

UNIVERSIDAD DE MATANZAS

"CAMILO CIENFUEGOS"



FACULTAD DE INGENIERÍAS

TRABAJO DE DIPLOMA

**TÍTULO: TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA GENERACIÓN
DE VAPOR EN LA UNIVERSIDAD DE MATANZAS
CAMILO CIENFUEGOS.**

Diplomante: Duniesky Pérez Acosta

Tutor: Dra. Juana Zoila Junco Horta

Matanzas 2011

Nota de aceptación.

Presidente del tribunal.

Tribunal.

Tribunal.

Duniesky Pérez Acosta

Matanzas, 20 de junio 2011.

Pensamiento.

“En la ciencia no hay un amplio camino trillado, y podrá alcanzar sus cimas resplandecientes todo aquel que sin espantarse ante el cansancio, la escale por caminos empedrados”.

Carlos Marx.

Dedicatoria.

A mi papá, mamá y mis abuelos.

A mis hermanos.

A la memoria de Teresita Rodríguez Nogueira.

Agradecimientos.

Agradezco a la Revolución por darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria.

.A mi tutora la Dra. Juana Zoila que ha dado lo mejor de sí para la realización de este trabajo.

A mis compañeros de grupo Q-51 por el tiempo que pasamos juntos, unidos y apoyándonos mutuamente unos a otros.

A mi familia que me ha estimulado y apoyado en todo este tiempo.

A todos los profesores de la facultad de ingeniería Química que se dedicaron a enseñarnos y a darnos lo mejor de sí con tanto amor.

Declaración de autoridad.

Yo, Duniesky Pérez Acosta, declaro ser el único autor de este trabajo de diploma y autorizo a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” a darle el uso que considere necesario al mismo.

Resumen

La presente tesis se realiza en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos específicamente en el generador de vapor en la cual se estudia la calidad del agua de abasto a la universidad para su empleo en la generación de vapor y la del agua tratada de las unidades de intercambio iónico de dicha instalación. Se evaluó además dos alternativas de utilización de regenerantes a través de un diseño experimental dada las dificultades de carencia en ocasiones del producto oficial a emplear en la regeneración. Se utiliza el paquete estadístico *Statgraphic* para el procesamiento de los resultados. Se realizan otras experimentaciones que tributan a la determinación de la capacidad específica de la resina que se emplea, por no contar con dicha información, lo que contribuye a lograr un mejor control y efectividad del sistema de tratamiento y la calidad del agua de alimentación al generador. Como resultados se obtiene la caracterización del agua de abasto a la universidad en términos de los parámetros dureza total, dureza permanente, dureza de calcio, alcalinidad total, pH y conductividad. Se logra además dos nuevas alternativas de regenerantes que tributan a lograr la sistematicidad del funcionamiento del generador aunque existan problemas de abastecimiento del material regenerante.

Summary

This thesis is performed at the University of Matanzas Camilo Cienfuegos specifically in the steam generator in which studying water quality supply to the university for use in generating steam and treated water exchange units ion of the facility. It also evaluated two alternative use of regenerating through a given experimental design difficulties sometimes lack of official product to be used in the regeneration..

Statistical package was used for processing Statgraphic results. Perform other experiments that taxed the determination of the specific capacity of the resin used, not having this information, which contributes to better control and effectiveness of the treatment and quality of water supply to the generator. The result is the characterization of the water supply to the university in terms of the parameters total hardness, permanent hardness, calcium hardness, total alkalinity, pH and conductivity. It also manages two new options for regenerating taxed to achieve the systematic operation of the generator but there are problems of regenerating material supply.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
Capítulo I: Análisis bibliográfico.....	4
1.1 Conceptos básicos de agua de aporte a calderas.	4
1.2 Sistemas de tratamientos para lograr la calidad establecida según su uso. Tratamiento de aguas naturales.	4
1.3 Tratamiento de agua de alimentación de calderas.....	6
1.3.1 Parámetros a tener en cuenta en el tratamiento de agua.	6
1.4 Requerimientos del agua de alimentación a caldera.....	7
1.4.1 Agua de alimentación de Plantas de Energía (Calderas).	9
1.4.2 Aguas de enfriamiento.	10
1.4.3 Aguas para generación de vapor.	10
1.4.4 Aguas de calentamiento.	10
1.5 Equipos de tratamiento de agua.	11
1.5.1 Intercambio iónico (ciclo sodio).....	11
1.5.2 Intercambio Iónico. Suavizadores de agua.	14
1.5.3 Suavizador de agua.....	18
1.6 Operación de sistema de columnas.	22
1.7 Preparación de la Salmuera.....	24
1.8 Calidad del agua en función de su uso.	24
1.9 Problemas derivados de la utilización del agua en calderas.....	25
Capítulo 2 Capítulo 2 Materiales y métodos.....	30
2.1 Caracterización del agua de entrada al generador.	30
2.2 Análisis estadístico.....	33
2.3 Diseño de experimento.	33
2.4 Regeneración de la resina	35
Capítulo 3 : Análisis de resultado.....	37
3.1 Resultado del análisis de las características de agua de abasto de la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.	37

3.2 Resultados del análisis del agua que entra al generador de vapor.....	42
3.3 Resultado del análisis estadístico.....	43
3.4 Resultado del tipo de regenerante más factible para la regeneración de la resina.....	47
3.5 Resultado del diseño de experimentos.....	48
Conclusiones.....	49
Recomendaciones.....	50
Bibliografía.....	51
Anexo 1. Requisitos máximos para el agua de consumo humano según la	1

Introducción.

El agua es el medio donde se originó la vida y en la cual evolucionaron de formas simples, las plantas y los animales, gracias a ella, se mantiene el funcionamiento de los ecosistemas que contribuyen a realzar la riqueza estética del paisaje en el planeta. Para el hombre, a lo largo de la historia de la humanidad, el agua ha tenido un valor económico, ecológico, cultural e intrínseco como un recurso que brinda diversos servicios. Así, la necesidad y demanda de agua ha sido una fuerza que ha impulsado el desarrollo social, económico y cultural de las sociedades humanas.

No es una exageración decir que si el agua enfrenta una crisis, ello también repercutirá en el desarrollo de la humanidad. Hoy en diversos foros mundiales se ha reconocido que se confronta una crisis que se manifiesta a través de la gobernabilidad deficiente los recursos hídricos.

El agua es probablemente el único recurso natural que se relaciona con todos los aspectos de la civilización humana, con la agricultura, con el desarrollo industrial y con la asignación de valores culturales y religiosos. Para los pueblos del mundo ha sido fundamental conocer el ciclo y régimen hidrológico de una región como una condición vital para realizar cualquier actividad relacionada con el aprovechamiento de los recursos de agua.

Es un componente fundamental para la salud y el bienestar de todas las formas de vida. Todos los seres vivos dependen de ella en igual medida. Así, por ejemplo, el cuerpo humano contiene en promedio casi 50 litros de agua y para llevar a cabo sus funciones vitales debe reemplazar diariamente alrededor de 3 litros del total. A nivel global, el clima se relaciona directamente con la dinámica del agua que actúa como un gran termostato climático a través del efecto invernadero, permitiendo regular la temperatura del planeta. Esta condición favoreció la evolución de los sistemas ecológicos responsables de mantener la biodiversidad.

Los procesos de urbanización de los últimos años han originado un déficit en la infraestructura relacionada con el agua para satisfacer las necesidades de las ciudades donde se concentra la población humana. De acuerdo a un estudio de la

Organización de las Naciones Unidas (ONU), la población de América Latina y el Caribe aumentó en un 74% en los últimos 30 años. De continuar esta tendencia, los consumidores de agua urbanos, domésticos e industriales, se enfrentarán a serios problemas de abastecimiento, tanto por el incremento en la demanda, como por la calidad del suministro. Aunque los usuarios de agua en el medio rural tienden a reducirse, en parte, como resultado del proceso de urbanización en el orbe, su importancia en relación con los problemas de pobreza y padecimientos de origen hídrico requiere de una atención sostenida.(PNUMA/ORPALC,2005).

El agua en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos aunque no siempre se utiliza adecuadamente ya que se desperdicia mucho por salideros y otras deficiencias, tiene gran utilidad. Entre sus funciones están:

- En la vidas de los becados.
- En el comedor para la cocción de los alimentos.
- En la limpieza.
- Para ser tratada para el generador de vapor.

Este último uso del agua de ser tratada para su uso en el generador de vapor en dicha instalación tiene como principal objetivo generar vapor para la cocción de los alimentos, sin embargo el agua no es tratada debidamente por lo que se requiere hacer un análisis profundo de esta situación, para solucionar dicha problema.

Por lo planteado anteriormente se define como:

Problema de investigación:

El agua empleada en la generación de vapor no cumple los requisitos de calidad establecidos.

Hipótesis:

Si se evalúan diferentes alternativas para la regeneración de las unidades intercambiadoras de tratamiento del agua de alimentación al generador, podrá garantizarse la calidad del agua requerida para un buen funcionamiento del mismo.

Teniendo en cuenta todo lo planteado se define como

Objetivo:

Identificar variantes de disoluciones regenerantes de la resina intercambiadora del ciclo sodio que garanticen el buen funcionamiento del generador de vapor.

Objetivos específicos:

- Analizar las características del agua de alimentación al generador de vapor en términos de dureza.
- Aplicar la operación de regeneración de la resina intercambiadora del ciclo sodio a partir de diferentes disoluciones regenerantes.

Capítulo I: Análisis bibliográfico.

1.1 Conceptos básicos de agua de aporte a calderas.

El agua se encuentra en la naturaleza y va acompañada de diversas sales y gases en disolución.

Según las sustancia que la acompañan, podría considerarse las mismas en dos grandes grupos: sólidos disueltos y sólidos en suspensión, esto lo constituyen los minerales finamente divididos, como las arcillas y los restos de organismos vegetales o animales; y la cantidad de sustancias suspendidas, que son mayores en aguas turbulentas que en aguas quietas y de poco movimiento. (Ángel, 2005)

Es importante destacar, además de lo descrito, que los residuos que las industrias disponen a los cursos fluviales también afectan la calidad de las aguas.

Como parte de los componentes disueltos en el agua se encuentran las sustancias orgánicas, las sales minerales, los gases disueltos, las sales minerales y la sílice, aunque esta también suele aparecer como componentes en suspensión en forma de finísimas partículas o coloide. (Ángel, 2005)

1.2 Sistemas de tratamientos para lograr la calidad establecida según su uso. Tratamiento de aguas naturales.

Las aguas naturales deberán recibir en la mayoría de los casos un tratamiento previo a su utilización. El mismo dependerá de dos factores fundamentales:

1-Calidad del agua.

2-Empleo de la misma.

Para ello existe una gran variedad de operaciones, las que empleadas individualmente o en combinación suelen dar los resultados deseados. Estas operaciones suelen ser: tratamientos físicos, tratamientos físico-químicos o tratamientos químicos. (Betancourt, 2006)

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

Operaciones más empleadas:

- Cribado.
- Precloración.
- Sedimentación libre.
- Aireación.
- Ablandamiento, coagulación, floculación y filtración.
- Postcloración.
- Sobrecloración.
- Adsorción en carbón activo.
- Tratamientos químicos especiales.
- Desalinización.
- Intercambio iónico.

Por supuesto que no todas estas operaciones se tienen que llevar a cabo con todas las aguas, aunque en ciertos casos pudiera ser así. En las plantas industriales sólo se incluyen aquellas que están justificadas. (Rodríguez, 2000).

Tipos de plantas:

- Plantas potabilizadoras
- Plantas de ablandamiento.

Las plantas de ablandamiento son muy comunes en todas las industrias; su objetivo es disminuir parcial y casi totalmente la dureza del agua para su empleo posterior y así evitar o reducir las incrustaciones en equipos y tuberías. (Cordero, 1987)

Los procesos empleados son los de precipitaciones químicas e intercambio iónico, estos últimos utilizados fundamentalmente para el tratamiento del agua de alimentación de las calderas.

1.3 Tratamiento de agua de alimentación de calderas.

El tratamiento del agua de una caldera de vapor o agua caliente es fundamental para asegurar una vida útil larga, libre de problemas operacionales, reparaciones de importancia y accidentes. (Sait, 1997)

El objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, para asegurar la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera.

