados durante la regeneración.....	38
2.8. Metodología utilizada para la realización de los experimentos.....	39
2.8.1. Conformación de la base de datos.....	39
2.8.2. Indicadores técnico económicos utilizados durante la experimentación.....	39
2.8.2.1. Nivel de regeneración.....	39
2.8.2.1.1. Capacidad útil.....	40
2.8.2.1.2. Consumo específico.....	41
2.9. Conclusiones del capítulo.....	42
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	44
3.1 Intercambiadores catiónicos.....	44
3.2 Intercambiadores aniónicos.....	45
3.3. Indicadores técnico económicos.....	49
3.3.1. Comparación entre la capacidad total y la capacidad útil de la resina en los filtros.....	49
3.3.2. Consumo específico.....	50
3.3.3. Indicadores de producción.....	51
3.3.4. Productos químicos consumidos.....	52
3.3.4.1. Gastos para productos químicos.....	52
3.4. Diagnóstico ecológico y seguridad industrial.....	53



<u>3.4.1. Características de las sustancias</u>	53
<u>3.5. Conclusiones del capítulo</u>	55
<u>CONCLUSIONES</u>	57
<u>RECOMENDACIONES</u>	59



Introducción



INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta, el agua es la única sustancia que coexiste abundantemente en los tres estados físicos posibles. Es nuestro único líquido común y el sólido puro más ampliamente distribuido. Visto desde un punto de vista más amplio, el agua ocupa las tres cuartas partes de la superficie terrestre, forma parte de la lluvia, los ríos, lagos y mares. Además, constituye entre el 50 y 75 % de todos los organismos vivos.

El agua es un bien ampliamente utilizado para distintos usos, así pues dependerá de su calidad el fin al que pueda ser destinada. Los principales componentes disueltos en ella son los sulfatos, cloruros, bicarbonatos de sodio y potasio, y los óxidos de calcio y magnesio. Pura es un líquido inodoro e insípido. Tiene un matiz azul, que sólo puede detectarse en capas de gran profundidad. A la presión atmosférica, el punto de congelación es de 0 °C y su punto de ebullición de 100 °C .

Se denomina agua de proceso a la que se emplea en la industria. Estas aguas se utilizan como reactivo o intermediario propiamente dicho en el procedimiento de la fabricación, ya sea en fase líquida o vapor, como solvente de reactivos o productos, como fluido refrigerante y motriz en la generación de energía eléctrica y como fluido de lavado.

Sería ideal disponer de agua pura para las aplicaciones industriales, pero por razones técnicas y económicas, el hombre debe utilizar aguas naturales que contienen siempre impurezas en solución o suspensión.

En el mayor número de los casos, las aguas naturales producen problemas en sus aplicaciones industriales, formando depósitos e incrustaciones que interfieren con la transferencia de calor y ocasionan taponamientos, causando la corrosión de los metales y la degradación de la madera u otros materiales de construcción. Por eso la necesidad de realizar un tratamiento de las aguas naturales para eliminar riesgos de incrustaciones, corrosión o depósitos.

Las impurezas suspendidas y disueltas en el agua impiden que ésta sea adecuada para numerosos fines, los materiales indeseables, orgánicos e inorgánicos, se extraen por métodos de criba y sedimentación que eliminan los materiales suspendidos. Otro



método es el tratamiento con ciertos compuestos, como el carbón activado, que elimina los sabores y olores desagradables. También se puede purificar el agua por filtración, por cloración o irradiación, proceso que mata los microorganismos infecciosos.

El problema que se presenta desde el punto de vista del tratamiento de agua, es que algunos de los componentes presentes en ésta, son impurezas que causan serios problemas dependiendo del uso final (doméstico, potable, industrial, etc.). Es decir, que con esta condición, el agua necesita ser tratada o acondicionada para eliminarle o reducirle el contenido de ciertas impurezas.

No todos los contaminantes son perjudiciales, pero la remoción de aquellos que son indeseables según el uso, puede ser una tarea difícil. Existen varios tipos de contaminación, y cada situación debe tratarse de manera distinta, según las características individuales de cada contaminante y/o características físicas del agua, lo cual puede complicar el proceso de tratamiento.

El agua destinada para uso industrial puede requerir mayor atención, particularmente en aplicaciones donde se requiera agua ultra pura, como en industrias de electrónicos, farmacéuticos, y revestimiento de metales, quienes además pueden requerir reciclaje y circuitos de recirculación para reducir desperdicios del recurso natural. También pueden necesitarse procesos de filtración, suavización, desinfección y desionización por intercambio de iones u ósmosis inversa. Otros métodos más avanzados incluyen ozonización y luz ultravioleta para desinfección y oxidación, así como técnicas de clarificación por coagulación y floculación para la remoción de materias coloidales y sedimentación para partículas suspendidas.

El tratamiento de agua puede ser definido como un procedimiento usado para variar la composición química o el comportamiento natural del agua y es esencial para el desarrollo de la industria, las cuales requieren de esta para emplearla en el enfriamiento de equipos, productos, necesidades de procesos tecnológicos, para alimentar calderas y para el suministro de agua potable de consumo humano.

Los procedimientos pueden variar significativamente según las características que presente el agua cruda o la fuente de suministro. El uso final que va a tener el agua, determina que impurezas se deberán eliminar para evitar o minimizar los efectos secundarios que ellas pueden ocasionar.

Los tratamientos van dirigidos fundamentalmente a la eliminación “total” o parcial de los sólidos disueltos o suspendidos dependiendo de la calidad que se requiera. La



eliminación de estos sólidos se realiza a través de procesos de pretratamiento entre los cuales se hallan: aireación, clarificación, filtración, suavización, desmineralización, etc. En la industria del níquel empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se emplea un método químico para el tratamiento de agua. El método está basado en el intercambio iónico con resinas catiónicas y aniónicas como material filtrante, las cuales se “agotan” (saturan de cationes) después de un período determinado de explotación, por lo que se hace necesario regenerarlas para continuar el tratamiento químico del agua. Se desarrollan dos procesos, suavizamiento y desmineralización.

El suavizamiento se utiliza para eliminar los iones que hacen al agua dura (Ca^{2+} y Mg^{2+}). La separación de los iones y el intercambio es logrado por el uso de una resina catiónica insoluble que es mantenida neutra por iones sodio. Al pasar el agua por la resina, los cationes calcio y magnesio, se adhieren e ella y son reemplazados por los cationes de sodio contenidos en la resina, obteniéndose un agua suavizada con un pH neutro.

En la desmineralización, como su nombre lo dice, es el proceso de eliminación de minerales contenidos en el agua. Sin embargo este proceso no elimina elementos orgánicos u otros componentes que no tengan relación con los minerales, especialmente Ca^{2+} , Na^+ , NO_3^- , NO_2^- y Cl^- .

Para obtener agua desmineralizada se debe trata químicamente eliminando los minerales y las sales (iones catiónicos y aniónicos). Se utiliza cuando se requiere agua con bajo contenido en sal o baja conductividad. Durante este tratamiento, el agua obtenida tiene un grado de pH neutro. Esta se utiliza en el proceso productivo de la fábrica para generar vapor, un mayor consumo de vapor presenta la planta de Recuperación de amoníaco en la destilación de licor y cola, consumiendo un 65–70 % , también para el calentamiento durante el proceso tecnológico y un pequeño porciento como consumo interno de la Central Termoeléctrica.

En esta industria, la seguridad y mantenimiento adecuado de los equipos exige que las referidas impurezas sean reducidas en el mayor grado posible, ya que la utilización de agua sin tratamiento previo puede provocar gravísimas consecuencias en el ciclo productivo de la planta, donde el grado de pureza del agua es un asunto importante, debido a las indeseables incrustaciones, la corrosión de superficies metálicas, el arrastre de partículas sólidas o líquidas y la cristalización en tubos de calderas. Por la importancia que tiene el tratamiento del agua en los procesos de la fábrica, se pretende



dar una visión general de las resinas utilizadas en el tratamiento por intercambio iónico, su funcionamiento y contribuir a mejorar el manejo de los productos químicos que participan en el proceso.

La técnica de intercambio iónico es un proceso de separación de gran versatilidad con un amplio campo de aplicaciones en la industria. Su principal área de aplicación es el reaprovechamiento de las aguas, reteniendo sus contaminantes en las resinas de intercambio, concentrándolos finalmente en el proceso de regeneración, haciendo por tanto más económico y controlable su tratamiento.

Este proceso de intercambio comprende, el intercambio entre iones presentes en una disolución (contaminantes) y los iones de un sólido (resina). Estas operaciones son básicamente reacciones químicas de sustitución entre un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución.

Una resina de intercambio iónico puede considerarse como una estructura de cadenas hidrocarbonadas a las que se encuentran unidos de forma rígida grupos iónicos libres. Estas cadenas se encuentran unidas transversalmente formando una matriz tridimensional que proporciona rigidez a la resina y donde el grado de reticulación o entrecruzamiento determina la estructura porosa interna de la misma. Como los iones deben difundirse en el interior de la resina para que ocurra el intercambio, la selección del grado de reticulación puede limitar la movilidad de los iones participantes.

Las resinas poseen una alta capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, son estables y se regeneran fácilmente, y el proceso es excelente tanto para grandes como pequeñas instalaciones. Cuando se saturan, tienen un mayor consumo de regenerante y un mayor desgaste de la resina.

Son ampliamente utilizadas en la eliminación de los iones y minerales disueltos que contiene el agua, que son perjudiciales para diferentes procesos. Su estudio en el proceso de desmineralización favorece la obtención de aguas para uso industrial. Usándola se puede eliminar casi el 100 % de las sales, sólidos suspendidos y minerales disueltos que contienen el agua, pero no compuestos orgánicos, bacterias o virus.

Las resinas por lo general tienen una mayor selectividad hacia los iones de mayor valencia o carga. Entre los iones con una misma carga se encuentran mayores afinidades hacia los iones con un número atómico más alto. Estas relaciones de afinidad son revertidas en soluciones concentradas, por lo que hace posible la regeneración de las resinas agotadas. Es importante tener en cuenta que la vida útil de las resinas puede ser



muy corta, si se hace pasar a través de ella aguas con gran cantidad de partículas en suspensión, las que tapan los orificios de la resina.

Después de un ciclo de operaciones de la resina, se agota la habilidad del lecho de intercambio iónico, la instalación se pone temporalmente fuera de servicio, las resinas sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales, disminuyendo su capacidad de intercambio. Por lo que se hace necesario tratarlas mediante un proceso de regeneración.

La regeneración de las resinas es el proceso inverso del intercambio iónico, y tiene por finalidad devolverle a la resina 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. Se le hace un lavado inverso para limpiar y reclasificar hidráulicamente las partículas de resina en el lecho, y se regresa al servicio ya listo para tratar otro volumen de agua.

Anteriormente no se ha realizado algún otro trabajo de investigación que evidencie la problemática de regeneración de resinas de intercambio iónico. Por esta razón es necesario experimentar las condiciones en que se lleva a cabo la regeneración de las resinas, mediante la simulación industrial del proceso real.

Se pretenden encontrar los valores más racionales de los productos químicos que intervienen durante el proceso de regeneración de las resinas, en la Planta de Tratamiento Químico de Agua. De ello depende el método de desmineralización, que nos da finalmente agua altamente pura y libre de minerales, y que a su vez, evita problemas de corrosión e incrustaciones en los equipos para la generación de vapor.

Por los criterios mencionados con anterioridad resulta de vital importancia que se dedique tiempo y recursos a esta investigación, con el fin de obtener procesos productivos eficientes que marquen el desarrollo social. Por lo que nos planteamos como:

Problema: ¿Bajo qué condiciones se obtienen los mejores niveles de regeneración de las resinas que se utilizan en el tratamiento químico del agua, de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”?

Objeto de estudio: Proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para el tratamiento químico de agua.



Objetivo General: Establecer el comportamiento del proceso de regeneración de resinas para el tratamiento químico de agua en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Hipótesis: Si se determinan las cantidades racionales de productos químicos interactuantes en el proceso de regeneración de las resinas, durante el tratamiento químico de agua, se podrá obtener un producto de mejor calidad y mejorar la eficiencia del proceso.

Objetivos específicos:

- ✓ Evaluar el comportamiento de las resinas aniónicas y catiónicas.
- ✓ Experimentar a escala industrial.
- ✓ Aplicar el método tradicional al proceso de regeneración de resinas.
- ✓ Validar y reproducir las nuevas condiciones del método obtenido.

Campo de acción: Transformaciones químicas que ocurren durante la regeneración de resinas de intercambio iónico para el tratamiento químico del agua, en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

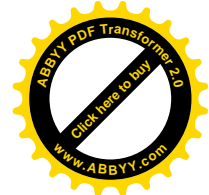
Aportes

Con este trabajo se pretende apoyar el desarrollo económico y social de la planta de Tratamiento Químico de Agua en los siguientes aspectos:

Económico: Ahorro en el consumo de productos químicos.

Tecnológico: Mejora en los indicadores técnico económicos del proceso de desmineralización.

Científico: Influencia del nivel de regeneración en la capacidad de intercambio de la resina.



Capítulo 1.

Marco teórico



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

La creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales ha despertado en el hombre la búsqueda de métodos para cuidarlos y recuperarlos, para que puedan ser aprovechados por los seres vivos; de ahí que uno de los recursos de vital importancia para el hombre como lo es el agua, sea objeto de estudio.

El tratamiento del agua es un proceso necesario para su utilización, tanto en los hogares como en la industria, debido a que en estado natural está contaminada químicamente y se hace imposible su uso. Para los quehaceres domésticos se especifica el tratamiento de potabilizar el agua, no así en el contexto industrial, donde además de su potabilización se necesitan otros más específicos con el fin de evitar serias interferencias o graves contratiempos en la mayor parte de los procesos donde se utiliza este recurso.

Es un elemento vital para diversas actividades, generalmente recibe residuos que la contaminan, denominándose aguas residuales o aguas servidas. La descarga directa de aguas servidas a un cuerpo receptor hace que los contaminantes presentes en esta sean traspasados al mismo, deteriorando su calidad para el desarrollo del ambiente acuático y limitando las posibilidades de uso.

Cuando los niveles de contaminación superan los límites impuestos por la normativa de cada país, éstas deben ser tratadas para reducir su nivel de contaminación y ser descargadas cumpliendo con las leyes vigentes. Existe gran cantidad de tecnologías que es posible aplicar al tratamiento de aguas.

En la búsqueda de sistemas de tratamiento menos complejos y de menores costos que los sistemas de tratamiento convencionales, se encuentra el tratamiento físico químico o TPA.

1.1. Revisión bibliográfica y antecedentes

El análisis bibliográfico estuvo en función de algunos aspectos fundamentales: los estudios que describen los diferentes aspectos teóricos, las investigaciones, trabajos de diploma, tesis, guías y manuales, etc., que aportan las bases metodológicas para esta



investigación. Estos aspectos permiten realizar el marco teórico e identificar los fundamentos básicos para la realización de este trabajo.

Los seres humanos han almacenado y distribuido el agua durante siglos. Hace aproximadamente 7000 años el agua almacenada en los pozos se utilizaba como fuente de recursos de agua, además se empezaron a desarrollar los sistemas de transporte y distribución del agua. Este transporte se realizaba mediante canales sencillos, excavados en la arena o las rocas y más tarde se comenzarían a utilizar tubos huecos.

Los griegos fueron unos de los primeros en tener interés en la calidad del agua. Ellos utilizaban embalses de aireación para la purificación del agua. El primer sistema de suministro de agua potable a una ciudad completa fue construido en Paisley, Escocia, alrededor del año 1804 por John Gibb. En 1806 en París comienza a funcionar la mayor planta de tratamiento de agua, donde el agua se sedimentaba durante 12 horas antes de su filtración. Los filtros consistían en arena y carbón, y su capacidad era de seis horas.

En 1827 el inglés James Simplón construye un filtro de arena para la purificación del agua potable. Comenzando así los procesos de purificación del agua. Uno de estos tratamientos aplicados en la industria es el intercambio iónico, este proceso 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. Tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas.

La ciencia de intercambiar un ión por otro empleando una matriz es una metodología antigua. Las propiedades como intercambiadores iónicos de algunas arcillas y minerales se conocen desde el siglo XIX.

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

Por su parte Gans (1905) modificó minerales naturales denominándolos permutitas (silicatos de sodio y aluminio sintéticos), que fueron las primeras sustancias empleadas en la eliminación de la dureza del agua. No obstante estos compuestos tenían en su contra que mostraban capacidades de intercambio bajas (aunque su velocidad de regeneración era rápida) y que por debajo de pH 7 se disolvían en agua.



Una etapa intermedia en la evolución del intercambio iónico fue el reconocimiento de las propiedades intercambiadores de varios materiales orgánicos, como el carbón sulfonado. Este material presentaba un grupo funcional capaz de intercambiar cationes de modo reversible y además operaba en un rango de pH mayor que los silicatos de aluminio, de 1 a 10, por lo que resultaba ser aplicable a un número mayor de procesos industriales. El inconveniente del carbón sulfonado era que su capacidad de intercambio era aún menor que la de los silicatos de aluminio.

La aportación más importante al desarrollo del intercambio iónico fue la síntesis de resinas orgánicas, realizada por Basil & Eric (1935). Desarrollaron polímeros orgánicos que imitaban a las zeolitas mediante la reacción de condensación entre el fenol y formaldehído.

Sustituyendo el fenol por derivados de éste, como fenoles polihídricos o por diaminas aromáticas, se dio paso a las resinas de intercambio catiónicas o aniónicas. Posteriormente, Eric produjo una resina catiónica fuerte a partir del ácido fenolsulfónico. Las primeras resinas Amberlite y Dowex se basaban en esta química.

La producción de resinas aniónicas de base fuerte, cuyo grupo funcional era un amino cuaternario fue investigada por McBurney (1947). El uso del copolímero estireno-divinilbenceno como matriz para enlazar grupos con capacidad intercambiadora, supuso una tremenda expansión en los procesos de intercambio iónico. De hecho, la mayoría de las resinas que se emplean actualmente tienen como matriz este copolímero.

Un paso más en el desarrollo de los intercambiadores iónicos fue la búsqueda de especificidad. El investigador Skogseid (1948) produce la primera resina específica para un metal, potasio, y a partir de este momento los científicos basaron sus esfuerzos en incorporar a la matriz de la resina distintos grupos funcionales que aumentasen su selectividad por un determinado compuesto, desarrollando así las resinas con mayor capacidad de intercambiar iones.

El tratamiento de aguas es quizás una de las operaciones más comunes que existe en la industria. Ya sea para cumplir normas ambientales o producir agua de calidad para uso en procesos tecnológicos, por lo que es conveniente conocer los fundamentos del tratamiento de aguas industriales motivo por el que en el transcurso de la historia se han dedicado esfuerzos y recursos a su investigación, con el objetivo de obtener tecnologías más eficientes.



En el desarrollo de esta investigación se quiere profundizar en el estudio de las resinas de intercambio iónico para el proceso de desmineralización.

Las resinas actuales utilizadas en el intercambio iónico son polielectrolitos o macromoléculas insolubles en agua, compuestos por una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos incorporados a una matriz de un polímero sintético (estirénicas o acrílicas).

1.1.1. Investigaciones nacionales

Otra de las empresas que han utilizado el tratamiento del agua como una vía para tratar y minimizar el consumo de esta es la Empresa Siderúrgica José Martí (Antillana de Acero). LARIA PIEDRA, ARLA MARTÍNEZ, HERNÁNDEZ DORTA, & MARTÍNEZ PEÑA (1999) en su trabajo de investigación tratan los procesos de ablandamiento y clarificación que garanticen la calidad de las aguas para su utilización en los procesos de enfriamiento en el complejo sistema de fundición y laminado del acero. Utilizaron parámetros para determinar la calidad del agua obtenida como sólidos suspendidos y determinación del pH. Obtuvieron exitosas soluciones; mejoraron, a partir de los métodos utilizados, en cuanto a calidad, suministro de reactivos y ahorro del agua que se consume. Este trabajo aportó ventajas favorables para esa empresa.

1.1.2. Investigaciones en la región de Moa

Un ejemplo de la utilización de las resinas de intercambio iónico se demuestra en el trabajo realizado por INFANTE HEREDIA, LAY SAYUT & GARCÍA SABOURÍN (1984). En esta tesis se realizó un estudio general de la organización del tratamiento químico del agua para el suministro a la Central Termoeléctrica, conociendo las operaciones realizadas durante el proceso de desmineralización y las reacciones que ocurren entre el agua y la resina de intercambio iónico.

En la etapa de desmineralización, tratan de eliminar todos los minerales presentes en el agua cruda. Tecnología comprendida por dos procesos de intercambio iónico. El primero elimina los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , K^{+} (cationes) utilizando una sustancia resinosa de H^{+} , transformando las sales de Na^{+} , Ca^{2+} y Mg^{2+} en sus ácidos. Por lo que el agua sale con un carácter ácido, este se elimina en la segunda etapa, donde la resina es cáustica, fija los aniones contenidos en el agua y sale prácticamente pura.



1.2. Fundamentos teóricos

El agua es una sustancia que la industria usa en tan vastas cantidades, que tanto en sus cantidades netas como en los tonelajes totales, sobrepasa por mucho a todos los otros materiales. Cualquiera que sea la fuente de abastecimiento, esta contendrá impurezas, ya que no hay agua natural que sea químicamente pura (NORDEL, 1990).

El proceso de desmineralización, es un método químico de tratamiento de agua externo, usado para eliminar los minerales presentes en el agua. La desmineralización elimina los iones indeseables del agua por intercambio iónico a través de un lecho o cama de resina que intercambia los iones indeseables en el agua por otros aceptados para obtener un agua con una baja salinidad, que pueda ser utilizada como reposición o agua de alimentar en las calderas de vapor (MARTICORENA COLLAZO, 1962).

Además de los tratamientos mencionados cabe mencionar que siempre se están desarrollando nuevas técnicas, como ozonización, tratamiento con rayos ultravioletas, osmosis inversa, etc., así que es un área donde hay mucho por explorar. Igualmente muchas operaciones tradicionales aun son opciones válidas dado su bajo costo y sus elevados índices de calidad.

1.2.1. Características del agua potable

Cloración es el nombre que se da al procedimiento para desinfectar el agua más comúnmente usado, utilizando el cloro o algunos de sus derivados como los hipocloritos de Na^+ o Ca^{2+} . En los abastecimientos de agua potable se emplea el gas cloro, mientras que para abastecimientos medianos o pequeños se utilizan hipocloritos.

Si el agua no se encuentra muy cargada de materias en suspensión, puede bastar un filtrado como única depuración. Para cantidades pequeñas se fabrican filtros portátiles que pueden transportarse con todos sus accesorios.

Los filtros de arenas y multimedias minerales son lentos y poseen cierta acción eliminadora de bacterias, pero necesitan mucho espacio para la purificación de aguas fluviales. Estos filtros retienen tierra, arena y algunas impurezas, pero dejan pasar algunos microorganismos y las sustancias químicas disueltas.

Una planta de tratamiento de agua nunca satisface en directo la demanda, trabaja constantemente y almacena en caso de que las demandas futuras sean enormes, esto explica que, el diseño de la planta nunca debe ser igual a la demanda actual, sino por el contrario se debe preparar para crecimientos futuros programados, ya sea de capacidad instalada mayor y/o modular.



En calidad de agua inicial para su tratamiento químico en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se recibe agua de características potables, provenientes de la Planta Potabilizadora. En esta instalación está sometida a procesos de coagulación, filtración y tratamiento con cloro; para eliminar las impurezas contenidas y evitando así la contaminación de las resinas en el posterior tratamiento del agua.

Las impurezas están caracterizadas por sólidos en suspensión, minerales y gases disueltos. El tratamiento del agua potable consiste en el conjunto de procesos químicos que permiten la reducción de estas impurezas hasta el grado que requiera su futura utilización.

Calidad del agua potable:

Temperatura: 25 - 30 °C .

PH: 7.

Contenido total de sales: 2,09 mgeqv/L .

Dureza total: 1,56 - 1,74 mgeqv/L .

Sílice: 15 - 23 mg/L .

1.2.2. Características de la planta de Tratamiento Químico de Agua

La Planta de Tratamiento Químico de Agua, es la encargada de obtener agua desmineralizada. Esta agua se usa en circuitos cerrados recirculantes en donde se requiere un agua de alta pureza y para la generación de vapor. El objetivo principal es la remoción completa de minerales disueltos y sílice. El agua desmineralizada se suministra a las calderas de vapor en la Central Termoeléctrica.

1.2.2.1. Indicadores de la calidad del agua

La calidad del agua se determina por la cantidad de sólidos suspendidos, el tipo de sales disueltas, el número de bacterias presentes y su tendencia corrosiva o incrustante. Para garantizar el control de la calidad del agua deben realizarse pruebas periódicas y sistemáticas en diferentes puntos del sistema. El análisis cuantifica la cantidad de impurezas disueltas en ella y determina ciertas propiedades físicas químicas (pH, Alc, SiO_2^{2-} , CO_2 , μ , AM).

Los indicadores principales controlados en la calidad del agua son:

1. Agua desmineralizada

Intercambiadores catiónicos

- 1.1. Acidez Mineral: 25-75 mg/L .



Cualquier sistema acuoso cuyo pH sea inferior a 4, deberá contener alguna sustancia ácida adicional, la concentración de ésta se conoce y mide como acidez mineral. La acidez de una muestra de agua, es por definición, su capacidad para reaccionar con una base fuerte hasta un determinado valor de pH. Se expresa como la cantidad equivalente de carbonato de calcio requerida para neutralizar dicha acidez. La medición de la acidez tiene por objeto, cuantificar las sustancias ácidas presentes en un determinado cuerpo de aguas. Este es importante debido a que las sustancias ácidas presentes en el agua, incrementan su corrosividad e interfieren en la capacidad de reacción con muchas sustancias y procesos en el interior de los sistemas acuosos.