El aseguramiento de la calidad del agua de alimentación y agua de la caldera se consigue cumpliendo con los requerimientos de las normas, que definen los límites de los parámetros involucrados en el tratamiento del agua.

1.3.1 Parámetros a tener en cuenta en el tratamiento de agua.

Los principales parámetros involucrados en el tratamiento del agua de una caldera, son los siguientes:

- **pH.** El pH representa las características ácidas o alcalinas del agua, por lo que su control es esencial para prevenir problemas de corrosión (bajo pH) y depósitos (alto pH).
- **Dureza.** La dureza del agua cuantifica principalmente la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.
- **Oxígeno.** El oxígeno presente en el agua favorece la corrosión de los componentes metálicos de una caldera. La presión y temperatura aumentan la velocidad con que se produce la corrosión.
- **Hierro y cobre.** El hierro y el cobre forman depósitos que deterioran la transferencia de calor. Se pueden utilizar filtros para remover estas sustancias.
- **Dióxido de carbono.** El dióxido de carbono, al igual que el oxígeno, favorecen la corrosión. Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de ranuras y no de tubérculos como los resultantes de la corrosión por oxígeno.

La corrosión en las líneas de retorno de condensado generalmente es causada por el dióxido de carbono. El CO_2 (g) se disuelve en agua (condensado), produciendo ácido carbónico. La corrosión causada por el ácido carbónico ocurrirá bajo el nivel del agua y puede ser identificada por las ranuras o canales que se forman en el metal.

- **Aceite.** El aceite favorece la formación de espuma y como consecuencia el arrastre al vapor.
- **Fosfato.** El fosfato se utiliza para controlar el pH y dar protección contra la dureza.
- **Sólidos disueltos.** El parámetro sólidos disueltos hace referencia a la cantidad de sólidos (impurezas) disueltas en el agua.
- **Sólidos en suspensión.** Los sólidos en suspensión representan la cantidad de sólidos (impurezas) presentes en suspensión (no disueltas) en el agua.
- **Secuestrantes de oxígeno.** Los secuestrantes de oxígeno corresponden a productos químicos (sulfito, hidrazina, hidroquinona, entre otros) utilizados para remover el oxígeno residual del agua.
- **Sílice.** La sílice presente en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio).
- **Alcalinidad.** Representa la cantidad de carbonatos, hidrogenocarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua. La alcalinidad del agua de alimentación es importante, ya que, representa una fuente potencial de depósitos.
- **Conductividad.** La conductividad del agua permite controlar la cantidad de sales (iones) disueltas en el agua. (Betancourt,2006)

1.4 Requerimientos del agua de alimentación a caldera.

Sobre al base de las recomendaciones de la Norma Británica BS – 2486, la ABMA (*American Boiler Manufacturing Association*) y el TÜV, se han preparado las siguientes tablas que muestran los requerimientos que deberá satisfacer el agua de

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

alimentación de una caldera para prevenir incrustaciones y corrosión en calderas de baja presión (hasta 10 bar.). Las tablas 1y 2 reportan esos valores.

Tabla 1.1: Requerimientos agua alimentación calderas vapor según BS 2486.

PARÁMETRO	VALOR REQUERIDO
Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido total de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25 °C	8.5 – 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Fuente: Norma Británica BS-2486

Tabla 1.2: Requerimientos agua caldera según BS 2486.

PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO
pH a 25 °C	10.5 - 11,8
Alcalinidad Total CaCO3	< 700 ppm
Alcalinidad Cáustica	> 350 ppm
Secuestrantes de Oxígeno:	
□ Sulfito de Sodio	30 – 70 ppm
□ Hidrazina	0.1 – 10 ppm
□ Taninos	120 – 180 ppm
□ Dietilhidroxilamina	0.1 – 1.0 ppm (en agua alimentación)
Fosfato Na3PO4	30 - 60 mg/l
Hierro	< 3.0 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad	< 7000 uS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Fuente: Norma Británica BS- 2486

1.4.1 Agua de alimentación de Plantas de Energía (Calderas).

Controlar los niveles de gas en los sistemas de agua de alimentación de plantas de energía y calderas es fundamental para el funcionamiento de la planta. Es importante extraer tanto el CO₂ como el O₂ del agua. Ambos gases son corrosivos y pueden tener un impacto negativo en el rendimiento de la caldera, corroyendo los metales con los que tienen contacto con el agua de alimentación de la caldera. Históricamente, la inyección de sustancias químicas, las torres de vacío y los desaireadores se utilizan para extraer el oxígeno y el dióxido de carbono del agua de alimentación de la caldera. Sin embargo, los contactores de membrana *Liqui-Cel* ofrecen muchas ventajas con respecto a estas tecnologías obsoletas, y actualmente muchas plantas escogen los sistemas de membrana debido a que son económicos y compactos. (McGoman, 1987)

La inyección de sustancias químicas, utilizada con frecuencia en el mantenimiento de calderas, genera un exceso de depósitos en las superficies del metal. También es necesario manipular las sustancias químicas, lo que constituye un riesgo potencial para la salud de los empleados. A medida que se acumulan los depósitos de sustancias químicas en las superficies de la caldera, esta debe detenerse y limpiarse en un proceso conocido como purga. La frecuencia de los períodos de purga aumenta si se inyectan sustancias químicas al agua de alimentación. A medida que aumentan las purgas, también lo hacen los costos operativos debido a que ellas generan una pérdida de agua y de calor en el sistema que se debe reestablecer una vez concluida la purga.

Los contactores de membrana resultan muy atractivos para muchas industrias que utilizan calderas para generar energía. Los contactores de membrana tienen una superficie 10 veces mayor comparada con las torres de vacío y sistemas de tiro forzado, lo que significa que son muy pequeños y compactos, y que se pueden instalar en interiores. La instalación en interiores cerca de la caldera requiere menos tuberías, y su costo es menor. Los contactores de membrana pueden funcionar en línea y bajo presión. Debido a que aún hay presión positiva en la salida de un sistema de membrana, las bombas de represurización también se pueden aliviar.

El control de la corrosión en las industrias de agua de alimentación de caldera y de energía también es una etapa muy importante para proteger las tuberías y los equipos involucrados en cualquier proceso.

1.4.2 Aguas de enfriamiento.

Las aguas de enfriamiento que se emplearán una sola vez y después serán desechadas deberán estar libres de sólidos suspendidos que puedan depositarse en el sistema y causar tupiciones, así como de contaminación apreciable con organismos vivos; es difícil, no obstante, establecer límites cuantitativos generales; sin embargo, sí cabe establecer que cualquier tratamiento que se emplee deberá ser muy económico, dado los grandes volúmenes que deberán manejarse.

Algunas especificaciones de carácter general plantean que la turbiedad no debe ser superior a 50 unidades, el hierro y el manganeso en conjunto inferior a 0.5mg.dm^{-3} y los iones sulfatos (como H_2S) menos de 5mg.dm^{-3} ; estos valores se pueden aplicar también a sistemas abiertos con recirculación.

1.4.3 Aguas para generación de vapor.

En el caso de aguas para calderas existen normas y valores recomendados en dependencia de la presión de trabajo.

1.4.4 Aguas de calentamiento.

Existe actualmente la tendencia a producir, en lugar de vapor, agua caliente a una presión superior a la atmosférica. Esta alternativa parece ser provechosa cuando se trata de industrias grandes, pues los diámetros de tubería requeridos son inferiores a los necesarios para el vapor, comúnmente se produce agua entre $(120-220)^\circ\text{C}$ a presiones entre $(0.2-2) \text{Mpa}$ $(2-10) \text{atm}$; esta agua se transforma en vapor a baja presión o agua a menor temperatura en los intercambiadores de calor.

Los requerimientos de esta aguas se reducen a mantener un bajo contenido de sólidos suspendidos en el sistema lo que permite evitar trastornos en los equipos de bombeo siempre que no existan fugas, escapes, salideros, entre otros, determinan que como promedio el sistema pierda un volumen completo de agua durante un mes

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

de trabajo; de ser esto así requiere mantener un control de la corrosión con cromato de sodio entre (500-2000) mg.dm^{-3} , nitrato de sodio (2500 mg.dm^{-3}),o sulfito de sodio(50-100) mg.dm^{-3} .

A medida que la presión de trabajo del sistema aumente (1.5Mpa) será necesario utilizar un agua completamente desionizada y desaireada para la alimentación del sistema.

El agua del sistema deberá mantenerse en un valor de pH mínimo de 9.5, una concentración de sulfito de sodio entre (50-100) mg.dm^{-3} y una concentración de iones fosfato entre (30-60) mg.dm^{-3} .

1.5 Equipos de tratamiento de agua.

En la figura 1 se muestran los equipos que intervienen en el tratamiento de agua de una planta térmica.

En la misma se muestran suavizadores, bombas dosificadoras y un degasificador con su respectivo estanque de almacenamiento de agua.

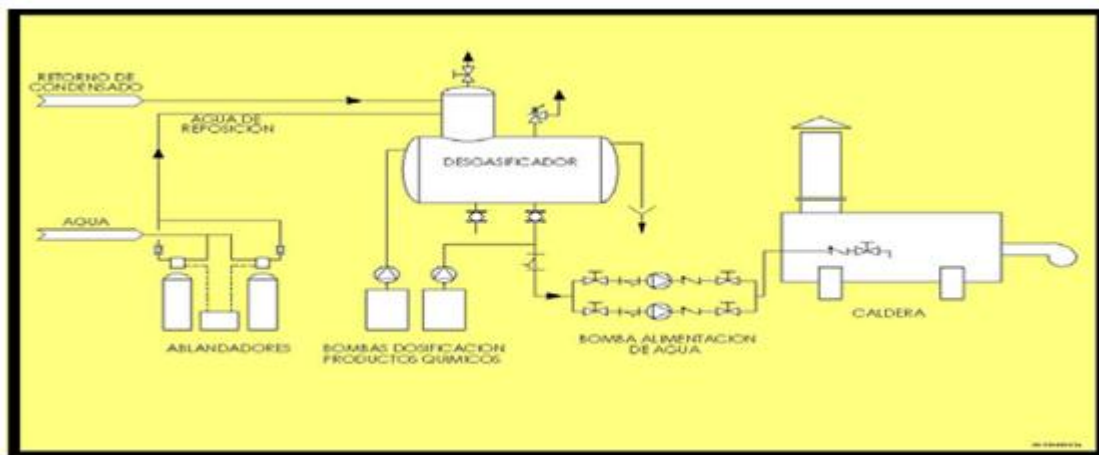


Figura 1.1: Equipos de tratamiento de agua para calderas.

1.5.1 Intercambio iónico (ciclo sodio).

El intercambio iónico consiste en sustituir los iones presentes en una muestra de agua por los iones de la resina intercambiadora. Una resina de intercambio iónico es un polímero sintético, el cual contiene iones que puede intercambiar con los iones

presentes en el agua o en las disoluciones que se ponen en contacto con ellos (Herrera, 2001). La figura 2 presenta una imagen representativa de una resina.



Figura 1.2: Representación de la resina catiónica fuerte.

Independientemente de su naturaleza, todas las sustancias intercambiadoras que se utilizan en ciclo Na⁺, están constituidas por una molécula compleja y de una naturaleza tal que resulta insoluble, química y físicamente estable y permeable a la difusión de los iones contenidos en el agua. Unida a esta molécula, se encuentra una gran cantidad de grupos intercambiables, en este caso en forma de Na⁺.

La reacción anterior constituye la reacción fundamental que se produce en el suavizamiento de agua, mediante intercambio iónico con resinas de este ciclo.

En el caso de las resinas del ciclo sodio el intercambio se realiza por captación de los iones calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺) presentes en el agua por los iones sodio (Na⁺) de la resina, a través de una reacción química entre el agua y la resina intercambiadora.

Cuando la resina ha perdido su capacidad de intercambiar iones, se dice que se ha agotado y entonces hay que regenerarla con una disolución de cloruro de sodio. La resina además de regenerarse, debe contralavarse (para eliminar la suciedad y descompactarla) y debe enjuagarse (para arrastrar el regenerante remanente) (Herrera, 2001). En la figura 3 se muestra un ejemplo de instalación de intercambio iónico.

Suavización

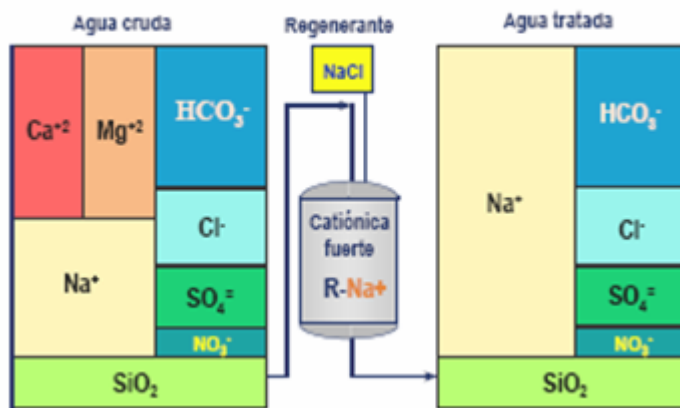


Figura 1.3: Esquema de intercambio iónico.

Los intercambiadores iónicos, son generalmente instalados en el pre-tratamiento para la ósmosis inversa. Durante esta operación se minimizan los requerimientos de limpieza y desincrustación en los equipos de ósmosis, a través de la eliminación de dureza y trazas de metales. Estos equipos aumentan el grado de pureza del agua permeada, sin embargo sirven de superficie para el crecimiento microbiano. Además pueden ser de cloruro de polivinilo (PVC), también de fibra de vidrio reforzada con polietileno. Estos cuentan con cabezal automático para el control de todas las operaciones (contralavado, aspiración de sal-reposo y enjuague).

Una resina tiene monómeros (estireno divinil benceno) que tiene grupos fijos y móviles (grupos activos).

Para el caso del tratamiento de agua se utilizan resinas fuertemente ácidas (catiónica fuerte) cuyo grupo activo es el sulfónico (HSO_3).

En cuanto a la contaminación en las resinas (McGowan, 1987) intervienen los siguientes factores:

- La canalización debido a inapropiados flujos de agua. Apropiadas velocidades de flujo de agua (5 a 50 m/h).
- Ensuciamiento orgánico de la resina.
- Ruptura de la perla de la resina. La resina debe permanecer húmeda constantemente para evitar la ruptura de la misma.

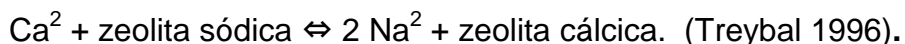
-Contaminación de la disolución salina usada para la regeneración. La buena preparación de la salmuera es un aspecto importante en el funcionamiento del sistema de intercambio iónico, los intercambiadores necesitan salmuera limpia y con el máximo contenido de cloruro de sodio a la concentración adecuada. Sal común con un 10 % máximo de impurezas. Se debe utilizar agua suavizada para la preparación de la salmuera como modo de mantener al mínimo el arrastre de endurecedores.

Medidas de Control:

- Recirculación del agua durante los períodos largos de uso de agua.
- Desinfección periódica de la resina y sistema de preparación de la salmuera.
- Uso de equipos de control microbiológico (luz ultravioleta, cloro).
- Frecuencia apropiada de la regeneración.
- Monitoreo de la dureza.

1.5.2 Intercambio Iónico. Suavizadores de agua.

En el contexto de purificación, el intercambio iónico es un proceso por medio del cual un sólido insoluble remueve iones de cargas positivas o negativas de una solución electrolítica y transfiere otros iones de carga similar a la disolución en una cantidad equivalente. Este proceso ocurre sin que existan cambios estructurales en el sólido. Si los sólidos intercambian iones positivos (cationes) se denominan intercambiadores catiónicos e intercambiadores aniónicos si intercambian iones negativos (aniones). Por ejemplo, la dureza del agua se puede eliminar reemplazando los iones calcio (Ca^{2+}) por iones sodio (Na^{+}) utilizando una resina cambiadora de cationes (zeolita), según la siguiente reacción de cambio.



La dureza hace referencia a la presencia de determinados aniones y cationes presentes en una muestra de agua, tomándose por convenios establecidos internacionalmente, los contenidos de calcio y magnesio. No obstante inciden en ese

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

parámetro la presencia de carbonato, hidrógenocarbonato, cloruro, sulfato, además de nitratos de calcio y magnesio. La tabla 3 refleja estos iones.

Tabla 3. Iones encontrados en aguas duras.

Cationes	Aniones
Calcio (Ca^{2+})	Cloruro (Cl^-)
Magnesio (Mg^{2+})	Hidrógenocarbonato (HCO_3^-)
Sodio (Na^+)	Nitrato (NO_3^-)
Potasio (K^+)	Carbonato (CO_3^{2-})
Hierro (Fe^{2+})	Sulfato (SO_4^{2-})

Fuente: Propia

Existen dos tipos básicos de resinas para intercambio de cationes y para intercambio de aniones. Resinas del intercambio de cationes emiten iones Hidrógeno (H^+) u otros iones como intercambio por cationes impuros presentes en el agua. Las resinas de intercambio de aniones dispondrán los iones hidroxilos (OH^-) u otros iones de cargas negativas en intercambio por los iones impuros que están presentes en el agua.

Las resinas de Intercambio de iones modernas son preparadas de polímeros sintéticos para formar unos intercambios de cationes fuertemente ácidos o para formar intercambios de aniones fuertemente básicos o débilmente básicos.

La tecnología de intercambio de iones puede ser usada en el tratamiento de agua y purificación mediante tres maneras:

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

Primero, resinas de intercambio de catión solas se pueden emplear para suavizar el agua.

El proceso consiste en hacer pasar agua con presencia de los iones que componen la dureza, mayormente calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) a través de una columna con resina intercambiadora ácido de catión en forma de sodio (Na^+) (por ejemplo, los cationes intercambiables es sodio). Los iones de calcio y magnesio son intercambiados por un número equivalente de iones de sodio. La resina, una vez agotada, (por ejemplo, todos los iones de sodio disponible han sido intercambiados) debe ser recargada. Esto significa que hay que pasar una solución que contiene una alta concentración de sales de sodio tales como cloruro de sodio a través de la resina de intercambio, un proceso conocido como regeneración. Este el proceso propuesto por primera vez por Gans en el 1905 es aún uno de los métodos más simples de suavizar el agua.

Segundo, resinas de intercambio anión solas pueden ser utilizadas para eliminar nitrato. Los escarbadores orgánicos son plantas totalmente automáticas diseñadas primordialmente para eliminar contaminantes que ocurren naturalmente mayormente ácidos húmico y fúlvico de las fuentes de agua. Estos son compuestos ionizados débilmente que pueden contaminar irreversiblemente las resinas normales de los aniones e invertir las membranas de ósmosis pero que pueden ser eliminados fácilmente del agua por una combinación de absorción e intercambio de ión.

Los escarbadores orgánicos contienen resinas especiales macro porosas que operan en forma de cloruro. Tienen una estructura abierta con grandes poros que le permiten a los voluminosos aniones orgánicos ser eliminados del agua de alimentación durante la regeneración.

La regeneración se inicia automáticamente por un reloj automático de ciclo. El regenerante es cloruro de sodio en forma de disolución de salmuera 10% que se lleva hacia el escarbador desde el tanque de salmuera.

La eliminación de nitratos es un peligro particular para bebés de menos de seis meses de edad. Los nitratos se reducen a nitritos en el sistema gastrointestinal del niño(a), lo que reduce así la capacidad de llevar oxígeno a la sangre (el síndrome de niño azul). El método más simple más factible de costo para eliminar nitratos del agua es por intercambio de aniones, utilizando sus resinas en forma de cloruro y

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

regeneradas con brines. Resinas especiales están disponibles para tratar las aguas ricas en sulfato.

(Resinas convencionales tienen una mayor afinidad para el sulfato que el nitrato, reduciendo así su capacidad para eliminar el nitrato.

Tercero, combinaciones resinas de intercambios de cationes y aniones pueden ser utilizadas para eliminar virtualmente todas las impurezas iónicas presentes en el agua de alimentación, un proceso conocido como desionización.

Para muchas aplicaciones de laboratorio e industriales se requiere la alta pureza del agua, la cual esté esencialmente libre de contaminantes iónicos. Agua de esta calidad se puede producir con la desionización.

Los dos tipos más comunes de desionización son:

Desionización de dos camas

El desionizador de dos camas consiste en dos recipientes- uno que contiene una resina de intercambio de cationes en forma de hidrógeno (H^+) y la otra con una resina de aniones en forma de hidroxilo (OH^-). El agua fluye a través de la columna de cationes, donde todos los cationes son intercambiados por iones de hidrógeno.

Para mantener el agua eléctricamente balanceada por cada catión monovalente, por ejemplo, Na^+ un ión de hidrógeno es intercambiado y por cada catión divalente, por ejemplo Ca^{2+} , o Mg^{2+} , dos iones de hidrógeno son intercambiados. El mismo principio se aplica cuando se considera un intercambio de aniones.

El agua descationizada entonces fluye a través de la columna de aniones. Esta vez todos los iones con carga negativa son intercambiados por iones de hidróxido los cuales entonces se combinan con los iones de hidrógeno para formar agua (H_2O).

Desionización de cama mixta.

En los desionizadores de cama mixta, las resinas del intercambio de cationes y de aniones están íntimamente mezcladas y contenidas en un solo recipiente a presión. La mezcla minuciosa de cationes intercambiadores y aniones intercambiadores en una columna sencilla hace al desionizador de cama mixta equivalente a la serie larga de plantas de dos camas. Como resultado, la calidad del agua obtenida de un desionizador de cama mixta es apreciablemente más alta que la que se produce en una planta de dos camas.

El recipiente puede ser en la forma de una columna grande de acero inoxidable o de fibra de vidrio reforzada conteniendo la resina, o un cartucho pequeño desechable/regenerable que cuando se acaba, puede desecharse o enviado al proveedor original para regeneración. Los desionizadores grandes ya sean de dos camas o camas mixtas- se regeneran automáticamente, en su lugar, cuando la calidad del agua cae por debajo de los niveles fijados anteriormente.

Aunque son más eficientes en su función purificadora del agua de alimentación, las plantas de camas mixtas son más sensitivas a las impurezas en la fuente de agua e involucran un proceso de regeneración más complicado. Los desionizadores de cama mixta se utilizan normalmente para llevar el agua a altos niveles de pureza después de tratadas inicialmente por un desionizador de dos camas o una unidad de ósmosis inversa.

Los desionizadores usados en aplicaciones de laboratorios son casi invariablemente unidades de camas mixtas que contienen cartuchos de resina intercambiable o desechable. Desionizadores grandes de auto-regeneración se utilizan a veces en sistemas de purificación de agua para suplir volúmenes de aguas para *suites* de laboratorios, o grandes cantidades de agua para proceso industrial.

1.5.3 Suavizador de agua

El suavizador de agua, también llamado descalcificador o ablandador de agua mostrado de la figura 1, es un aparato que por medios mecánicos, químicos y/o electrónicos tratan el agua para evitar, minimizar o reducir, los contenidos de sales minerales y sus incrustaciones en las tuberías y depósitos de agua potable.

Las aguas con altos contenidos de sales de calcio o magnesio (aguas duras) tienden a formar incrustaciones minerales en las paredes de las tuberías. En algunos casos bloquean casi la totalidad de la sección del tubo.

La función de los ablandadores es eliminar los iones de Ca y Mg, que conforman la dureza del agua y favorecen la formación de incrustaciones en una caldera. (Cordero, 1987)

La figura 1.4 ilustra este tipo de equipo.