1.2. Conductividad: $< 400 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Al determinar la conductividad se evalúa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio). Se emplea como una medida indirecta de la concentración mineral de un agua. Permite conocer el grado de salinidad y de pureza en el agua de los intercambiadores catiónicos. La unidad básica para medir la conductividad es el micro Siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

2. Agua aereada

2.1. Contenido de CO_2 : 3-5 mg/L .

3. Agua desmineralizada

Intercambiadores aniónicos

3.1. Alcalinidad Parcial (AlcP): 0 mgeqv/L .

3.2. Alcalinidad Total (AlcM): $< 0,10$ mgeqv/L .

Es una medida de la capacidad de un agua para absorber o neutralizar ácidos. Puede estar presente en el agua como bicarbonatos, carbonatos o hidróxidos y ocasionalmente por la presencia de iones fosfatos y silicatos. El tipo de alcalinidad depende del pH, si es menor a 8,3 toda es debido a los bicarbonatos, si es de 8,3 - 10,6 el agua tendrá carbonatos e hidróxidos.

3.3. Sílice (SiO_2^{2-}): $< 0,20$ mg/L .

Los análisis de la sílice, proporcionan un método sensitivo para el control de la operación los desmineralizadores de agua, ya que la sílice es una de las primeras impurezas que salen a través de una unidad agotada.



El análisis de la sílice en el agua de alimentación de las calderas, es de gran importancia para evitar la formación de depósitos duros de sílice en los tubos de las calderas y en las aspas de las turbinas de vapor. Su medición se realiza con el equipo denominado espectrofotométrico.

Se considera que hay fuga de sílice, cuando los niveles están por encima de 0,20 mg/L.

Estas pueden deberse a:

- ✓ Pérdida de grupos activos.
- ✓ Ensuciamiento por materia orgánica.
- ✓ Acumulación de sílice por mala regeneración en la resina.
- ✓ Aumento de la temperatura durante la operación, lo cual origina hidrólisis de la sílice adsorbida en la resina.

Estas fugas se pueden minimizar aumentando la cantidad de regenerante, aumentando la temperatura del regenerante o paralizando el bombeo de regenerante, para dar un tiempo de remojo (15 min), después de 10 min de iniciado el bombeo.

3.4. Potencial de Hidrógeno (pH): (8,9-9,1).

Es el índice numérico para expresar el grado de acidez o de alcalinidad de las soluciones. Un pH de 7 es neutral, entre 0 y 7 es ácido, mientras que de 7 a 14 es alcalino (básico).

3.5. μ : $< 10 \mu\text{S/cm}$.

1.2.2.2. Criterios de agotamiento

La correcta interpretación de los análisis químicos de control durante la explotación de las instalaciones de tratamiento de agua, así como la aplicación de los criterios de aceptación, tales como los parámetros de puesta en servicio y/o agotamiento, garantizan una mayor eficiencia, en el uso de las instalaciones de tratamiento de agua.

Los criterios de aceptación para determinar el punto de agotamiento para cada intercambiador son los siguientes:

Intercambiadores catiónicos

✓ AM: Se mantiene prácticamente constante pero al final de la corrida disminuye en un 10 % del valor inicial, por esta razón se adopta como criterio de agotamiento.

Intercambiadores aniónicos

✓ SiO_2^{2-} : Se mantiene estable, pero al final de la corrida tiende a aumentar alcanzando valores mayores de 0,20 mg/L, considerándose como criterio de agotamiento.



1.2.3. Resinas de intercambio iónico

Las resinas utilizadas en el proceso dentro de los filtros son las siguientes:

- ✓ Resina catiónica fuerte Amberlite ROHM & HAAS. Modelo IR 120 Na plus.
- ✓ Resina aniónica fuerte Amberlite ROHM & HAAS. Modelo IRA 402 Cl.

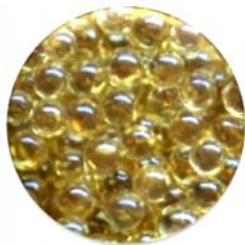


Figura 1.1. Resina Amberlite.

La resina catiónica fuerte, combina las propiedades de alta capacidad y gran resistencia a la fractura que pudiera ser provocada por la fricción y por impacto osmótico, ofreciendo una mínima caída de presión a través del lecho en una amplia variedad de condiciones de operación. Intercambia todos los cationes tanto los asociados a aniones de ácidos fuertes como aniones de ácidos débiles. Regeneradas con ácido sirven como lecho primario en desmineralización industrial del agua. Su gran resistencia física la convierte en una excelente resina a seleccionar para aplicaciones de procesos químicos.

La resina aniónica fuerte, remueve los aniones disociados en solución incluyendo bicarbonatos y sílice. Es una resina intercambiadora de aniones tipo gel, fuertemente básica, sintética y de alta capacidad, tipo estireno, se suministra en forma Cl en partículas esféricas transparentes, casi perfectas como si fueran perlas. Produce aguas de excelente calidad para alimentación a las calderas u otros usos industriales, como en el Laboratorio Químico.

Los datos técnicos de estas resinas, están en el documento (V., 2004).

El sistema de resina catiónica de ácido fuerte y aniónica de base fuerte es el método más simple y con él se puede obtener un agua desionizada que puede ser usada en una amplia variedad de aplicaciones.

1.2.3.1. Propiedades y condiciones de operación establecidos por el fabricante

Resina catiónica fuerte

- Capacidad Total de Intercambio: 2 mgeqv/mL (en forma de Na⁺).
- Regenerante (base del 100 %): H₂SO₄.
- Nivel de regeneración: (80,36 – 160,72) kg/m³ .
- Tiempo mínimo de contacto: 30 min .



Resina aniónica fuerte

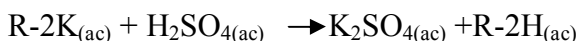
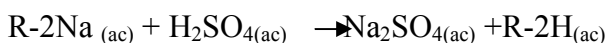
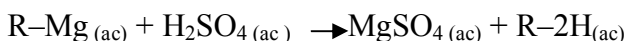
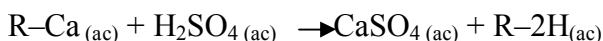
- Capacidad Total de Intercambio: 1,3 mgeqv/mL (en forma de Cl-).
- Regenerante (base del 100 %): NaOH.
- Nivel de regeneración: (32,14 – 192,86) kg/m³.
- ✓ Tiempo mínimo de contacto: 30 min .

1.2.3.2. Regeneración

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el procedimiento inverso del proceso de tratamiento de agua por intercambio iónico y tiene por finalidad devolverle a la resina 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 tratamiento de agua. Para la regeneración se utilizan soluciones de diferentes compuestos:

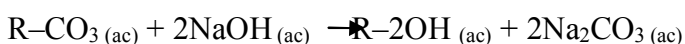
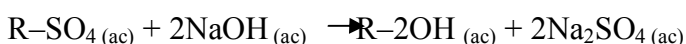
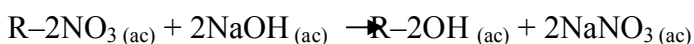
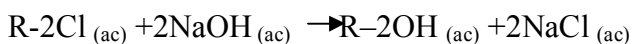
- ✓ H₂SO₄: para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes en los intercambiadores catiónicos de desmineralización.
- ✓ NaOH: para regenerar resinas aniónicas de bases fuertes en los intercambiadores aniónicos de desmineralización.

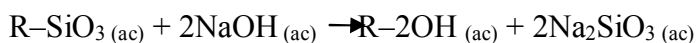
Cuando las resinas de intercambio catiónico ya no tienen iones hidrógeno para intercambiar, se les regenera haciendo pasar una solución ácido sulfúrico, produciéndose las siguientes reacciones:



La regeneración se realiza normalmente en serie y la solución de ácido sulfúrico atraviesa sucesivamente la resina.

Una vez que las resinas de intercambio aniónico no tienen más iones OH⁻ que intercambiar con los aniones del agua, estas deben ser regeneradas. Su capacidad de intercambio les es devuelta haciendo pasar una solución de base fuerte de hidróxido de sodio. Se producirán las siguientes reacciones:





La regeneración tiene dos inconvenientes importantes:

✓ El gasto económico de regenerante, puede reducirse reutilizando la solución hasta que pierda su eficiencia, aunque esta opción no es del todo económica ya que implica establecer nuevas condiciones de almacenaje.

✓ La generación de residuos, ya que después de regenerar el intercambiador se obtienen disoluciones altamente ácidas o básicas generalmente muy concentradas en metales que deben ser tratadas o eliminadas.

El proceso de regeneración consta de tres etapas: contralavado, regeneración y enjuague o desplazamiento; en cada una de ellas se realizan operaciones diferentes que pueden variar de acuerdo a las características de la resina que se esté empleando en ese momento y del tiempo que tenga de explotación.

1.2.3.3. Vida útil

Después de una serie de ciclos de intercambio iónico las resinas sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales, disminuyendo su capacidad de intercambio. La vida útil esperada de las resinas de intercambio iónico está entre los 5 y los 10 años.

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.

1.2.3.4. Selectividad

Las resinas de intercambio iónico presentan diferentes selectividades hacia los iones. Esta selectividad es influenciada por las propiedades de la esfera, los iones intercambiadores y la solución en la cual están presentes los iones. A continuación se detalla su selectividad en orden decreciente.

- ✓ Resinas catiónicas de ácidos fuertes: Ag^+ , Pb^{++} , Hg^{++} , Ca^{++} , Cu^{++} , Ni^{++} , Cd^{++} , Zn^{++} , Fe^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , H^+ .



- ✓ Resinas aniónicas de bases fuertes: CO_3^- , SiO_3^- , I^- , HSO_4^- , NO_3^- , Br^- , HSO_3^- , NO_2^- , Cl^- , HCO_3^- , F^- .

1.2.3.5. Capacidad de intercambio

- ✓ Capacidad total.

Corresponde al número de grupos activos, se expresa en equivalentes por litro de resina.

Un equivalente representa $6,02 \cdot 10^{23}$ grupos activos, llamado número de Avogadro.

Una resina intercambiadora fuertemente ácida tiene una capacidad total de 1,8 a 2,2 eqv/L . Una resina intercambiadora de aniones fuertemente básica tiene una capacidad total de 1,1 a 1,4 eqv/L .

- ✓ Capacidad útil.

Capacidad utilizada cuando no se ha alcanzado el equilibrio y que depende de las condiciones en que se realiza el intercambio. Es la diferencia entre los sitios regenerados al principio y al final del período de producción. Se expresa en equivalentes por litro. En operación normal, es aproximadamente la mitad de la capacidad total. Los valores normales son de 40 a 70 % de la capacidad total, en función de las condiciones de operación.

Parámetros que afectan la capacidad útil:

- ✓ Concentración y tipo de iones a eliminar.
- ✓ Caudal de producción.
- ✓ Temperatura.
- ✓ Tipo, concentración, cantidad y caudal de la solución regenerante.
- ✓ Tipo de regeneración (corriente o contra-corriente).
- ✓ Altura de lecho.

1.2.4. Instalación tecnológica

Los intercambiadores de iones son equipos que contienen un lecho de resina, que es capaz de intercambiar los iones presentes en el agua con los iones que tienen sus radicales libres. En dependencia de la carga que sea capaz de adsorber la resina, la cual puede ser negativa o positiva, estos intercambiadores se denominan catiónicos o aniónicos (catéxer o anéxer).

Catéxer:

Los catéxer son intercambiadores de cationes en ciclo H^+ ácido, su trabajo está representado en la figura 1.1, los iones positivos se retienen en el lecho de resina, intercambiándose con los iones H^+ . Estos, en combinación con los iones negativos o

aniones carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y cloruros forman los ácidos correspondientes (carbónico, sulfúrico, clorhídrico). De estos ácidos, el carbónico está débilmente ionizado, de aquí que actúe como una solución de dióxido de carbono en agua, siendo extraído posteriormente en el descarbonatador, lo cual representa una notable disminución de carga para los anéxer.