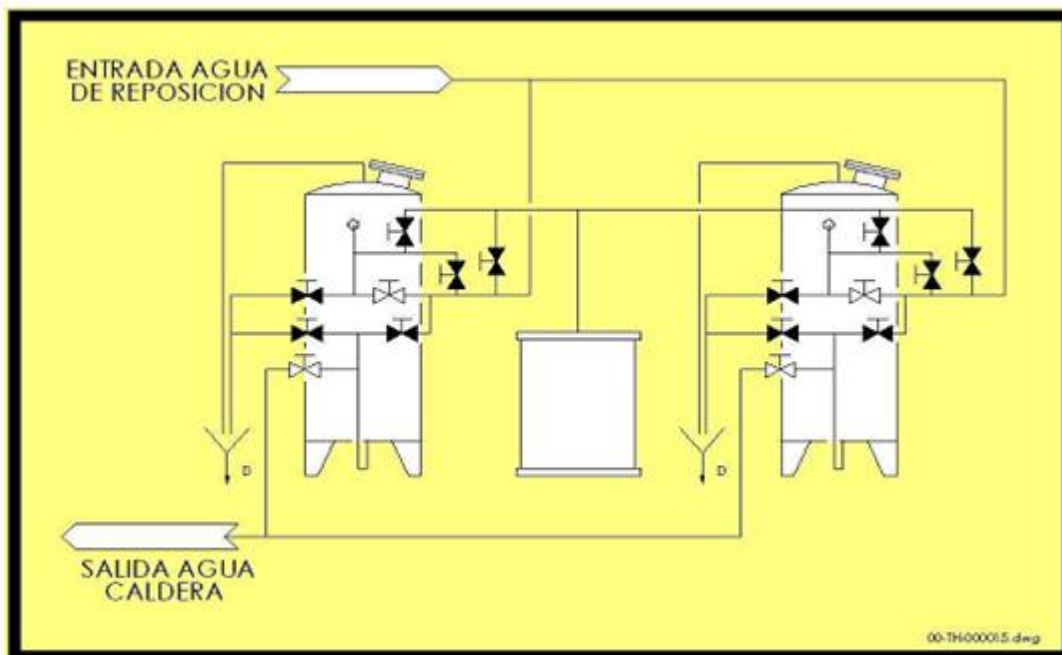
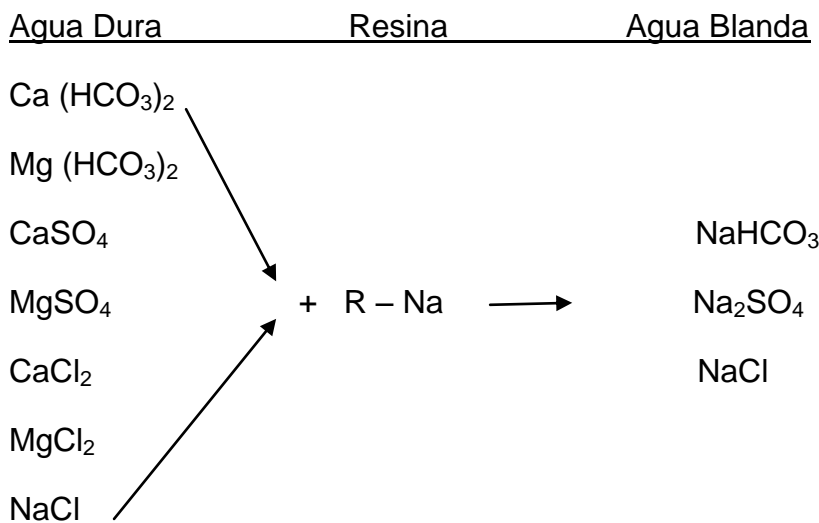


Figura 1.4: Ablandadores.

El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en un proceso llamado “intercambio iónico”, que consiste en la sustitución de estos iones por sodio (Na^+) para obtener agua para ser utilizada en calderas.

Los ablandadores están compuestos por resinas, que poseen una capacidad de intercambio de iones de calcio y magnesio por sodio.

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos



En el caso de que la capacidad de entrega de agua blanda de estos equipos se vea disminuida (agua entregada con dureza mayor a 6 mg/L expresada como CaCO₃), es necesario llevar a cabo una regeneración para recuperar la capacidad de intercambio de las resinas.

La regeneración es realizada con sal sódica (NaCl) de calidad técnica con una concentración de 150 a 250 g/L de resina. (Cordero,1987).

Mecánicos

Los equipos de ósmosis inversa funcionan haciendo pasar el agua a través de una membrana semipermeable al aplicar altas presiones. El agua pura atraviesa la membrana dejando atrás todas las partículas minerales e impurezas. La presión está determinada por la clase de membrana que se esté utilizando.

Estos equipos son diseñados para purificar el agua de beber. La constante limpieza de las membranas y la baja capacidad de producción de agua los hace poco prácticos para el consumo total de una vivienda. Aunque existen versiones industrial para manejo de grandes caudales.

Químicos

El agua se hace circular por un racor con zeolita (un compuesto químico de sales de sodio o potasio). Los iones de calcio y magnesio son remplazados por iones de sodio. El sodio o potasio liberado no se adhiere a las paredes de las tuberías ni reacciona con el jabón, solucionando ambos problemas.

Después de un tiempo el sodio es remplazado completamente por calcio o magnesio y deja de suavizar el agua. En este momento se hace necesario remplazar el cartucho o las pastillas de zeolita por unas nuevas. Existen equipos que permiten hacer una regeneración química de la zeolita.

Eléctricos

Desde hace unos años atrás existen en el mercado unos aparatos electrónicos que aseguran tratar el agua para evitar las formaciones de calcio en las tuberías. El efecto se genera creando un fuerte campo magnético que atraviesa la tubería por donde circula el agua que se quiere tratar. Los pulsos de este campo magnético afectan los cristales de calcio modificando su estructura molecular para que se mantengan en suspensión y no se fijen a las paredes de las tuberías. El efecto del agua tratada puede prolongarse por unos siete días.

Para que estos aparatos funcionen adecuadamente deben ser ajustados en dependencia del diámetro de la tubería, velocidad, composición química y temperatura del agua. En instalaciones comerciales e industriales estos parámetros son meticulosamente medidos y controlados, cosa que no se puede hacer en una vivienda. Para que funcionen adecuadamente en una vivienda los suavizadores electrónicos cambian la amplitud, forma y frecuencia del campo magnético de manera aleatoria buscando cubrir todas las posibles variables. Como resultado no funcionan en el 15% de los casos. La WQA concluyó en 2001 que se deben crear estándares para el diseño de este tipo de aparatos.

1.6 Operación de sistema de columnas.

La operación de columnas y sistemas de columnas de intercambio iónicos trae consigo aparejado varios pasos:

1. Agotamiento (etapa de servicio).
2. Contralavado.
3. Regeneración
4. Lavado o enjuague.

El **agotamiento**: es la etapa de operación de la columna, es el período de tiempo durante el cual se está haciendo pasar agua a tratar por la misma. La operación dura hasta el momento en que el agua salga con las especificaciones de calidad establecidas. El período de agotamiento de una columna se puede calcular a partir de los parámetros de operación de la resina (brindados por el fabricante), así como por la calidad que se desea obtener en el agua tratada. (Betancourt, 2006)

Una vez agotada la columna la columna, se procede al contralavado.

Contralavado. Se abren las válvulas de entrada al suavizador de la parte inferior. El tiempo de contralavado es de 10 minutos y se prolonga en caso de que el afluente no salga limpio y claro. Durante esta operación se debe revisar el afluente a la canal periódicamente para detectar posibles pérdidas de resina, de existir estas, se eliminan ajustando la regulación de la válvula de salida. Esta operación se realiza recogiendo el afluente con un erlenmeyer y mirándolo a tras luz.

Durante esta operación el agua pasa por el equipo en flujo invertido al servicio, es decir, de abajo hacia arriba, expansionando el lecho de resina para eliminar el lodo, partículas depositadas por la acción mecánica, bolsones de aire y además se remueven y reclasifican los granos de la resina.

El flujo de contralavado para un 60% de expansión será de 250 L/ minuto.

El flujo de contralavado para un 100% de expansión será de 400 L/ minuto

Al contralavado le sigue la regeneración.

La regeneración: El objetivo de esta operación es restituirle a la columna las cargas originales para que pueda continuar operando, esto es posible hacerlo gracias a que las reacciones de intercambio son reversibles. No obstante, para lograr esta

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

reacción inversa, es necesario emplear soluciones de regenerantes con concentración relativamente alta.

La regeneración se realiza, por lo general, con más cantidad que el estequiométricamente necesario. El exceso de regenerante a emplear depende de varios factores, entre ellos se encuentra las características de resina, el modo de funcionamiento elegido y el grado de regeneración necesario para obtener la calidad del agua deseada.

Los fabricantes de resina ofrecen tablas y gráficos donde se recomienda los niveles de regeneración y concentraciones del regenerante para obtener diferentes calidades de aguas, en función de la calidad de agua a tratar, cabe destacar que en dependencia del nivel de regeneración utilizado se encontrará la capacidad de intercambio de la resina. (Betancourt, 2006)

Una vez regenerada, la columna sufre un proceso de lavado o enjuague.

1. **Pase de salmuera.** Se comprueba que la densidad de la salmuera esté entre 18 y 20°C Be, para ello se abre el drenaje del compartimiento de almacenamiento de la cisterna de sal, se toma una muestra de 2000 mL con el frasco cónico, se introduce en el cilindro graduado y con el densímetro se mide la densidad de la solución. Se abren las válvulas de entrada; una vez concluido el pase de salmuera, se procede a reponer 350 libras de sal en el mismo y se abre la llave de reposición hasta reponer el nivel inicial.
2. **Desplazamiento.** El objetivo de esta operación es desplazar gradualmente la solución salina residual que se encuentra en la resina y línea de salmuera, así como lograr ahorro de agua en el enjuague.
3. **Enjuague rápido.** Se abren las válvulas hasta obtener bajo sabor salino, se toma una muestra de agua y se realiza la determinación de la dureza total. El enjuague dura hasta que la dureza total sea de 0 mg/L. se anota en “Control de Regeneración de los Suavizadores de Caldera”, los parámetros correspondientes. Como se habrá observado hasta ahora se ha trabajado en el suavizador con el agua proveniente del tanque exterior, o sea agua cruda.
4. **Servicio.** Durante el servicio se realizan pruebas de dureza cada dos horas, se registra en el libro de control y se efectúan purgas de aire por la válvula destinada para ello.

Para garantizar una operación óptima del eyector para la absorción de la salmuera, debe lograrse una presión mínima por la bomba de alimentación de agua cruda a partir de 2.5 kg/cm². (Oelker Behn 2002)

1.7 Preparación de la Salmuera.

1. Se comprueba que existe sal (NaCl) suficiente en el depósito, 20 pulgadas de sal en granos.
2. Se abre la válvula de suministro de agua al compartimiento de disolución, la solución saturada de agua con sal se logra una vez transcurridas 5 horas después de haber preparado la solución.
3. Se mide la densidad de la solución. Para ello se abre la válvula de drenaje del compartimiento de disolución, con un *erlenmeyer* se coge 2000 mL de la solución y se introduce en el cilindro graduado y con el densímetro se mide su densidad, debe estar entre 16 y 20 ° Be, si no está en parámetros, se espera dos horas más y se vuelve a medir su densidad.
4. Cuando la densidad se encuentre en el rango, se procede a realizar la operación de regeneración del suavizador.

1.8 Calidad del agua en función de su uso.

Química de las aguas para consumo industrial.

De la misma manera que se establecen normas de calidad para las aguas de consumo humano, se establecen normas de calidad para las aguas de uso industrial (Tratamiento de aguas y aguas residuales, (Betancourt, 2006.)). Estas suelen clasificarse en aguas que intervienen directamente como materia prima dentro del proceso, en aguas para enfriamiento, calentamiento y generación de vapor, aguas para limpiezas de equipos e instalaciones y agua para resolver los requerimientos higiénicos sanitarios del personal.

Cada uno de los tipos de agua mencionados debe poseer una determinada calidad.

El agua para intercambio calórico y la generación de vapor debe cumplir con toda una serie de requisitos específicos, y en especial el agua utilizada para la

generación. En lo referente a las características requeridas para las aguas de proceso es prácticamente imposible definir normas de calidad universales. Las normas dependen del tipo de producción y de la tecnología utilizada. (Rodríguez, 2000).

1.9 Problemas derivados de la utilización del agua en calderas.

Los problemas más frecuentes presentados en calderas pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Problemas de corrosión
- Problemas de incrustación

Aunque menos frecuente, suelen presentarse ocasionalmente:

- Problemas de ensuciamiento y/o contaminación.

A continuación se describen brevemente las principales características de los *items* mencionados anteriormente.

Corrosión.