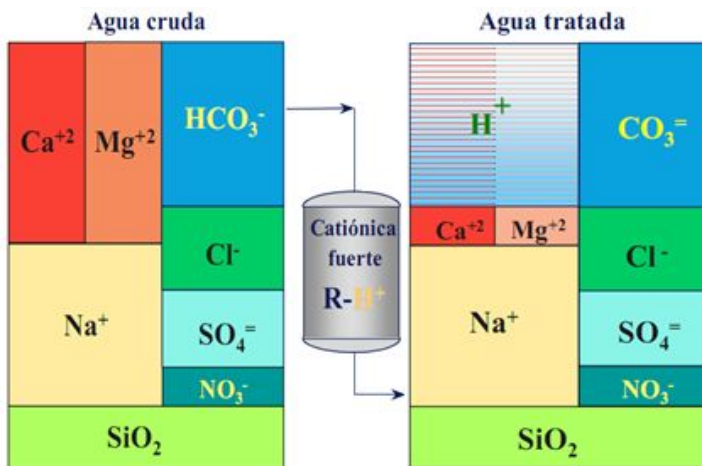


Figura 1.1. Intercambiador catiónico

Descarbonatador:

Debido a que en el intercambiador catiónico se produce anhídrido carbónico (CO₂ disuelto en agua), para evitar un trabajo excesivo de las resinas aniónicas, se rebaja al mínimo el contenido de anhídrido carbónico mediante una corriente de aire impulsado por un ventilador (figura 1.2), en contracorriente con el agua que ingresa por la parte superior finamente dispersada y repartida uniformemente por un relleno de anillos Rashing, provocándose la evacuación del CO₂ al exterior, por arrastre con el aire. Una buena operación del descarbonatador dejará un máximo de CO₂ de 5 mg/L .

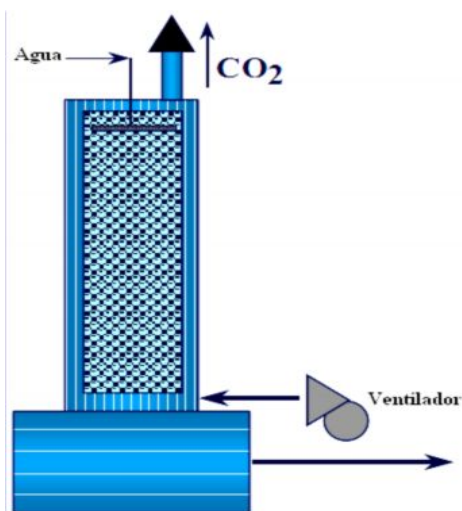


Figura 1.2. Descarbonatador.

Anéxer:

Los anéxer son intercambiadores de aniones en ciclo OH^- y su función es retener en el lecho todos los iones negativos o aniones que vienen en el agua, el mecanismo para realizar esta función se describe en la figura 1.3, el agua proveniente del descarbonatador, donde se ha expulsado todo el CO_2 , pasa por el lecho de resina cargada, reteniendo los iones sulfatos, cloruros, silicatos, etc. y entregando los iones OH^- que al unirse con los iones H^+ procedente del primer intercambio, forman agua según la reacción:

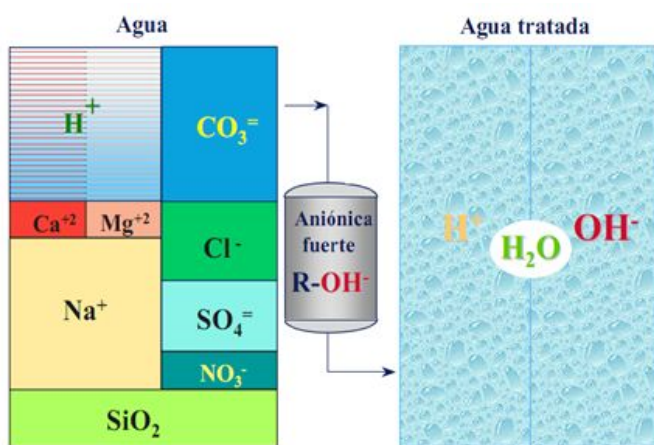
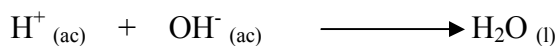
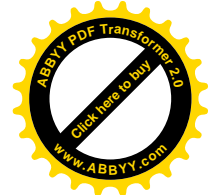


Figura 1.3. Intercambiador aniónico.

Esta segunda etapa es una absorción de la molécula de ácido completa por la resina, siendo más tarde expulsada en la regeneración.

1.3. Conclusiones del capítulo

El desarrollo del marco teórico de la investigación, permitió establecer los antecedentes y fundamentos teóricos necesarios para el estudio y comprensión del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico a partir del tratamiento químico del agua.



Capítulo 2.

Métodos y materiales



CAPÍTULO 2. MÉTODOS Y MATERIALES

El desarrollo y éxito de toda investigación está basada en la confiabilidad de los resultados. La adecuada selección de los métodos y materiales merece una especial atención. Por lo que en este capítulo se desarrolla la metodología propuesta para determinar los principales parámetros que intervienen en el proceso.

2.1. Métodos

Para el desarrollo de las investigaciones científicas se hace necesario justificar los resultados en correspondencia con los métodos de validación existentes. A continuación se exponen los métodos seleccionados para asegurar la confiabilidad de los mismos.

2.1.1. Métodos empíricos

Permiten la obtención y elaboración de los datos empíricos y el conocimiento de los hechos fundamentales que caracterizan a los fenómenos.

La observación

Mediante la observación se pudo conocer las particularidades técnicas operativas del área de tratamiento químico de agua en la planta. Los elementos constituyentes de las instalaciones (filtros) además de las características físicas de las resinas.

La medición

Para garantizar los parámetros de operación, fue necesario controlar el flujo de agua y de agentes regenerantes, además de la dosificación de los productos químicos durante la preparación de la solución para la regeneración, mediante bombas reguladoras de flujo.

La experimentación

Se experimentó cada dos horas para determinar las características de la calidad del agua en dependencia de los ciclos de regeneración y valorar el tiempo de trabajo de la resina y la eficiencia de los procesos regenerativos.

Grupos de discusión

Mediante grupos de discusión formales y no formales se analizaron los cambios en los parámetros de los procesos de regeneración, agotamiento y calidad del agua antes y después del tratamiento.



2.2. Reactivos

Regeneración

- ✓ H₂SO₄ al 2 y 6 % .
- ✓ NaOH al 4 % .
- ✓ H₂O.
- ✓ Aire.

Análisis químico de laboratorio

- ✓ NaOH 0.01 N .
- ✓ Indicador rojo de metilo.
- ✓ Indicador fenolftaleína al 0,1 % .
- ✓ Indicador metilnaranja o mezcla de indicadores.
- ✓ Molibdato de amonio al 10 % .
- ✓ Solución de ácido oxálico (75 g/L).
- ✓ HCl.
- ✓ Ácido ascórbico (5g).
- ✓ Ácido tartárico al 5 % .

2.3. Materiales

- ✓ Probetas de 100 mL .
- ✓ Buretas de 25 mL .
- ✓ Matraces de 250 mL .
- ✓ Volumétrico.
- ✓ Tubo Hach.

2.4. Equipos

- ✓ pH – Metro WTW.
- ✓ Conductímetro WTW.
- ✓ Espectrofotómetro DR – 2000 HACH.

2.5. Técnicas

Durante el período de trabajo de los intercambiadores, se tomaron muestras de agua para controlar los indicadores normados en el Gráfico de Control Analítico 358-GFM-1. Estas muestras fueron tomadas cada dos horas, se pudo comprobar la capacidad de intercambio iónico de las resinas y el tiempo de trabajo de los equipos intercambiadores.



2.5.1. Acidez mineral

Se mide en el agua tratada que sale de los intercambiadores catiónicos e indica si la resina está agotada. A medida que transcurren las horas de operación la acidez mineral debe disminuir y cuando el valor alcanza un 10 % menor al valor inicial, queda fuera de servicio el intercambiador para luego ser regenerado.

2.5.1.1. Procedimiento. Método del NaOH

- ✓ Probetear 100 mL de muestra y transferir al matraz.
- ✓ Adicionar de 2 a 3 gotas del indicador rojo de metilo.
- ✓ Titular con NaOH hasta coloración amarilla.

2.5.1.2. Cálculos

$$AM = V \cdot 5$$

donde:

AM: acidez mineral, mg/L .

V: volumen de reactivo utilizado, L .

5: factor de equilibrio, mg .

2.5.2. Conductividad

Se determina mediante la utilización de un conductímetro electrónico, el que genera una diferencia de voltaje entre dos electrodos sumergidos en agua. La caída en el voltaje debida a la resistencia del agua es utilizada para calcular la conductividad por centímetro.

2.5.2.1. Procedimiento. Método conductímetro

La lectura se realiza utilizando la misma metodología que en la determinación del pH, lo que para este caso se emplea el Conductímetro. El valor obtenido debe ser para los filtros catiónicos y aniónicos < 400 y $< 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente.

2.5.3. Alcalinidad

Existen dos tipos de alcalinidad en el agua, AlcP y AlcM. AlcP es la medida del contenido del ion carbonato CO_3^- , calculado como CaCO_3 y la AlcM es la medida del contenido de los iones CO_3^- y HCO_3^- .

2.5.3.1. Procedimiento. Método por valoración

Alcalinidad parcial

- ✓ Probetear 100 mL de muestra.
- ✓ Adicionar de 3 a 4 gotas del indicador fenolftaleína (solución alcohólica).



Agitar hasta que la solución quede incolora, si al momento de agregar el indicador queda transparente, la AlcP se considera cero. Si toma color rosado valorar con H_2SO_4 hasta cambio a incoloro.

Alcalinidad total

- ✓ A la muestra de AlcP se le adicionan de 2 a 3 gotas del indicador metilnaranja o mezcla de indicadores.

Si se adiciona el indicador metilnaranja, se agita hasta obtener coloración anaranjado. En caso de ser la mezcla de indicadores, se agita la muestra hasta obtener una coloración rosada.

2.5.3.2. Cálculos

$$\text{AlcP} = V_f \cdot 0,20$$

$$\text{AlcM} = V_m \cdot 0,20$$

donde:

AlcP y AlcM: alcalinidad parcial y total respectivamente, mgeqv/L .

V_f : volumen de fenolftaleína utilizado, L .

V_m : volumen utilizado de metilnaranja o mezcla de indicadores, L .

0,20: factor, mgeqv .

2.5.4. Potencial de Hidrógeno

Se usa para demostrar si una sustancia es ácida, neutra, o alcalina. El potencial de las cargas determina el número de iones H^+ e OH^- y cuando haya sido determinado, el valor de pH aparecerá digitalmente en el equipo de medición.

2.5.4.1. Procedimiento

Endulzar varias veces el electrodo del pH-metro, esperar hasta que la lectura se establezca en un valor. En el agua desmineralizada de los intercambiadores aniónicos se debe obtener un pH básico (8,9 - 9,1).

2.5.5. Sílice en baja

Este método determina únicamente la sílice soluble en el intervalo de 0,5 a 0,20 mg/L .

La determinación se basa en la espectrofotometría de absorción en la región visible. Su relación cuantitativa se basa en la ley de Lambert y Beer, que indica que la absorción de la radiación es proporcional a la concentración de la sílice presente.

2.5.5.1. Procedimiento. Método espectrofotométrico

- ✓ Probetear 25 mL de muestra y transferirlo a un volumétrico.



- ✓ Adicionar 1 mL de ácido clorhídrico.
- ✓ Añadir 2 mL de molibdato de amonio.
- ✓ Luego de 4 minutos, adicionar 2 mL de ácido oxálico.
- ✓ Luego de 1 minuto, añadir 2 mL de solución reductora (ácido ascórbico + ácido tartárico).
- ✓ Esperar 2 minutos, pasar el blanco y calibrar el equipo a cero.
- ✓ Traspasar la muestra al tubo hach y ponerlo en el equipo. Leer usando el programa 651 de Hach o Favorito de sílice hasta 1,6 mg/L .
- ✓ Esperar el resultado.

2.6. Instalación empleada en la investigación

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, el proceso de regeneración de resinas se estudió a escala industrial, para lo cual se utilizaron equipos intercambiadores de iones catiónicos y aniónicos. Estos son los llamados filtros catiónicos y aniónicos, su equipamiento se describe en el capítulo uno.

En la instalación de desmineralización hay ocho filtros, divididos en dos etapas. En la primera etapa hay cuatro filtros catiónicos, y en la segunda hay cuatro filtros aniónicos. Cada uno representa un cilindro con fondo esférico, con agujeros para la entrada y salida del agua. La superficie interior está engomada. Tienen sistemas de drenajes y distribuidores superiores e inferiores. Los drenajes superiores representan una campana de plástico con orificios de 10 mm de diámetro y los inferiores están formados por ocho rayos, compuestos de placas de plástico con sus apoyos, que crean las ranuras transversales y permiten la salida del agua filtrada. El sistema de drenaje medio tiene las placas y los rayos verticales plásticos, que permiten la entrada de la solución regenerante al filtro.

El filtro tiene dos escotillas, superior e inferior. La superior para la inspección de la resina durante la regeneración, y la inferior para revisión de la resina durante su período de trabajo. Están provistos de válvulas para realizar las diferentes operaciones durante su operación normal y la regeneración.

Válvula 1: Para regular el consumo de agua a través del filtro.

Válvula 2: Entrada de agua a tratar químicamente.

Válvula 3: Salida de agua tratada químicamente.

Válvula 4: Entrada de agua de contralavado.

Válvula 5: Salida de agua de contralavado al drenaje.



Válvula 6: Entrada de solución regenerante.

Válvula 7: Salida de solución regenerante al drenaje.

Válvula 8: Salida de agua de lavado I al drenaje.

Válvula 9: Salida de agua de lavado II al tanque de agua de contralavado.

Válvula 10: Disminución de nivel del agua sobre la resina.

Válvula 11: Salida del aire.

Válvula 12: Entrada del aire para el contralavado.

Válvula 13: Entrada o salida de la resina durante la carga del filtro.

2.7. Principales indicadores que son controlados durante la regeneración

Las resinas poseen una determinada capacidad de intercambio, que se define como el número de grupos funcionales por unidad de masa o volumen del intercambiador; indica la cantidad de iones que se pueda retener en la instalación. Esta capacidad de intercambio depende del nivel de regeneración que tenga la resina, que representa la capacidad útil, es decir, la capacidad de intercambio, la que tiende a ser directamente proporcional al consumo específico de regenerante.

Durante el proceso de investigación se determinó el nivel de regeneración en el mes de Marzo de las resinas utilizadas, para hacer luego una comparación con los valores establecidos por el fabricante. Se demostró que no todos los productos químicos utilizados durante el proceso de regeneración estaban cumpliendo las normas del fabricante, por lo que se hizo necesario modificar estos valores a otros normalizados.

Los parámetros que serán estudiados son los siguientes:

- ✓ Nivel de regeneración.
- ✓ Tiempo de contacto entre la solución regenerante y la resina.
- ✓ Tiempo de trabajo de los intercambiadores.

2.8. Metodología utilizada para la realización de los experimentos

1. Se tomaron muestras representativas en cada uno de los intercambiadores, todos los días del mes de mayo cada dos horas.
2. A las muestras se les realizó análisis químico en el laboratorio.
3. A partir de la información obtenida, se estudiaron las variaciones de los parámetros y las horas de trabajo de los intercambiadores.
4. Se realizaron cambios experimentales a escala industrial y se comprobaron los resultados mediante análisis químico en el laboratorio.



2.8.1. Conformación de la base de datos.

Como método de estudio se aplicó el tradicional, con este se realizaron cambios en el nivel de regeneración de la resina, teniendo su máxima influencia sobre las horas de trabajo de los intercambiadores y los resultados de análisis químico en el agua tratada.

Para la conformación de la base de datos se preparó una hoja de cálculo en Microsoft Excel, donde se incluyen los datos recopilados durante los análisis químicos, las ecuaciones y las gráficas correspondientes a cada intercambiador iónico. Se realizaron comparaciones entre los meses de Marzo y Mayo. El estudio fue realizado a escala de laboratorio e industrial.

2.8.2. Indicadores técnico económicos utilizados durante la experimentación

Con los cambios realizados se pretende disminuir el consumo de regenerantes, aumentar el tiempo de operación de los filtros, aumentar el nivel de regeneración de las resinas catiónicas y aniónicas e incrementar los parámetros de calidad del agua al finalizar el proceso de tratamiento químico. Se persigue alcanzar la disminución del uso de productos químicos en los procesos de regeneración, además de la reducción de los costos por la adquisición de los agentes regenerantes y gastos de operación en la instalación.

2.8.2.1. Nivel de regeneración

$$NR = CU \cdot CE$$

donde:

CU: capacidad útil; eqv/m³.

CE: consumo específico; kg/eqv.

2.8.2.1.1. Capacidad útil

$$CU = \frac{\text{eqv.abs.}}{V.R}$$

donde:

eqv. abs.: equivalentes absorbidos; eqv.

V. R: volumen de resina; m³.

Equivalentes absorbidos

$$\text{eqv. abs.} = M \cdot S$$

donde:

M: volumen de agua tratada; m³.



S: salinidad; mgeqv/m³.

Volumen de resina

- ✓ Intercambiadores catiónicos: 6,5 m³.
- ✓ Intercambiadores aniónicos: 6,25 m³.

Volumen de agua tratada

$$M = Q \cdot t$$

donde:

Q: flujo de agua; m³/h .

t: tiempo de trabajo; h .

Salinidad

Intercambiador catiónico

$$S = AlcM_{(H_2O \text{ cruda})} + AM_{(H_2O \text{ cruda})} + SiO_{2(H_2O \text{ cruda})}$$

Intercambiador aniónico

$$S = AM_{(catión)} + SiO_{2(H_2O \text{ cruda})} + CO_{2(H_2O \text{ aereada})}$$

donde:

AlcM_(H₂O cruda): alcalinidad total en el agua de entrada; mgeqv/L .

AM_(H₂O cruda): acidez mineral en el agua de entrada; mgeqv/L .

SiO_{2 (H₂O cruda)}: sílice en el agua de entrada; mgeqv/L .

AM_(catión): acidez mineral en el agua del intercambiador catiónico; mgeqv/L .

CO_{2 (H₂O aereada)}: dióxido de carbono en agua de las torres descarbonatadoras; mgeqv/L .

2.8.2.1.2. Consumo específico

$$CE = \frac{m \text{ reg.}}{\text{eqv. abs.}}$$

donde:

m reg.: masa de regenerante; kg .

eqv. abs.: equivalentes absorbidos; eqv .

Masa de regenerante

La cantidad de regenerante se tomó teniendo en cuenta el nivel de regeneración establecido por el fabricante, se realizaron cálculos para determinar si los valores utilizados en el mes de Marzo estaban cumpliendo con las normas establecidas.



En la tabla 2.1 se relacionan los parámetros establecidos por el fabricante sobre el nivel de regeneración y los valores de trabajo durante el mes de Marzo, antes de realizar los cambios experimentales.

Tabla 2.1. Comparación de los datos del fabricante con los de Marzo.

Sustancias	Nivel de regeneración (NR) establecido por el fabricante (kg/m ³)	NR Marzo (kg/m ³)	Regenerante Marzo (kg)	Nivel en Tanque dosificador (cm)
H ₂ SO ₄	80,36 - 160,72	178	1155	30
NaOH	32,14 - 192,86	62	392	80

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 2.1 se puede demostrar que en el caso del ácido sulfúrico el nivel de regeneración queda por fuera de los valores establecidos por el fabricante, en cambio el hidróxido de sodio no presenta incoherencias respecto a lo señalado. Para realizar el estudio del método tradicional se diseñó una variante de cambios, para determinar si los valores propuestos mejoran la calidad del trabajo de las resinas y de los intercambiadores.

Como se muestra en la Tabla 2.2, para realizar los cambios de operación tecnológicos, se disminuyó el consumo de regenerante de ácido sulfúrico en 192 kg . De esta forma se logra cumplir con las normas establecidas y se consume menor cantidad de ácido por cada regeneración.

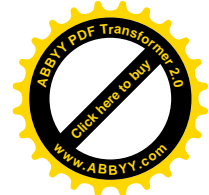
Al hidróxido de sodio se le aumentó el consumo de regenerante en 98 kg lo que permite mayor tiempo de contacto de la solución regenerante con la resina, y así aumentar la capacidad de intercambio entre los iones de la resina y el agua tratada.

Tabla 2.2. Propuesta de cambios en Mayo.

Sustancias	NR Mayo (kg/m ³)	Regenerante Mayo (kg)	Nivel en Tanque dosificador (cm)
H ₂ SO ₄	148	963	25
NaOH	78	490	100

2.9. Conclusiones del capítulo

Se empleó el método tradicional para evaluar la influencia de los factores que intervienen en el proceso de regeneración de resinas para el posterior tratamiento químico de agua.



Se realizaron cálculos para cada intercambiador que relacionan la capacidad útil con el consumo específico y el nivel de regeneración de la resina.



Capítulo 3.

Análisis de los resultados



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se recopilan los resultados de las variables de estudio, con el objetivo de hacer una comparación entre los parámetros de trabajo en el mes de Marzo y los estudiados durante la investigación para el mes de Mayo. Las pruebas experimentales fueron representativas, en un período de un mes se tomaron muestras todos los días cada dos horas, evaluando el comportamiento del proceso de regeneración de la resina y los resultados de los análisis químicos correspondientes.

Durante la etapa de cambios, se refleja el comportamiento real del proceso de regeneración en las instalaciones, teniendo en cuenta los gráficos de los criterios de agotamiento para cada intercambiador y comparando los meses de Marzo y Mayo, se tienen los siguientes resultados:

3.1. Intercambiadores catiónicos

Acidez mineral

Como principal indicador de agotamiento tenemos la acidez mineral, que puede resumirse de la siguiente forma:

En el mes de Marzo los valores de acidez mineral estuvieron variando entre 35 – 40 mg/L (figura 3.1). Se mantuvo un promedio de 35 mg/L, a mediados del mes se presentaron valores máximos de 40 mg/L y a finales de mes se representa un valor mínimo de 25 mg/L, estos valores se consideran como "picos", aunque están dentro del rango normado, por lo que no son representativos.

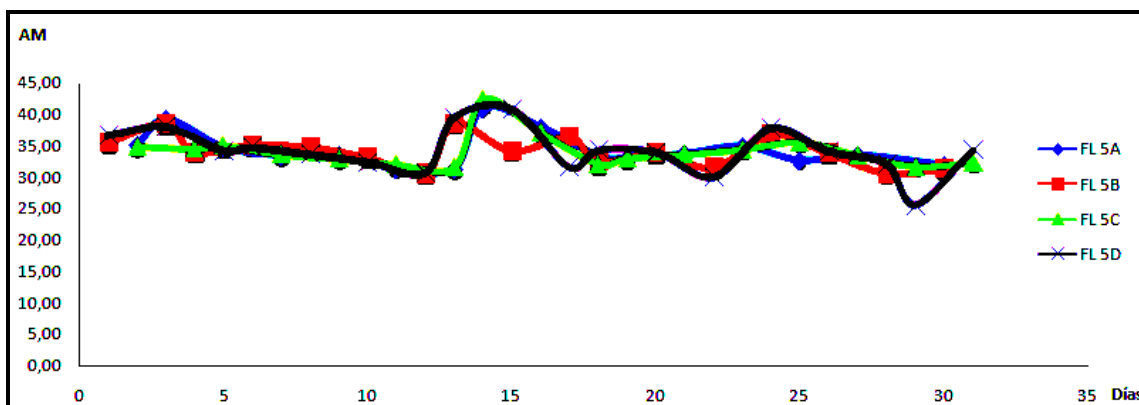




Figura 3.1. Comportamiento de la acidez mineral para filtros catiónicos en Marzo.

En el mes de Mayo los valores son un poco menores, variando entre 25 – 35 mg/L . Esta disminución de acidez se debe al cambio realizado en el nivel de regeneración.

Analizando la figura 3.2 se demuestra un promedio de 29 mg/L , notando que hay una disminución con respecto al mes de Marzo, hay mayor tendencia al aumento de los valores en el transcurso de los días, se muestran diferentes "picos" que se encuentran entre 34 – 38 mg/L , no existe inestabilidad teniendo en cuenta los valores mínimos, se presentaron dos con 24 mg/L . Estos valores se encuentran dentro del rango normado.

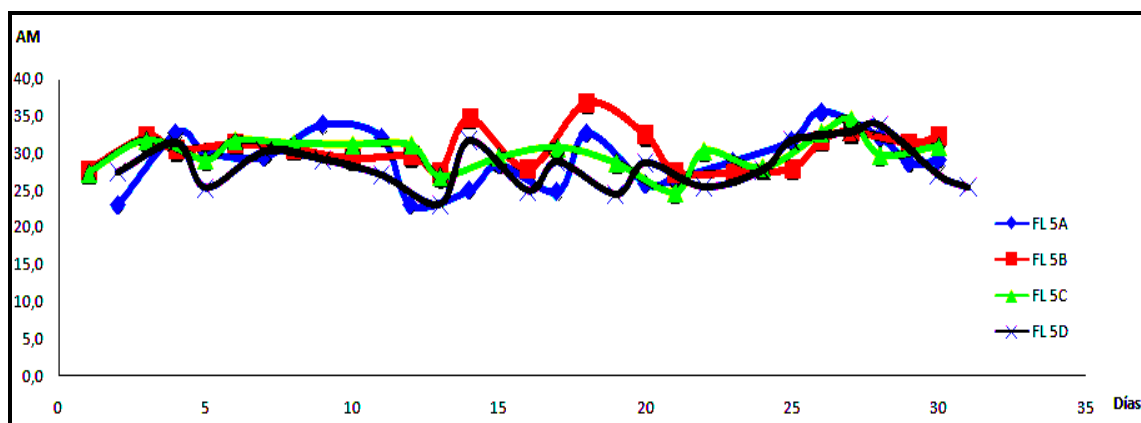


Figura 3.2. Comportamiento de la acidez mineral para filtros catiónicos en Mayo.

Mientras menores sean los valores de acidez mineral, menor será la capacidad de intercambio de la resina, por lo que ante esta situación se recomienda detener el funcionamiento del filtro.

Conductividad

La conductividad es otro de los parámetros controlados durante el funcionamiento de los filtros, en el mes de Marzo la tendencia fue de una disminución de los valores, en cambio para Mayo se mantuvo un comportamiento uniforme durante el mes. Los valores obtenidos con los cambios realizados se mantuvieron dentro del rango.