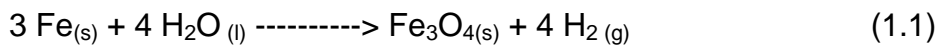
Para que esta aparezca, es necesario que exista presencia de agua en forma líquida, el vapor seco con presencia de oxígeno, no es corrosivo, pero los condensados formados en un sistema de esta naturaleza son muy corrosivos.

En las líneas de vapor y condensado, se produce el ataque corrosivo más intenso en las zonas donde se acumula agua condensada. La corrosión que produce el oxígeno, suele ser severa, debido a la entrada de aire al sistema, a bajo valor de pH, el dióxido de carbono abarca por sí mismo los metales del sistema y acelera la velocidad de la corrosión del oxígeno disuelto cuando se encuentra presente en el oxígeno. (Laot, 1999).

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

El oxígeno disuelto ataca las tuberías de acero al carbono formando montículos o tubérculos, bajo los cuales se encuentra una cavidad o celda de corrosión activa: esto suele tener una coloración negra, formada por un óxido ferroso- férrico hidratado.

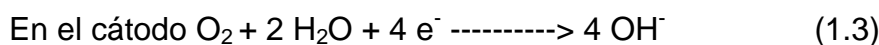
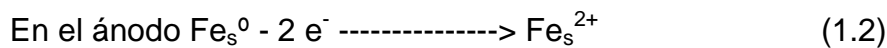
Una forma de corrosión que suele presentarse con cierta frecuencia en calderas, corresponde a una reacción de este tipo:



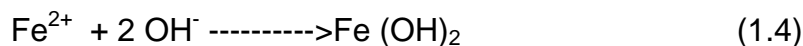
Esta reacción se debe a la acción del metal sobre calentado con el vapor.

Otra forma frecuente de corrosión, suele ser por una reacción electroquímica, en la que una corriente circula debido a una diferencia de potencial existente en la superficie metálica.

Los metales se disuelven en el área de más bajo potencial, para dar iones y liberar electrones de acuerdo a la siguiente ecuación:



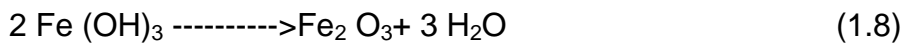
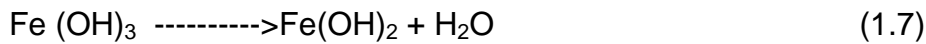
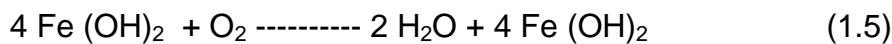
Los iones HO⁻ (oxhidrilos) formados en el cátodo migran hacia el ánodo donde completan la reacción con la formación de hidróxido ferroso que precipita de la siguiente forma:



Si la concentración de hidróxido ferroso es elevada, precipitará como flocos blancos.

El hidróxido ferroso reacciona con el oxígeno adicional contenido en el agua según las siguientes reacciones:

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos



Incrustación.

La formación de incrustaciones en el interior de las calderas suelen verse con mayor frecuencia que lo estimado conveniente.

El origen de las mismas está dado por las sales presentes en las aguas de aporte a los generadores de vapor, las incrustaciones formadas son inconvenientes debido a que poseen una conductividad térmica muy baja y se forman con mucha rapidez en los puntos de mayor transferencia de temperatura.

Por esto, las calderas incrustadas requieren un mayor gradiente térmico entre el agua y la pared metálica que las calderas con las paredes limpias.

Otro tema importante que debe ser considerado, es la falla de los tubos ocasionados por sobrecalentamientos debido a la presencia de depósitos, lo que dada su naturaleza, aíslan el metal del agua que los rodea pudiendo así sobrevenir desgarros o roturas en los tubos de la unidad con los perjuicios que ello ocasiona.

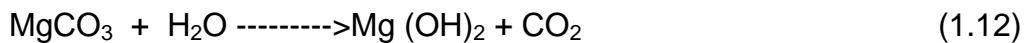
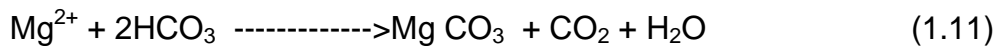
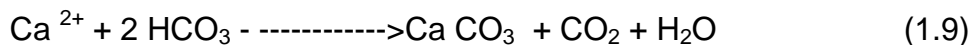
Las sustancias formadoras de incrustaciones son principalmente el carbonato de calcio, hidróxido de magnesio, sulfato de calcio y sílice, esto se debe a la baja solubilidad que presentan estas sales y algunas de ellas como es el caso del sulfato de calcio, decrece con el aumento de la temperatura. Estas incrustaciones forman depósitos duros muy adherentes, difíciles de remover, algunas de las causas más frecuentes de este fenómeno son las siguientes:

- Excesiva concentración de sales en el interior de la unidad.

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

- El vapor o condensado tienen algún tipo de contaminación.
- Transporte de productos de corrosión a zonas favorables para su precipitación.
- Aplicación inapropiada de productos químicos.

Las reacciones químicas principales que se producen en el agua de calderas con las sales presentes por el agua de aporte son las siguientes:



Ensuciamiento por contaminación.

Se consideran en estos rubros como contaminantes, distintas grasas, aceites y algunos hidrocarburos, ya que este tipo de contaminación son las más frecuentes vistas en la industria.

Dependiendo de la cantidad y característica de los contaminantes existentes en el agua de aporte a caldera, la misma generará en su interior depósitos, formación de espuma con su consecuente arrastre de agua concentrada de caldera a la línea de vapor y condensado, siendo la misma causante de la formación de incrustaciones y depósitos en la sección post-caldera.

La formación de espuma, suele ocurrir por dos mecanismos, uno de ellos es el aumento del tenor de sólidos disueltos en el interior de la unidad, los que sobrepasan los límites aceptados de trabajo, la presencia de algunos tipos de grasas y/o aceites (como ácidos orgánicos) producen una saponificación de las mismas dada la alcalinidad, temperatura y presión existentes en el interior de la caldera.

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

La contaminación por hidrocarburos agrega a lo visto la formación de un *film* aislante que dificulta la transferencia térmica entre los tubos y el agua del interior de la unidad, lo que se agudiza con las características adherentes de este *film* que facilita y promueve la formación de incrustaciones y la formación de corrosión bajo depósito, proceso que generalmente sigue al de formación de depósitos sobre las partes metálicas de una caldera. (Laot, 2000)

Luego de un tiempo, las características físicas del *film* formado cambian debido a la acción de la temperatura que reciben a través de las paredes metálicas del sistema, lo que hace que el mismo experimente un endurecimiento y "coquificación", siendo este difícil de remover por procedimientos químicos simples.

Por todas estas consideraciones, se ve como método más económico y lógico de mantenimiento de calderas, efectuar sobre el agua de aporte a las mismas los procedimientos preventivos que la misma requiera, evitando así costos de mantenimiento innecesarios y paradas imprevistas en plena etapa de producción con los costos de lucro cesantes que agravan la misma,

Sin pretender que el presente trabajo sea una enumeración exhaustiva y completa de todos los posibles inconvenientes que puedan ocasionar el agua de alimentación a caldera, se considera que el mismo facilita el entendimiento de las principales causas de los más importantes inconvenientes que puedan ocurrir en las salas de calderas en la industria.

Capítulo 2 : Materiales y métodos.

La investigación se realiza en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos con el fin de estudiar diferentes variantes que posibilite la estabilidad del funcionamiento del sistema de tratamiento del agua de alimentación a caldera aunque presenten dificultades con la adquisición de la sustancia regenerante de las resinas de intercambio iónico. El trabajo experimental a escala de laboratorio se efectuó en el laboratorio de la asignatura de operaciones unitarias ubicado en el área aledaña a la planta piloto del Centro de Estudios de Anticorrosivo y Tensoactivos (CEAT). Se la caracterización del agua de entrada al generador y se evaluaron dos tipos de regenerantes.

2.1 Caracterización del agua de entrada al generador.

Se definió que la caracterización se efectuara referido a los parámetros dureza total, dureza permanente, dureza de calcio, dureza de magnesio, alcalinidad total, pH y conductividad.

Para la determinación de los diferentes parámetros se realizó un muestreo durante las 24 horas con vistas a evaluar la estabilidad de la calidad de la muestra donde se tomaron 20 muestras.

Los análisis efectuados se realizaron según las técnicas analíticas estudiadas en la asignatura OPU IV, las cuales a su vez se corresponden con los métodos normalizados de análisis.

1-) dureza total

- Tomar 25 mL de la muestra e introducir en un erlenmeyer de 250mL (realizarlo por triplicado).
- Añadir 1mL de disolución buffer- amoniacal.
- Añadir una pizca del indicador eriocromo- negro T.
- Valorar con EDTA

$$c(\text{CaCO}_3) = \frac{c(\text{EDTA}) * V_1}{V_2} \quad \text{Ec-(2.1)}$$

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

c (EDTA) – concentración de EDTA mol/L

V_1 –volumen de EDTA consumido L

V_2 – volumen de disolución de la muestra

Aparatos, utensilios y medios de medición.

- Erlenmeyers de 250 mL
- Pipeta aforada de 25 mL
- Pipeta de 1 mL
- Probetas

Reactivos químicos.

Disolución estándar de EDTA 0,0200 mol/L

Indicador Eriocromo negro T

Disolución buffer $\text{NH}_3 / \text{NH}_4\text{Cl}$

Para la determinación se emplea el método complexométrico utilizando EDTA como agente valorante, Eriocromo negro T como indicador y solución buffer amoniacal para ajustar el pH.

2-) Dureza permanente.

- Colocar 250 mL de la muestra de agua en un vaso de precipitado de 400 mL
- Hervir lentamente durante 20 – 30 minutos. Enfriar.
- Filtrar directamente sobre un matraz aforado de 250 mL. Enrasar y homogenizar.
- Medir porciones de 25 mL de filtrado homogéneo y valorar igual que la dureza total.

Para calcular la dureza permanente se utiliza la misma ecuación que para dureza total expresada como CaCO_3 .

3-) Dureza de calcio.

- Tomar 25 mL de la muestra.
- Adicionar 25 mL de agua destilada.

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

- Añadir 2 mL de NaOH con una concentración de 0,2 mol/L.
- Añadir una pizca de murexida.
- Valorar con EDTA.

Aparatos, utensilios y medios de medición.

- Erlenmeyer de 250 mL
- Pipeta aforada de 25 mL
- Pipeta de 2 mL
- Probetas

Reactivos químicos.

Disolución estándar de EDTA 0,0200 mol/L.

Indicador murexida.

4-) Alcalinidad total.

- Tomar 25 mL de muestra.
- Adicionar 25 mL de agua destilada.
- Añadir 2 gotas de anaranjado de metilo.
- Valorar con H₂SO₄.

$$c(\text{CaCO}_3) = \frac{c(\text{H}_2\text{SO}_4) * V(\text{H}_2\text{SO}_4) * \text{MasaMolar}(\text{CaCO}_3)}{V(\text{muestra})} \quad \text{Ec- (2.2)}$$

Masa Molar (CaCO₃)=100 g/mol

Aparatos, utensilios y medios de medición.

- Erlenmeyer de 250 mL
- Pipeta aforada de 25 mL
- Probetas

Reactivos químicos.

Disolución valorante H₂SO₄.

Indicador anaranjado de metilo.

5-) pH

Se realizó por el método potenciómetro con el empleo del peachímetro.

6-) Conductividad.

Se utiliza el método potenciométrico con el empleo de un conductímetro.

Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 Edición. 1992. Página 2-65. Sección 1510 B.

Aparatos, utensilios y medios de medición.

- Vasos de precipitado de 100 mL.
- Conductímetro.
- Electrodo de platino.

Reactivos.

- Agua de conductividad (agua destilada desionizada).
- Muestra de agua tomada

2.2 Análisis estadístico.

Los resultados fueron procesados estadísticamente por *STATGRAPHICS*.

En este programa se realizó un análisis de variables, los resultados se muestran en el capítulo 3.

2.3 Diseño de experimento.

Se realizó un diseño experimental 4^2 para evaluar la efectividad de dos tipos de regenerantes y se compararon con el regenerante oficial establecido en la entidad (generador adscrito al departamento de alimentación de la UMCC).