3.2. Intercambiadores aniónicos

Sílice

En estos filtros se tiene en cuenta como principal parámetro que determina el funcionamiento del filtro, la sílice contenida en el agua.

En el mes de Marzo se comportó muy irregular, presentando puntos incoherentes, con valores mayores de 0,20 mg/L . Estos respectivos "picos" ocurren porque las muestras para determinar el contenido de sílice se toman cada dos horas, no hay un silicómetro instalado en línea que le permita a los operadores saber de forma automática el valor de



agotamiento, para entonces detener el funcionamiento del filtro y evitar que estos elevados valores de sílice en el agua afecten el funcionamiento de las calderas.

En la figura 3.3 se muestra que el valor promedio corresponde a 0,12 mg/L , los valores mínimos se mantuvieron estables con no menos de 0,01 mg/L .

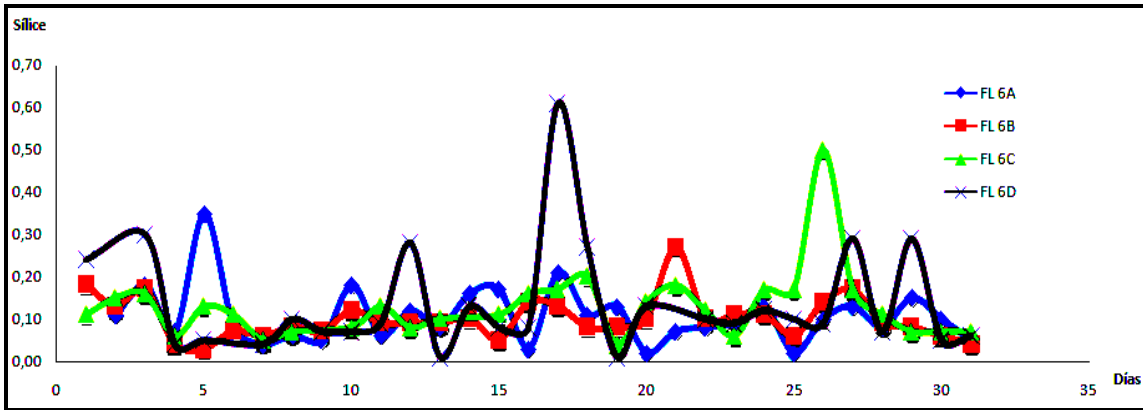


Figura 3.3. Comportamiento de la sílice en los filtros aniónicos en Marzo.

Durante el mes de Mayo se notaron cambios significativos, por lo que se obtuvieron buenos resultados, la sílice se comportó más estable, los valores se mantuvieron en un rango menor de 0,20 mg/L, se presentaron algunos "picos" pero no fuera del valor establecido. Esta explicación se puede comprobar en la siguiente figura (3.4).

Los filtros mantuvieron valores acordes a los admitidos durante el proceso, su valor promedio tuvo una disminución en 0,09 mg/L , facilitando mayor remoción de sílice en este mes, y por tanto se obtiene agua desmineralizada con mejor calidad.

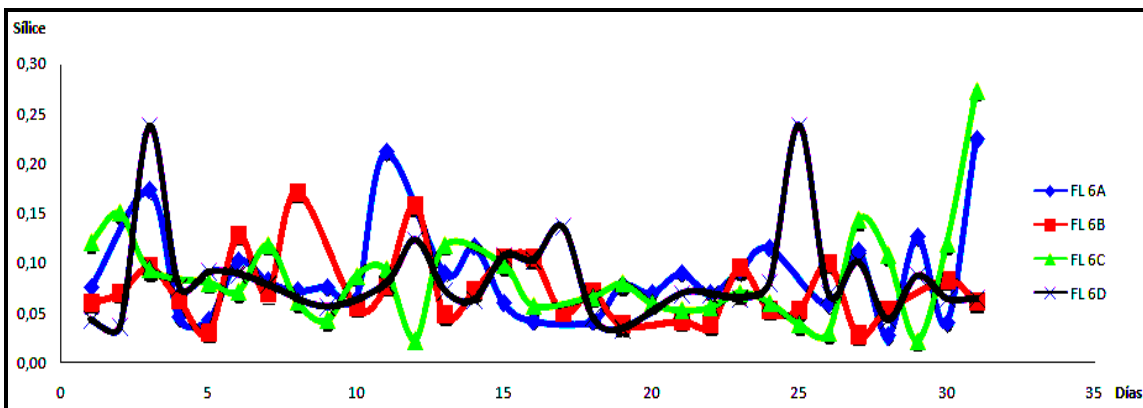


Figura 3. 4. Comportamiento de la sílice en los filtros aniónicos en Mayo.

Potencial de Hidrógeno

Durante los meses de estudio se controló el potencial de hidrógeno, este se mantuvo básico y con la tendencia al aumento entre los meses, como promedio quedan entre 7,8 – 8,1. Se logró una uniformidad de estos valores, por lo que estos no tienen tendencias negativas sobre la calidad del agua tratada.



Alcalinidades parcial y total

Los otros análisis químicos que se le realizan al agua durante su tratamiento son las alcalinidades parcial y total, estos son valores que no presentan variaciones significativas, por lo que no se afectan las operaciones de trabajo en los filtros ni la calidad en el agua. Con estas se determina el contenido de los iones CO_3^- y HCO_3^- en el agua. Los valores de la alcalinidad parcial siempre fueron cero y los de la alcalinidad total se comportaron por debajo de 0,1 mgeqv/L .

Tiempo de trabajo

Con las propuestas realizadas las horas de trabajo de los intercambiadores presentaron diferentes cambios.

Intercambiadores catiónicos

En los filtros catiónicos se notó una ligera disminución entre los dos meses, por lo tanto, se pudo mantener el cambio propuesto y no afectó el trabajo de la instalación.

Se puede decir que la duración de los filtros durante el mes de Marzo tuvo un promedio de 21 h (figura 3.5). Se presentaron dos "picos" de 16 y 14 horas respectivamente durante los días de operación, este resultado pudo estar afectado por el factor humano en el desarrollo del proceso de regeneración.

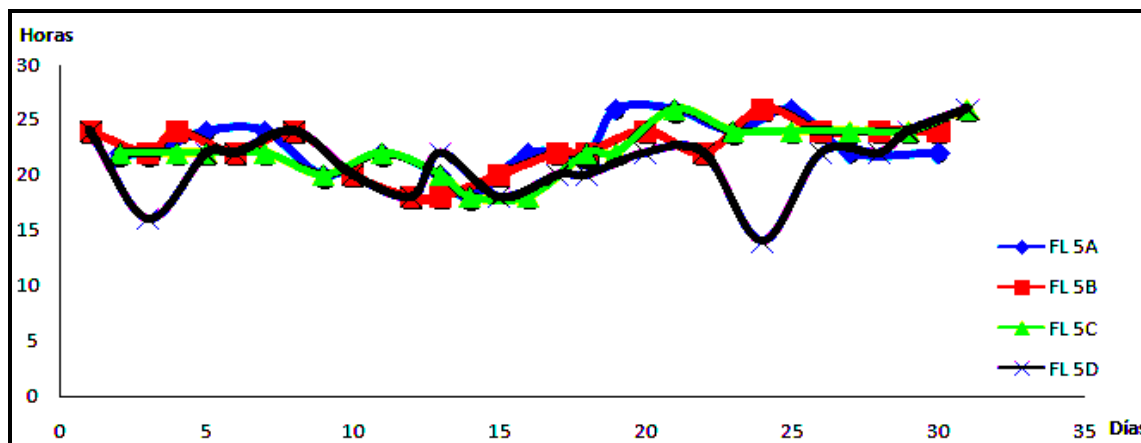


Figura 3. 5. Tiempo de trabajo para filtros catiónicos en Marzo.

El promedio de horas de trabajo en el mes de Mayo fue de 22 horas, como se muestra en la figura 3.6 cada filtro tiene un período de trabajo diferente, no se refleja la uniformidad en el tiempo de trabajo, se tiene una línea de tendencia a la disminución en el tiempo de trabajo.

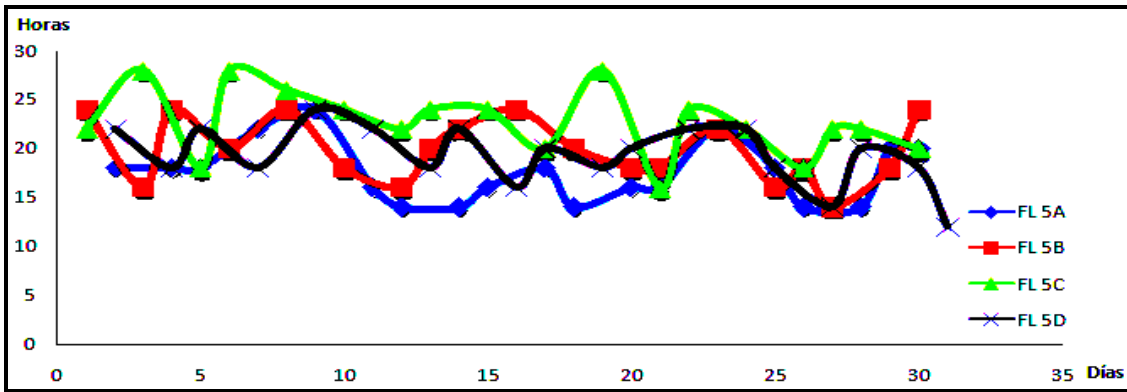


Figura 3. 6. Tiempo de trabajo para filtros catiónicos en Mayo.

Intercambiadores aniónicos

En los filtros aniónicos, durante el mes de investigación se alcanzaron buenos resultados. En Marzo el comportamiento fue de 13 h como promedio, manteniendo "picos" mínimos de 4 h en cinco días. En la figura 3.7 se muestra la relación entre los filtros y el tiempo de trabajo de los mismos. Estos resultados pudieron estar afectados por el factor humano en el desarrollo del proceso de regeneración.

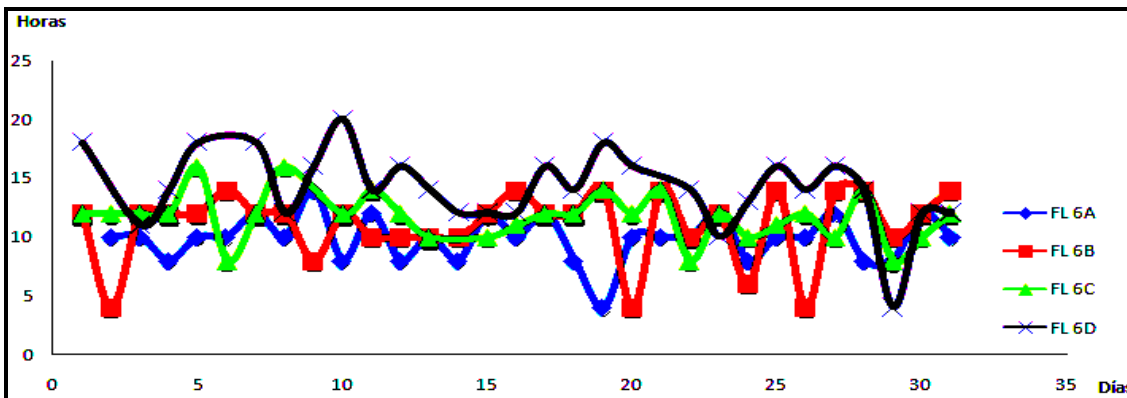


Figura 3.7. Tiempo de trabajo para filtros aniónicos en Marzo.

En el mes de Mayo los resultados fueron favorables con un valor promedio de 12 h , se mantuvo un valor máximo uniforme de dieciséis horas y un mínimo de diez horas, los "picos" fueron de seis horas en dos días.

Durante este mes de estudio se logró uniformidad y estabilidad en el parámetro como se muestra en la figura 3.8, esto justifica el mayor tiempo de intercambio entre la resina y el agua tratada, por lo que se tiene mayor capacidad útil en la resina.

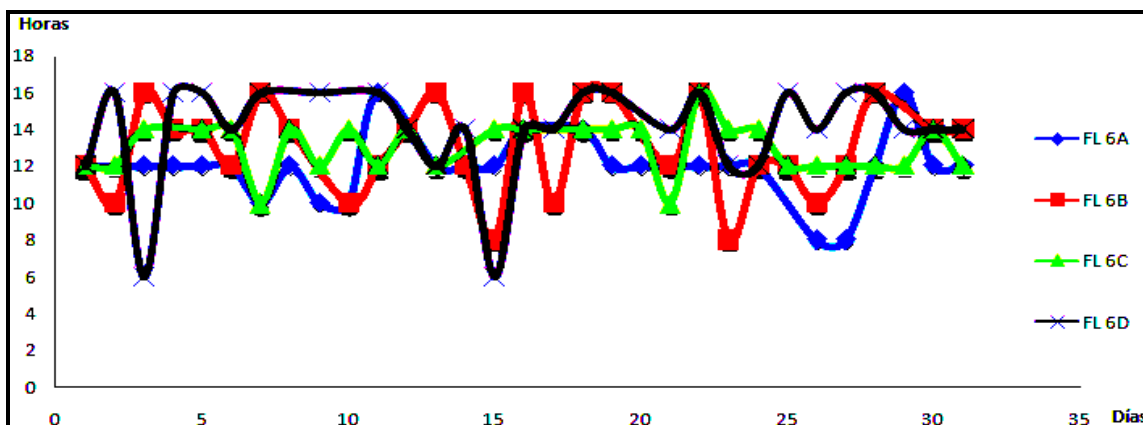


Figura 3.8. Tiempo de trabajo para filtros aniónicos en Mayo.