Dos variables a cuatro niveles

Variables tipo de regenerante

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

Niveles tiempo de regeneración

Se emplearon columnas de 10 mm diámetro y 209 mm de altura

Se efectuó la determinación de la capacidad específica de la resina por la expresión a partir de experimentos.

Determinación de la capacidad específica de la resina.

A partir de la expresión

$$V_r = \frac{\text{salinidad} * \text{volumendeagua}}{\text{capacidadespecífica}} \quad \text{Ec-(2.3)}$$

Donde se despeja la capacidad específica

$$\text{capacidadespecífica} = \frac{\text{salinidad} * \text{volumendeagua}}{V_r} \quad \text{Ec- (2.4)}$$

Donde

V_r - Volumen de resina.

Descripción de la instalación experimental

Se emplearon tres columnas de diámetro 10mm con instalación de recipiente (tanque elevado) que mantuvo un flujo de 83.33 mL/min.

$$\text{area} = \frac{\text{volumendere sin a}}{\text{alturadell echodere sin a}} \quad \text{Ec- (2.5)}$$

2.4 Regeneración de la resina

Para llevar a cabo la regeneración de la resina se utilizaron diferentes regenerantes como son:

- Cloruro de sodio comercial de granulometría gruesa (regenerante oficial, salmuera)
- Cloruro de sodio de granulometría fina (sal común de suministro a la población)
- Agua de mar

La regeneración de la resina con los diferentes regenerantes se comprobó a diferentes tiempos y con el flujo constante de 83.33 mL/min.

Lo primero que se hizo fue comprobar en qué tiempo se agotaba la resina.

Valoración de la resina

Para ver el tiempo de agotamiento de la resina se tomaron 250 mL de la resina a un flujo de agua constante de 83.33 mL/min.

Posteriormente se llevó a cabo la regeneración de la resina para determinar el comportamiento de la misma una vez regenerada.

Comportamiento de la resina después de regenerada. Uso del cloruro de sodio granular (salmuera)

- **Comportamiento de la resina regenerada a 90 minutos.**

En este tiempo de regeneración con la salmuera se utilizó 27,5g de dicha sustancia en 250 mL de agua, y se realizó la medición del tiempo de agotamiento

El resto de las pruebas se realizaron de igual forma para los diferentes tiempos a evaluar. Los resultados se muestran en el capítulo 3, tabla 3.1.

- Comportamiento de la resina regenerada a 60 minutos.
- Comportamiento de la resina regenerada a 30 minutos.

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

- Comportamiento de la resina regenerada a 15 minutos

Después se realizó la regeneración con sal común donde se utilizó 27,5g de sal y de la misma manera que con la salmuera, utilizando los mismos tiempos.

- **Comportamiento del tiempo de regeneración de resina con sal común.**
- Comportamiento del tiempo de regeneración a 90 minutos
- Comportamiento del tiempo de regeneración a 60 minutos.
- Comportamiento de la resina regenerante a 30 minutos.
- Comportamiento de la resina regenerada a 15 minutos.

Por último se regeneró con agua de mar (Cloruro (19 g.L^{-1}); Sodio ($10,5 \text{ g.L}^{-1}$); donde se utilizó 250 mL de agua de mar, el mismo procedimiento que los otros dos y los mismos tiempos.

Comportamiento del tiempo de regeneración con agua de mar.

- Comportamiento de la resina regenerada a 90 minutos
- Comportamiento de la resina regenerada a 60 minutos.
- Comportamiento de la resina regenerada a 30 minutos.
- Comportamiento de la resina regenerada a 15 minutos.

Capítulo 3 : Análisis de resultado.

En el presente capítulo se muestran los resultados derivados de la investigación, se determina las características del agua de entrada al generador de vapor, el tipo de regenerante más factible para la regeneración

3.1 Resultado del análisis de las características de agua de abasto de la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

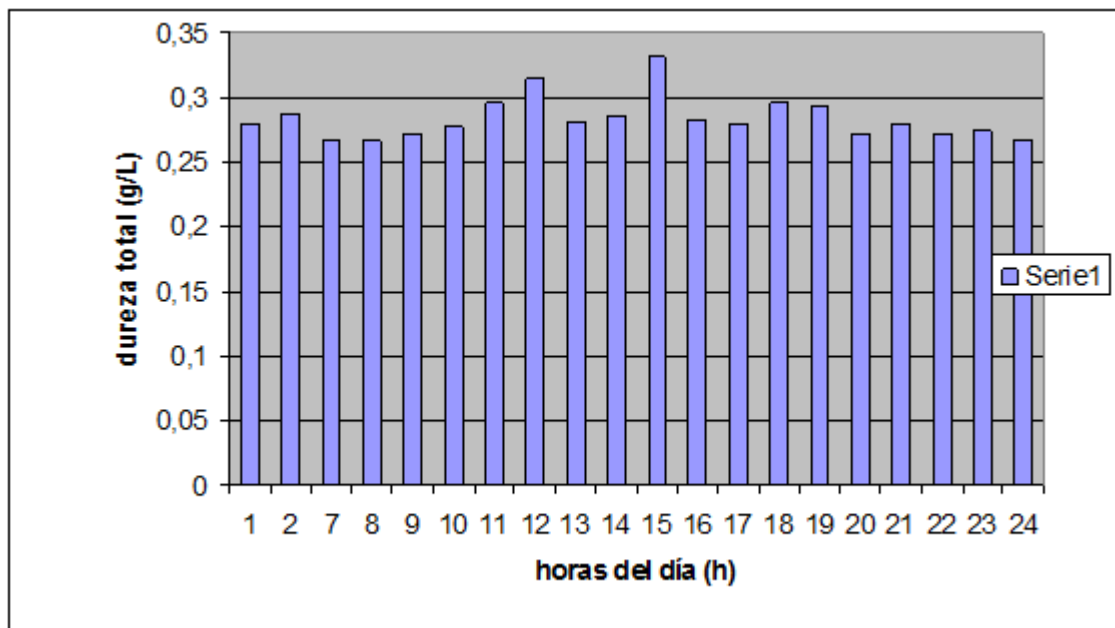


Figura 3.1: Dureza total vs horas del día.

Fuente: propia

En esta figura se observa que la dureza total mantiene valores entre 250 mg. L^{-1} y 330 mg. L^{-1} lo que demuestra que es un agua dura que no puede ser enviada al generador sin previo tratamiento. Como se observa en la figura 3.1 la dureza total fue variando en las respectivas horas del día, aspecto a indagar ya que la fuente de procedencia es la misma y no se justifica esa variabilidad.

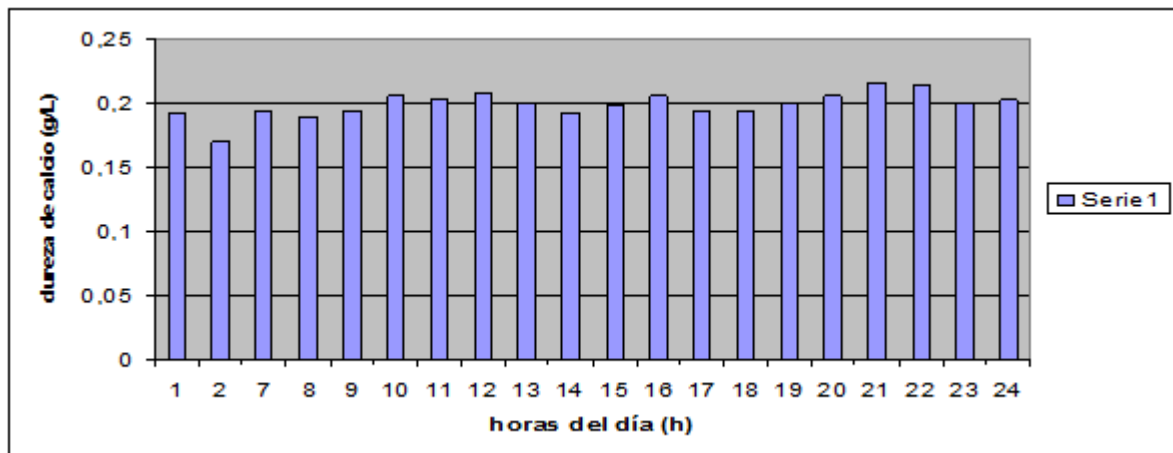


Figura 3.2: Dureza de calcio vs horas del día

Fuente: propia

En la figura 3.2 se muestra el comportamiento de la dureza de calcio muy similar alrededor 200 mg. L^{-1} . Este dato es importante porque brinda información acerca del tipo de dureza que está presente y que hay dureza de magnesio. Si se requiriera realizar tratamiento por precipitación química sería necesario utilizar Hidróxido de calcio (cal) y carbonato de sodio (soda) para lograr una buena reducción del contenido de calcio y magnesio en la muestra.

Este parámetro es aceptable para utilizar por la población, no así para usar en el generador.

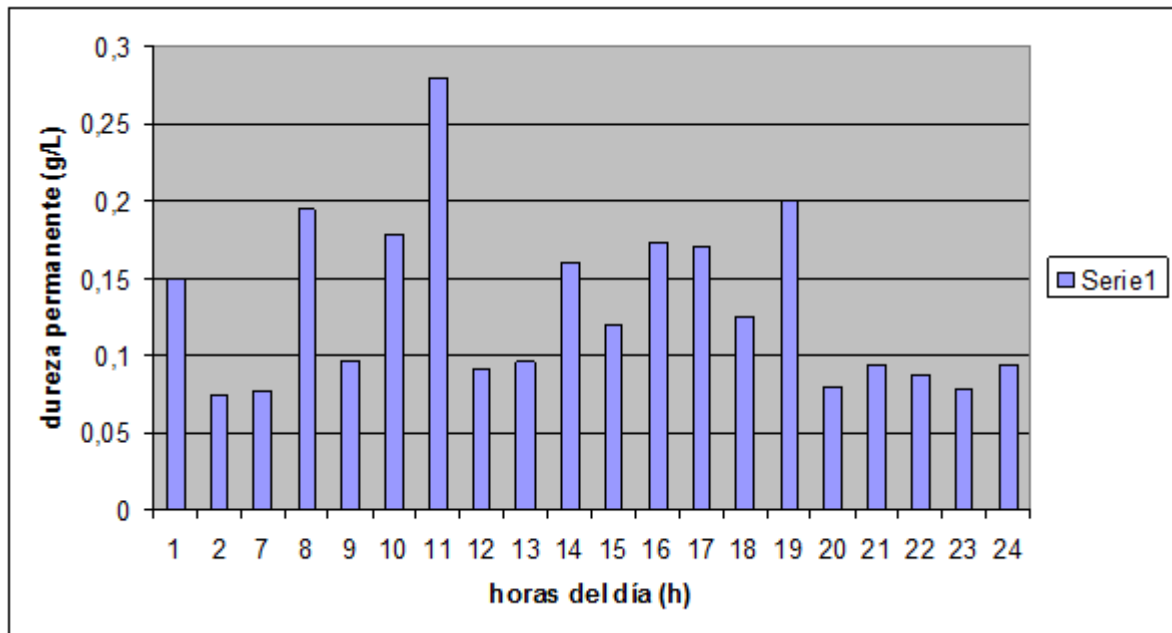


Figura 3.3: Dureza permanente vs horas del día.

Fuente: propia.

En la figura 3.3 se observa la variabilidad que presentan los datos. En este caso se trata de la dureza no carbonatada. Esta información también es muy importante para conocer más las características de esta fuente de abasto de agua, pues a través de estos y de la dureza total se puede determinar la dureza carbonatada que para el tratamiento cal-soda hay que tenerlo en cuenta para el cálculo de la dosis de productos químicos, específicamente para el cálculo de la dosis de cal.

Por otra parte, resalta la diferencia de comportamiento de la alcalinidad total y la dureza permanente, mientras esta última mantiene valores semejantes, la dureza permanente mantiene un comportamiento zigzagueante. Ello indica que no pueden emplearse indistintamente para reflejar la dureza carbonatada mediante la alcalinidad, lo que resulta interesante y ratifica que no puede ser utilizada esa semejanza si no se asegura que no haya presencia de hidrogenocarbonatos de sodio en la muestra

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

La figura 3.4 refleja las diferencias entre ambos parámetros. .

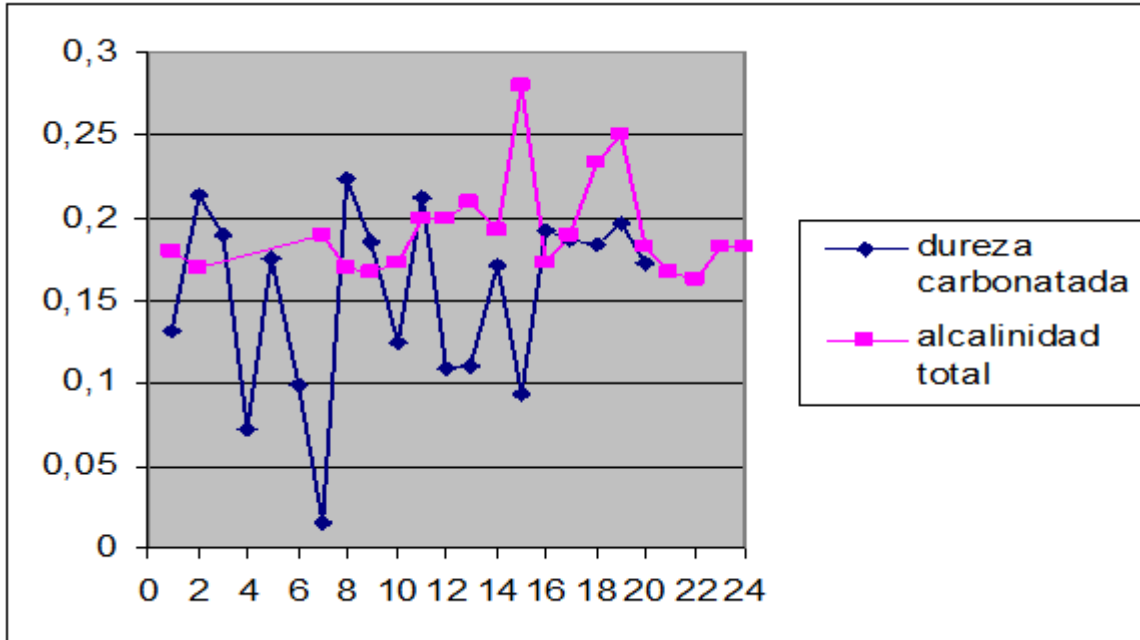


Figura 3.4 Dureza carbonatada y alcalinidad total vs hora del día.

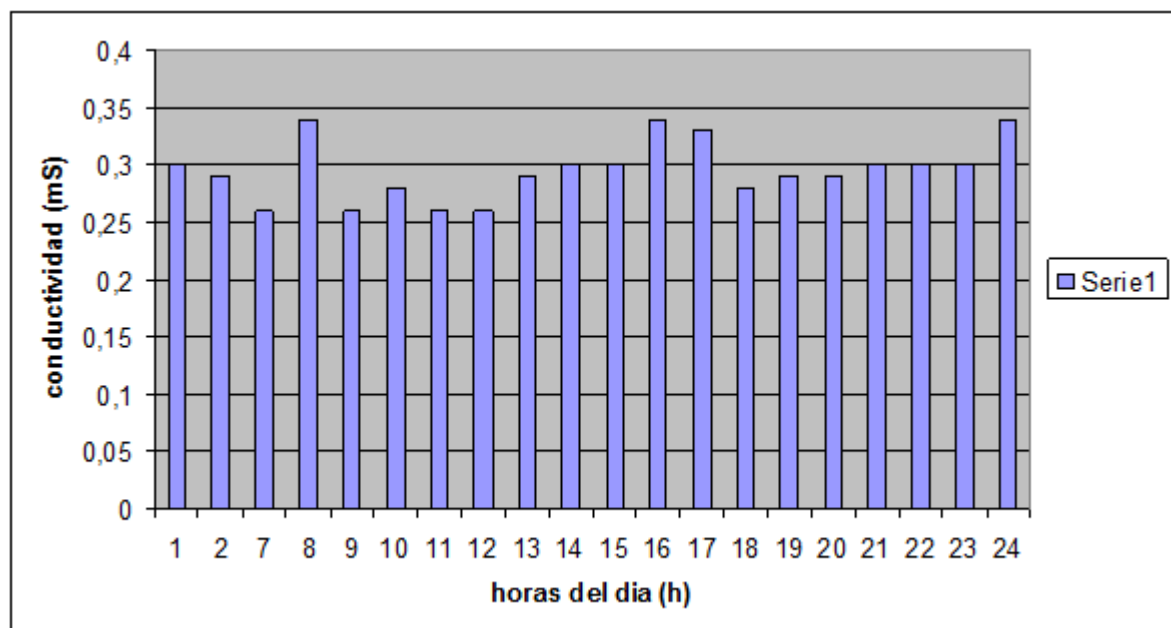


Figura 3.5. Conductividad vs horas del día

Fuente: propia

En la figura 3.5 se obtiene como resultado que hay sólo 10 valores que cumplen con la norma de agua potable que es 0.300-1.2 g/L.

No obstante, los resultados son presentan mucha variabilidad entre ellos, sólo en cuatro valores se alejan de la media.

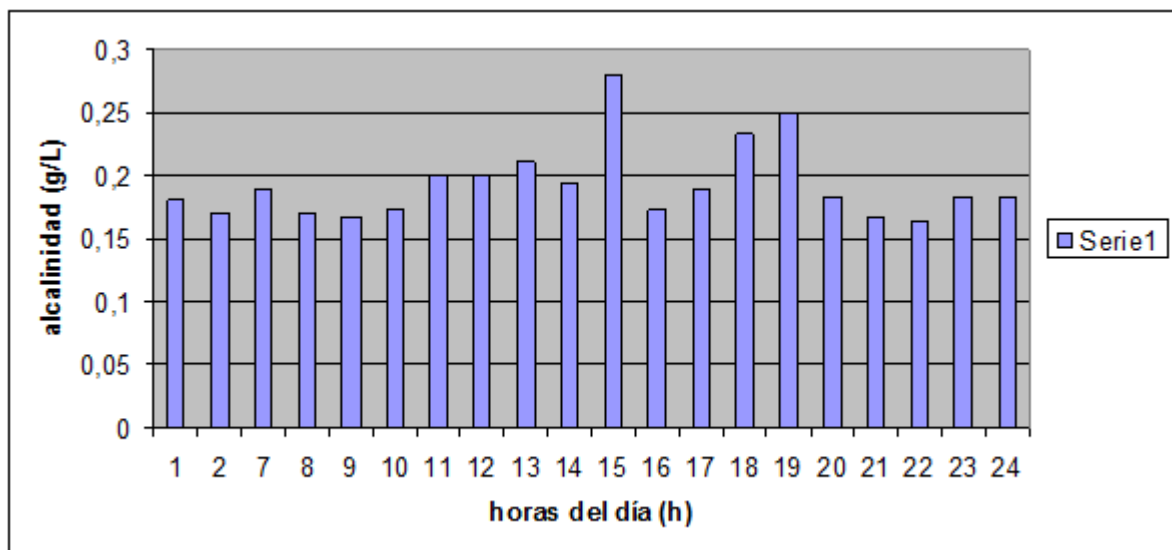


Figura 3.5: alcalinidad vs. horas del día.

Fuente: propia

Como se observa en la figura 3.5 todos los valores oscilan entre 0.160 y 0.208 por lo que se lleva al siguiente resultado la alcalinidad cumple con la norma para agua potable ya que debe estar entre 0.130-360 g/L.

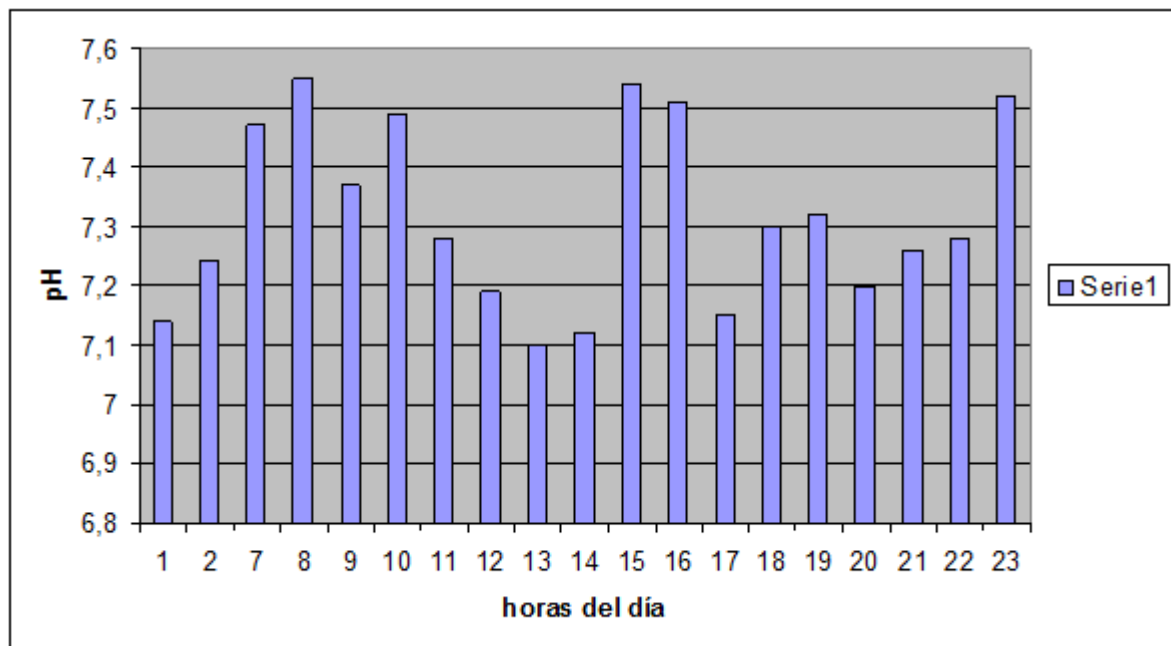


Figura 3.7. pH vs horas del día

Fuente: propia

Como se observa en la figura 3.7 se puede expresar que los valores del pH están entre los rangos de la norma cubana de agua potable que es 6.4-7.8. A pesar de la variabilidad que se aprecia en la misma, los valores están en torno a un pH neutro o ligeramente alcalino que a los efectos de la calidad de las aguas, es favorable, no así para lo que refiere el tratamiento interno de caldera que debe estar algo superior a esa media, por posibles problemas de corrosividad si se pierde el control y disminuye por debajo de cinco. También es importante el control hacia el pH alcalino, pues no debe llegar a valores extremos de 11 o superiores por las afectaciones que ocasionaría también como medio dañino al generador.

3.2 Resultados del análisis del agua que entra al generador de vapor.

El análisis de las características del agua que entra al generador de vapor dio como resultado que el agua no cumple con dos características para agua tratada, ya que

se pudo observar que tiene características similares al agua que entra a dicha instalación, por lo que se trabaja con el agua de la llave directamente,. Esto es de gran gravedad por las afectaciones que está ocasionando al generador:.

- Rotura frecuente del generador de vapor.
- Incrustaciones en los tubos de intercambio que conlleva a que se genere menos vapor.
- Necesidad de limpieza continua del generador de vapor en tiempo más corto de lo previsto para lograr eliminar las incrustaciones existentes.

3.3 Resultado del análisis estadístico.

Análisis estadísticos del agua de consumo de la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

Dureza total

Frecuencia = 20

Media = 0,28485 g/L

Varianza = 0,00027445

Desviación típica = 0,0165665

Mínimo = 0,266

Máximo = 0,332

Rango = 0,066

Asimetría tipi. = 2,54101

Curtosis tipificada = 2,17486

Con lo que respecta con la dureza total esta no cumple con el parámetro de la norma ya que la dureza tiene que ser 0. Por lo que esa agua tiene que ser tratada ante de usar separa su uso en el generador de vapor.

Dureza de calcio

Frecuencia = 20

Media = 0,20191 g/L

Varianza = 0,000324756

Desviación típica = 0,018021

Mínimo = 0,17 g/L

Máximo = 0,266 g/L

Rango = 0,096

Asimetría tipi. = 4,18379

Curtosis tipificada = 8,04374

Como resultado sobre la dureza de calcio tenemos que esta agua no ha sido tratada previamente ya que el agua que entra al generador de vapor no puede tener calcio ya que puede crear incrustaciones en los tubos de intercambio provocando que se genere menos vapor. Por lo que hay que tratar el agua ante de usarse en calderas.