La disminución en las horas de trabajo de los intercambiadores puede estar influenciado por el incorrecto funcionamiento de los dispositivos internos de los mismos (distribuidores de la solución regenerante), durante la investigación estos no se consideraron. De presentarse este problema, no existe una homogeneización en la distribución de la solución regenerante, por tanto, las resinas no se cargan completamente, tienden a tener menor capacidad de intercambio iónico y el período de trabajo de los filtros disminuye.

3.3. Indicadores técnico económicos

Como indicadores técnico económicos fueron analizados la capacidad útil y el consumo específico. Se fundamentaron los cálculos mediante las ecuaciones correspondientes representadas en el capítulo dos.

3.3.1. Comparación entre la capacidad total y la capacidad útil de la resina

Los filtros tienen un determinado tiempo de trabajo, que puede ser mayor o menor en dependencia de la capacidad de intercambio que presente la resina, esta capacidad se considera como la capacidad útil de la resina, que en mayor grado permite mejores condiciones de trabajo y mejores características de intercambio en la resina.

Teniendo presente que los valores normales de capacidad útil son de 40 a 70 % de la capacidad total, en la figura 3.9 se muestra para los filtros catiónicos, el porcentaje que representa la capacidad útil en comparación con la capacidad total de intercambio de la resina, para los meses de Marzo y Mayo.

Presenta un promedio en Marzo de 41 % y en Mayo de 31 % , en Mayo los valores de la capacidad útil en la resina se mantuvieron por debajo de los logrados en Marzo. Para los filtros 5A y 5B los resultados del mes de Mayo pueden estar influenciados por las condiciones internas de los filtros y por las condiciones en que se encuentra la resina,



por lo que se requiere una revisión de estos elementos. Para los filtros 5C y 5D hay mayor uniformidad, demostrando que sus condiciones técnicas son más favorables y las resinas mantienen su capacidad de intercambio.

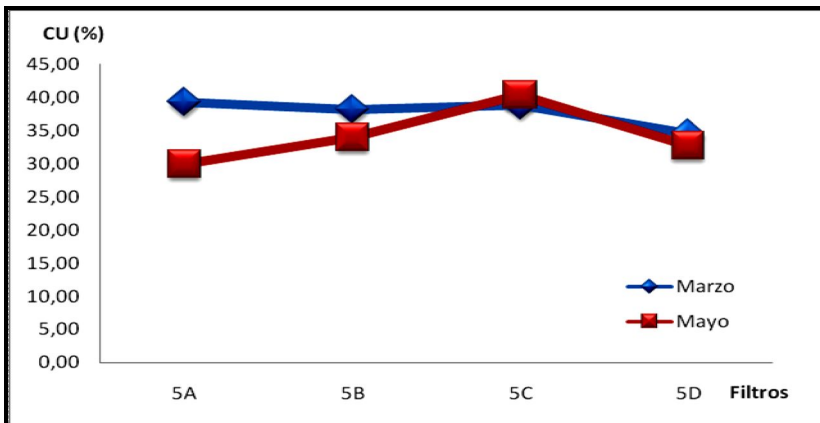


Figura 3.9. Comportamiento de la capacidad útil en los filtros catiónicos.

Analizando la figura 3.10 se puede afirmar que los filtros aniónicos tuvieron un incremento de su capacidad de intercambio. En Marzo presentaron un promedio de 7 % y en Mayo de 10 % . En el mes de Mayo, los filtros 6A, 6B y 6C tuvieron un incremento, con valores mayores del 10 % . En el filtro 6D hay una ligera disminución.

Por lo que se demuestra que el nivel de regeneración escogido aportó mejores resultados en los mismos, el consumo de regenerante y el tiempo de contacto entre la solución regenerante y la resina fueron los necesarios para que estas adquirieran mayor capacidad de intercambio.

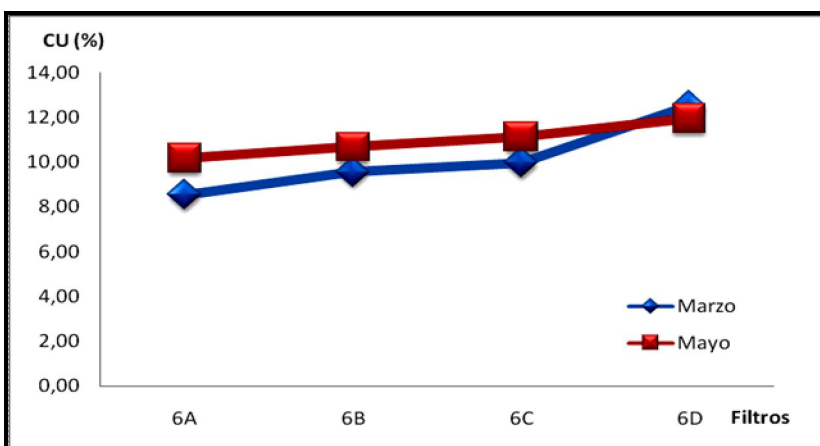


Figura 3.10. Comportamiento de la capacidad útil en los filtros aniónicos.

3.3.2. Consumo específico

Del nivel de regeneración que tenga la resina dependerá su capacidad útil y así mismo del consumo específico de regenerante. Estos indicadores técnico económicos están



directamente relacionados, en la figura 3.11 se describe el consumo específico de regenerante para cada filtro catiónico en los meses de Marzo y Mayo. Se demuestra una disminución en el mes de experimentación de 0,041 kg/eqv , esto es debido a un menor valor de nivel de regeneración, por tanto un menor consumo de regenerante.

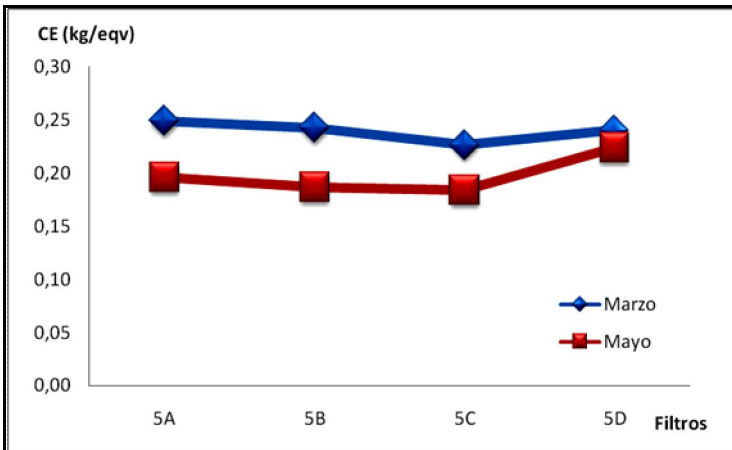


Figura 3.11. Consumo específico de regenerante en los filtros catiónicos.

En la figura 3.12 se grafica el consumo específico de los filtros aniónicos durante los dos meses de estudio. A diferencia de los filtros catiónicos el consumo específico de regenerante se incrementó en 0,024 kg/eqv , debido al aumento del nivel de regeneración. Esto se evidencia en los filtros 6A, 6B y 6C, no siendo así para el filtro 6D, el cual tuvo un comportamiento similar al mes de Marzo, por lo que es necesario la revisión interna del mismo.

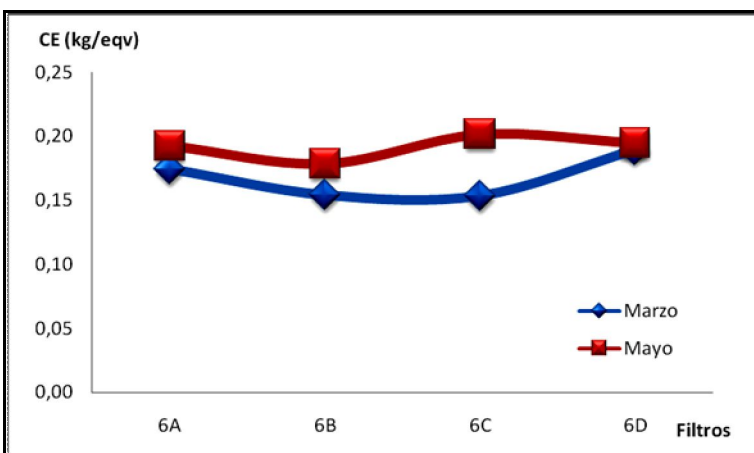


Figura 3.12. Consumo específico de regenerante en los filtros aniónicos.

3.3.3. Indicadores de producción

El objetivo de la planta es obtener un agua desmineralizada para su posterior uso en la CTE, para el suministro a las calderas. Por cada mes se contabiliza el agua que produce la planta para comparar la eficiencia que se logra, mostrándose en la tabla 3.1.



Tabla 3.1. Indicadores de producción.

Indicadores	Marzo	Mayo	Desviación
Agua desmineralizada (m ³ /h)	250,78	252,12	+ 1,34
Agua desmineralizada (m ³)	186 581,76	187 575,36	+ 993,60

3.3.4. Productos químicos consumidos

Durante el mes de Mayo se inició un nuevo período de consumo de productos químicos, ya que se establecieron diferentes valores para cada solución empleada en las regeneraciones de la resina. En la siguiente tabla se muestran los valores de productos químicos consumidos durante los meses de estudio.

Tabla 3.2. Productos químicos consumidos.

Productos	Unidad de medida	Marzo	Mayo	Desviación
H ₂ SO ₄	kg	74 303	76 701	+ 2398
NaOH	kg	48 402	46 788	- 1614

Por cada regeneración se consumió una determinada cantidad de producto, se demuestra que hubo ahorro de NaOH, ya que estos filtros tuvieron mayor tiempo de trabajo. En los intercambiadores catiónicos no se obtuvieron los mismos resultados, sus horas de trabajo fueron similares a Marzo, teniendo mayores regeneraciones y a su vez mayor consumo de regenerante debido a una mayor producción de agua desmineralizada.

3.3.4.1. Gastos para productos químicos

El ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio que se consumen en la planta tienen un precio de 241,82 CUC y 1332,00 CUC por cada tonelada respectivamente, teniendo en cuenta el consumo que aparece en la tabla 3.2 se realiza el cálculo de los gastos para cada mes, los cuales aparecen reflejados en la tabla 3.3. Existe un sobregasto de 579,79 CUC para el ácido sulfúrico y un ahorro de 2293,98 CUC para el hidróxido de sodio, aportando un ahorro total de 1714, 19 CUC .

Tabla 3.3 Gastos para productos químicos.

Productos	Unidad de medida	Marzo	Mayo	Desviación
H ₂ SO ₄	CUC	17 967,95	18 547,84	+ 579,79
NaOH	CUC	68 793,76	66 499,78	- 2293,98



3.4. Diagnóstico ecológico y seguridad industrial

En la planta de Tratamiento Químico de Agua existe un marcado deterioro de la instalación. El sello para la protección química de los pisos se ha perdido, produciéndose la penetración de productos químicos como el ácido sulfúrico e hidróxido de sodio. Los depósitos soterrados para coleccionar las aguas residuales fueron eliminados por el deterioro de la instalación.

Existe afectación del manto freático y ecosistemas marinos, debido a la descarga al medio de aguas residuales de la instalación si tratamiento de neutralización.

Por el funcionamiento continuo de la planta, en la instalación son constantes los ruidos generados por el equipamiento, hecho que resulta perjudicial al ser humano. Las características propias de los procesos industriales se caracterizan por ser altamente contaminantes sonoras del entorno de trabajo, lo que provoca que el personal sufra las consecuencias a tal exposición. Entre las afectaciones más frecuentes se encuentran la sordera y la pérdida momentánea de la audición.

3.4.1. Características de las sustancias

1. Ácido sulfúrico.

Es el compuesto químico que más se produce en el mundo, muy corrosivo. En agua se comporta como un ácido fuerte en su primera disociación, dando el anión hidrogeno sulfato, y como un ácido débil en la segunda, dando el anión sulfato. Reacciona violentamente con agua y compuestos orgánicos con desprendimiento de calor.

Efectos adversos potenciales para la salud:

- Inhalación: produce quemaduras, dificultad respiratoria, tos y sofocación. Altas concentraciones del vapor pueden producir ulceración de nariz y garganta, edema pulmonar, espasmos y hasta la muerte.
- Ingestión: corrosivo, quemaduras severas de boca y garganta, perforación del estómago y esófago, dificultad para comer, náuseas, sed, vómito con sangre y diarrea. En casos severos colapso y muerte.
- Contacto con la piel: quemaduras severas, profundas y dolorosas. Si son extensas pueden llevar a la muerte (shock circulatorio). Los daños dependen de la concentración de la solución y la duración de la exposición.
- Contacto con los ojos: es corrosivo y puede causar severa irritación (enrojecimiento, inflamación y dolor). Soluciones muy concentradas producen



lesiones irreversibles, opacidad total de la córnea y perforación del globo ocular. Puede causar ceguera.

- Efectos crónicos: la repetida exposición a bajas concentraciones puede causar dermatitis. La exposición a altas concentraciones puede causar erosión dental y posibles trastornos respiratorios. El efecto crónico es la generación de cáncer.

2. Hidróxido de sodio.

El hidróxido de sodio es muy corrosivo, cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. Es una base fuerte, en agua se separa en sus iones constitutivos Na^+ y OH^- , provocando disminución en la acidez del agua con la que entra en contacto. Gracias a sustancias ácidas también presentes en los lechos acuosos de manera natural, el hidróxido de sodio se neutraliza y forma sales normalmente no tóxicas.

Efectos adversos potenciales para la salud:

- Inhalación: es inodoro y por tal motivo su olor no brinda una medida de su peligrosidad en altas concentraciones. Exposiciones moderadas cortas ($< 2 \text{ mg/m}^3$) en forma de nieblas, polvo o aerosol, generan irritación de las membranas mucosas de la nariz, garganta y tracto respiratorio. Exposiciones agudas ($> 3 \text{ mg/m}^3$) dan lugar a irritación inmediata del tracto respiratorio, produciendo hinchamiento o espasmos de laringe y generando posteriormente la obstrucción de las vías de aire superiores y asfixia. Puede ocurrir también inflamación y acumulación de fluido en los pulmones.
- Ingestión: de forma instantánea en concentraciones altas o en forma sólida provoca daños severos de tipo corrosivo en los labios, lengua, mucosa oral, esófago y estómago; pudiendo generar perforaciones, hemorragias u obstrucción del tracto gastrointestinal.
- Contacto con la piel: concentraciones mayores al 25 % provoca irritación inmediata, mientras que en el contacto con soluciones de concentraciones menores o iguales al 4 % la irritación no se presenta sino hasta varias horas después si la solución no se ha retirado de la piel o no se ha lavado la zona afectada. En concentraciones altas ($> 50 \%$) por períodos de tiempo de alrededor de 3 min causa quemaduras muy severas y ulceraciones profundas en la piel.
- Contacto con los ojos: se generan irritaciones a casi cualquier nivel de concentración pero el grado de daño no se puede calcular con alguna certeza



sino hasta el transcurso de unas 72 h. La exposición en los ojos puede producir acumulación de fluido y coágulos de vasos sanguíneos de forma difusa o localizada.

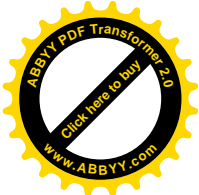
- Efectos crónicos: La exposición prolongada en el aire puede provocar ulceración de las fosas nasales e irritación crónica de la piel.

3.5. Conclusiones del capítulo

Con los resultados experimentales se demostró que la capacidad de intercambio de la resina aumenta. Los resultados de los análisis químicos tuvieron su notable diferencia, los intercambiadores aniónicos tuvieron un mejor comportamiento en cuanto a estos resultados.

Se mantuvo estabilidad en las horas de trabajo de los intercambiadores aniónicos, con un menor consumo de solución regenerante y un aumento de la capacidad útil en la resina.

Los filtros catiónicos trabajaron de forma similar al mes de Marzo.



Conclusiones



CONCLUSIONES

Se estudió el comportamiento del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico, estableciendo nuevos valores en el nivel de regeneración de estas. Para el ácido sulfúrico se experimentó con 148 g/L y con el hidróxido de sodio se escogió 78 g/L. Se realizó la experimentación a escala industrial con los niveles de regeneración propuestos, no incidió negativamente en el tiempo de trabajo de los filtros, manteniéndose la calidad del agua tratada.

Con el cambio realizado en el nivel de regeneración se logra un incremento de la capacidad útil respecto a la capacidad total de intercambio en un 3 % en los filtros aniónicos, y una disminución de un 10 % en los filtros catiónicos. El consumo específico disminuye en 0,041 kg/eqv para los filtros catiónicos y aumenta en 0,024 kg/eqv para los filtros aniónicos.

Fueron calculados los gastos de productos químicos obteniéndose un sobregasto de 579,79 CUC para el ácido sulfúrico y un ahorro de 2 293,98 CUC para el hidróxido de sodio, aportando un ahorro total de 1 714, 19 CUC .

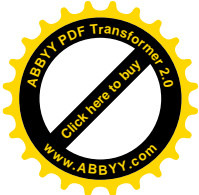


Recomendaciones



RECOMENDACIONES

- ✓ Determinar en posteriores investigaciones el valor óptimo de los productos químicos que intervienen en el proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico de la instalación de Desmineralización.
- ✓ Estudiar bajo diferentes condiciones, la instalación de Suavizamiento de la planta, para comprobar si la cantidad de productos químicos utilizados durante la regeneración son los más racionales.
- ✓ Para que la planta opere con mayor eficiencia, conservar las bombas en buen estado, mantener una en servicio y otra en reserva.
- ✓ Realizar cada mes el mantenimiento interno de los intercambiadores, con el fin de verificar que no hayan sufrido modificaciones.
- ✓ Garantizar los instrumentos de medición necesarios para un correcto funcionamiento de la instalación de la planta.
- ✓ Instalar la instrumentación necesaria para controlar los indicadores de agotamiento en los filtros (AM y SiO_2^{2-}).



Bibliografía

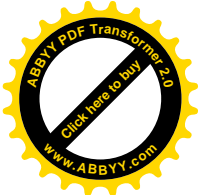


BIBLIOGRAFÍA

- BAUMAN WC, E. J. (1947). Fundamental properties of a synthetic cation exchange resin.
- CARBONO, G. (2004). Hoja de datos de seguridad del producto.
- CARRASCO QUIROZ, C. A. (2007). Tratamiento físico químico de aguas residuales., Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- CATALAN, J. Química del Agua (Editorial Blume Degremont ed.).
- CHEMICAL, P. Manual de aguas I. Jalisco, México: Piciz Chemical. o. Document Number)
- CHEMICAL, P. Manual de aguas II. Jalisco, México: Piciz Chemical. o. Document Number)
- DE GALIANA MINGOT, T. (Ed.) (1988). Ciudad de la Habana.
- EARL, O. S., AKIM DOBERMANN. (2000). Synthetic Ion exchange resins. Soil and Environmental Studies.
- EMPRESA CHE GUEVARA, E. Gráfico de Control Analítico y de Muestreo. Moa - Holguín: Unidad Básica de Servicios Planta Termoenergética (Área Tratamiento Químico de Agua).o. Document Number)
- EMPRESA CHE GUEVARA, E. (1985). Manual de operaciones. Planta Desmineralizadora de agua. Moa: Combinado Minero Metalúrgico Cmdt. Ernesto Che Guevara. o. Document Number)
- GONZALEZ, F., & PEREZ, J. T. TRANSFERENCIA DE MASA II. INTERCAMBIO IONICO. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- GREEN DON, W., & MALONEY, J. O. PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK. Seven edition.
- HERRERA VASCONCELOS, T., CALERO MARTÍN, E., TORRES THILLS, I., & ZAYAS ROQUE, M. E. Influencia del nivel de regeneración y de la carga específica de agotamiento sobre la capacidad útil de la resina WOFATIT KS-10, en el tratamiento de agua.



- INFANTE HEREDIA, M., LAY SAYUT, M., & GARCÍA SABOURÍN, R. (1984). Organización del tratamiento de agua y régimen de agua de la Termoeléctrica de la fábrica de Níquel de Punta Gorda. Cálculos tecnológicos de la estación de desmineralización., Moa.
- KEMMER, J. M., & CALLION, J. M. Manual del Agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.
- LARIA PIEDRA, C., ARLA MARTÍNEZ, E., HERNÁNDEZ DORTA, F. J., & MARTÍNEZ PEÑA, O. (1999). "Clarificación de las aguas residuales en los procesos siderúrgicos".
- LIPESA. Química del agua. o. Document Number)
- MARTICORENA COLLAZO, J. (1962). La desmineralización, un paso de avance en el tratamiento de agua para usos industriales.
- MARTICORENA COLLAZO, J. (1975). MANUAL TÉCNICO para operadores de tratamiento DE AGUAS. La Habana: Instituto Cubano del Libro.
- MASKEW, G., CHARLES, J., & OKUN, D. (1987). "Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales".
- MATOS GARCIA, L., & PALACIO RAMOS, E. I. (1983). Estudios sobre filtros de antracita para agua de suministro a la población., Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.
- MILACROM MEXICANA SALES, S. A. D. C. V. (2004). Efectos de las impurezas del agua en fluidos de trabajo de metales base-agua. . Querétaro. México: División CIMCOOL. o. Document Number)
- NEVÁREZ RIVADENEIRA, M. E. (2009). Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de refinería estatal., Escuela de ingeniería química, Riobamba. Ecuador.
- NORDEL, E. (1987). Tratamiento de agua para la industria y otros usos. (Edición Revolucionaria ed. Vol. I, II). La Habana.
- ROHM, & HASS. Folletos Técnicos de resinas de intercambio iónico. o. Document Number)
- SCHUMAKER, M. F. (2000). Boundary conditions and trajectories of diffusion processes.
- WARREN, E., & SCHWARTH. (2000). Enhanced-diffusion chromatographic sorbent.



Nomenclatura



NOMENCLATURA

AM: Acidez mineral.	Q: Flujo de agua.
HCl: Ácido clorhídrico.	F: Flúor.
H ₂ SO ₄ : Ácido sulfúrico.	° C: Grado Celsius.
H ₂ SO ₃ : Ácido sulfuroso.	g: Gramo.
AlcM: Alcalinidad total.	g/L: Gramo por litro.
AlcP: Alcalinidad parcial.	H ⁺ : Hidrógeno.
H ₂ O: Agua.	OH ⁻ : Hidróxido.
HCO ₃ ²⁻ : Bicarbonato.	NaOH: Hidróxido de Sodio.
Br ⁻ : Bromo.	Fe ²⁺ : Hierro.
Cd ²⁺ : Cadmio.	h: Hora.
Ca ²⁺ : Calcio.	kg: Kilogramo.
CO ₃ ⁻ : Carbonato.	m reg.: Masa de regenerante.
CaCO ₃ : Carbonato de calcio.	kg/eqv: Kilogramo por equivalente.
Na ₂ CO ₃ : Carbonato de sodio.	kg/m ³ : Kilogramo por metro cúbico.
CU: Capacidad Útil.	L: Litro.
CT: Capacidad total.	Mg ²⁺ : Magnesio.
cm: Centímetro.	Hg ²⁺ : Mercurio.
CTE: Central Termoeléctrica.	m ³ : metro cúbico.
Cl ⁻ : Cloro.	M: Volumen de agua tratada.
NaCl: Cloruro de sodio.	m ³ /h: Metro cúbico por hora.
Cu ²⁺ : Cobre.	μS/cm: Micro Siemens por centímetro.
μ: Conductividad.	mg/L: Miligramo por Litro.
CE: Consumo Específico.	mgeqv: Miligramo equivalente.
CUC: Cubano convertible.	mgeqv/L: Miligramo equivalente por Litro.
CO ₂ : Dióxido de carbono.	mgeqv/m ³ : Miligramo equivalente por metro cúbico.
eqv. abs.: Equivalentes absorbidos.	mL: Mililitro.
eqv/m ³ : Equivalente por metro cúbico.	
eqv/L: Equivalente por litro.	



mm: Milímetro.

min: Minuto.

Ni²⁺: Níquel.

NO₃⁻: Nitrato.

NaNO₃: Nitrato de sodio.

NO₂⁻: Nitrito.

NR: Nivel de Regeneración.

N: Normalidad.

Ag⁺: Plata.

Pb²⁺: Plomo.

%: Porcentaje.

R: Radical complejo de la resina.

S: Salinidad.

SiO₃²⁻: Silicato.

Na₂SiO₃: Silicato de sodio.

SiO₂²⁻: Sílice.

Na⁺: Sodio.

SO₄²⁻: Sulfato.

CaSO₄: Sulfato de calcio.

MgSO₄: Sulfato de magnesio.

Na₂SO₄: Sulfato de sodio.

K₂SO₄: Sulfato de potasio.

t: Tiempo de trabajo.

TPA: Tratamiento Primario Avanzado.

K⁺: Potasio.

V.R: Volumen de resina.

I⁻: Yodo.

Zn²⁺: Zinc.