Dureza permanente

Frecuencia = 20

Media = 0,13342 g/L

Varianza = 0,00320324

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

Desviación típica = 0,0565972

Mínimo = 0,0744 g/L

Máximo = 0,28 g/L

Rango = 0,2056

Asimetría tipi. = 1,79348

Curtosis tipificada = 0,432262

Conductividad

Frecuencia = 20

Media = 0,2955 mS

Varianza = 0,000678684

Desviación típica = 0,0260516

Mínimo = 0,26 mS

Máximo = 0,34 mS

Rango = 0,08

Asimetría tipi. = 0,718029

Curtosis tipificada = -0,416816

Alcalinidad

Frecuencia = 20

Media = 0,1929 g/L

Varianza = 0,000915884

Tratamiento de agua para la generación de vapor en la Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos

Desviación típica = 0,0302636

Mínimo = 0,163 g/L

Máximo = 0,28 g/L

Rango = 0,117

Asimetría tipi. = 3,12309

Curtosis típicada = 2,54572

pH

Frecuencia = 20

Media = 7,33

Varianza = 0,0256

Desviación típica = 0,16

Mínimo = 7,1

Máximo = 7,57

Rango = 0,47

Asimetría tipi. = 0,336728

Curtosis típicada = -1,33216

El pH no cumple con lo establecido con la norma ya que la norma plantea que el agua tratada debe tener un pH mínimo de 9,5. Por lo que esa agua hay que tratarla ante de usarse en el generador de vapor.

3.4 Resultado del tipo de regenerante más factible para la regeneración de la resina.

Las experimentaciones realizadas sobre la resina arrojó como resultado que hay un comportamiento semejante con el empleo de las dos variantes nuevas estudiadas respecto al regenerantes oficial. La tabla 3.1 refleja esos resultados, para los diferentes tiempos de regeneración estudiados.

Tabla 3.1 Resultados del diseño experimental.

Tiempo	90 min	60 min	30 min	15 min
Salmuera	69 minutos	63 minutos	54 minutos	54 minutos
Sal común	60 minutos	51 minutos	45 minutos	45 minutos
Agua de mar	66 minutos	54 minutos	48 minutos	48 minutos

Fuente; Propia

Se detalla a continuación los comentarios de cada experimento.

a) Comparación del tiempo de regeneración de la resina entre la salmuera y la sal común.

Como resultado de esta comparación se tiene cuando se emplea salmuera en la regeneración la resina demora más tiempo en agotarse que cuando se realiza con la sal común. Esto es lógico, no obstante, es un resultado favorable ya que en ausencia de la primera, sí se logra mantener en funcionamiento la unidad, pues la diferencia no es muy elevada. De ahí que se mantenga como recomendación el uso primeramente de la salmuera como regenerante y como segunda alternativa, sal común.

b) Comparación del tiempo de regeneración de la resina entre salmuera y el agua de mar.

De esta comparación se tiene como resultado que con la regeneración con salmuera la resina utilizada se demora más en agotarse que con la regeneración con agua de mar, por lo que se mantendría como en el caso anterior, el empleo de salmuera como primera variante. En este caso se reitera el análisis efectuado en el ejemplo anterior, o sea, que resulta favorable por tener otra opción de tratamiento en caso de necesidad, pues aunque la salmuera brinda mejores resultados, los obtenidos con agua de mar también son muy buenos.

c) Comparación del tiempo de regeneración de la resina entre la sal común y el agua de mar.

Se analizó los tiempos de regeneración de ambos regenerantes por lo que se obtuvo que la regeneración con el agua de mar se demora más en agotarse la resina que con la sal común, por lo que se utiliza primeramente la regeneración con el agua de mar y como segunda solución la sal común.

d) Comparación entre las tres sustancias regenerantes.

En este caso el regenerante más factible para la regeneración de la resina es la salmuera ya que es la regeneración que más demora la resina en agotarse. En caso que de no contar con la salmuera se podría utilizar en segunda opción el agua de mar y en tercera, sal común. No obstante como la variante de empleo como regenerante el agua de mar requiere continuar estudiándose por la composición del agua de mar, para descartar posibles desventajas por las sales y componentes que presenta la misma. Se propone se continúe la investigación con esta alternativa.

3.5 Resultado del diseño de experimentos.

El cálculo de salinidad de la resina arrojó el siguiente resultado.

Salinidad = 5.68 mmol de cargas

La capacidad específica es de 130,64 mmol de cargas.

Conclusiones

- La investigación realizada sobre el sistema de tratamiento de agua de la Universidad de Matanzas aportó dos nuevas variantes para el proceso de regeneración de la resina intercambiadora del ciclo sodio, con lo que se posibilita la estabilidad del sistema de tratamiento aunque exista déficit de la sustancia regenerante oficial, con lo que queda validada la hipótesis.
- La regeneración con el agua de mar fue la de mejor resultados en comparación con el empleo de cloruro de sodio de granulometría fina.
- La caracterización del agua de abasto a la universidad presenta los siguientes valores medios: dureza total $284,85 \text{ mg.L}^{-1}$, dureza permanente $133,42 \text{ mg.L}^{-1}$, dureza de calcio $201,91 \text{ mg.L}^{-1}$ alcalinidad total $192,9 \text{ mg.L}^{-1}$, pH 7,33, conductividad $0,1929 \text{ mS}$ y presenta una salinidad de 5,68 mmol de carga.
- La resina de intercambio iónico empleada para el tratamiento de agua, tiene una capacidad específica de 130,64 mmol de carga.

Recomendaciones.

1. Se recomienda que los resultados de la investigación sean presentados a la dirección de inversiones de la universidad para su conocimiento y seguimiento de su introducción.
2. Se propone se continúe la investigación referidas al empleo del agua de mar para descartar posibles limitaciones de su uso por la composición de la misma.

Bibliografía.

1. Alastor, 2005. Venta de módulos para el tratamiento de agua y oferta de mantenimiento posterior. Empresa de calderas. Matanzas
2. ALASTOR, 2005. Análisis Químicos, filtros, suavizadores y sistemas de enfriamientos. Unidad de Tratamiento de Aguas.
3. Ángel, M. (2005). Conceptos Básicos en Agua de Aporte a Calderas.
4. Betancourt, D.R. (2006) Tratamiento de aguas y aguas residual. Editorial ISPJAE, Ciudad de la Habana.
5. Calidad del agua para generadores de vapor[citado el 25 de enero del 2011]Visitado en <http://www.econext.com.mx/pdf>
6. Características del agua. Citado el 26 de enero del 2011. Disponible en <http://www.acsmedioambiente.com>.
7. Cardona F. et al 1987. Tecnología del agua. Instituto Politécnico PepitoTey. Santiago de Cuba. Cuba.
8. Elección de suavizadores. Aguas de calidad de vapor [en línea]. (2011). Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos35/suavizadores-calderas>.
9. Herrera y Laria, (2001) *Monografía de Intercambio iónico*,
10. Immelblau, D. M. (1997). Basic Principles and calculations Chemical Engineering. Sixth Edition. University of Texas. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A
11. LAOT, N, (1999). Advanced Oxidation Technology.
12. Norma Cubana para agua potable. Requisitos sanitarios y muestreo, NC-93-02:85, 1995
13. Norma británica BS 2486.
14. PNUMA/ORPALC (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente).2005. Proyecto de ciudadanía ambiental global. Oficina Regional para América Latina y el Caribe.

15. Perry, R. (1999) Perry's Chemical Engineers' Handbook. Tabla 28.2. general corrosion properties of some metals and alloys. Tomo I.
16. Rodríguez Pérez de Agreda, C. 2006. Calidad del agua. Instituto superior José Antonio Echeverría. Habana. Cuba.
17. Sait. Introduction to water impurities and treatment. Water treatment. Water 6003: 027-11-28-02, 1997
18. Sait. Potable Water Purification. Water treatment. Water 6005: 027-11-28-05, 1997.
19. Tratamiento de agua. (citado el 25 de enero 2011), disponible en: <http://www.com/secciones/productos>
20. Treybal. Robert, 1996. Operación de transferencia de masa. Segunda edición en español. McGraw- Hill Interamericana, México.
21. Wes McGowan, (1987). *Tratamiento de Agua para el hogar, la agricultura y la industria*, (Manual de Referencia).

Anexo 1. Requisitos máximos para el agua de consumo humano según la

Organización Mundial de la Salud (OMS).

Elemento	Concentración máxima aceptable (mg/L)
Plomo (Pb)	0.1
Hierro (Fe)	0.3
Cobre (Cu)	1.0
Manganeso (Mn)	0.1
Cinc (Zn)	15
Magnesio (Mg)	0.001
Cromo (Cr ⁺⁶)	0.05
Arsénico (As)	0.05
Cadmio (Cd)	0.01
Aceites y grasas	0.3
PH (rango)	6.5 – 9.2
Amonio (NH ₄)	0.5
Nitrato (NO ₃)	4.5
Nitrito (NO ₂)	0.02
Selenio (Sc)	0.05
Bario (Bc)	1.0
Mercurio (Hg)	0.001
Nitrógeno orgánico	-
Ión fosfato (PO ₄)	-
Dureza Total (CaCO ₃)	500
Calcio (Ca)	200

Fuente: Cardona F. et al. (1987)

Anexo 2. Requisitos máximos para el agua de consumo humano en Cuba.

Componente	Límite máximo admisible (mg/L)
pH	6,5 – 8,5
Sólidos totales disueltos	1000
Dureza total (como CaCO₃)	400
Cloruros	250
Sulfoalquilbenceno	0,5
Compuestos fenólicos (referidos al fenol)	0,002
Aluminio	0,2
Cobre	1
Hierro	0,3
Manganeso	0,1
Sodio	200
Sulfato	400
Zinc	5
Arsénico	0,05
Cadmio	0,005
Cianuro	0,07
Cromo VI	0,05
Fluoruros	1,5
Mercurio Total	0,001
Níquel	0,02
Nitrato	45
Nitritos	3,0
Plomo	0,05
Selenio	0,001

Fuente: NC 93-02:1997

Anexo 3: Tabla de los valores de los experimentos.

Horas	Dureza Total mol/L	Dureza de Calcio mol/L	Alcalinidad Total g/L	pH	Conductividad mS	Dureza Permanente mol/L
1 AM	$2.776 \cdot 10^{-3}$	$2.056 \cdot 10^{-3}$	0.180	7.57	0.30	$8 \cdot 10^{-4}$
2 AM	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$1.92 \cdot 10^{-3}$	0.170	7.14	0.29	$1.49 \cdot 10^{-3}$
7 AM	$2.88 \cdot 10^{-3}$	$1.70 \cdot 10^{-3}$	0.190	7.24	0.26	$7.44 \cdot 10^{-4}$
8 AM	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$2.16 \cdot 10^{-3}$	0.170	7.47	0.34	$9.36 \cdot 10^{-4}$
9 AM	$2.66 \cdot 10^{-3}$	$1.94 \cdot 10^{-3}$	0.167	7.55	0.26	$7.68 \cdot 10^{-4}$
10 PM	$2.66 \cdot 10^{-3}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$	0.173	7.37	0.28	$1.94 \cdot 10^{-3}$
11 PM	$2.72 \cdot 10^{-3}$	$1.94 \cdot 10^{-3}$	0.200	7.49	0.26	$9.6 \cdot 10^{-4}$
12 PM	$2.77 \cdot 10^{-3}$	$2.05 \cdot 10^{-3}$	0.200	7.28	0.26	$1.78 \cdot 10^{-3}$
13 PM	$2.96 \cdot 10^{-3}$	$2.02 \cdot 10^{-3}$	0.210	7.19	0.29	$1.28 \cdot 10^{-3}$
14 PM	$3.14 \cdot 10^{-3}$	$2.08 \cdot 10^{-3}$	0.193	7.10	0.30	$9.04 \cdot 10^{-4}$
15 PM	$2.81 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0.280	7.12	0.30	$9.6 \cdot 10^{-4}$
16 PM	$2.72 \cdot 10^{-3}$	$2.136 \cdot 10^{-3}$	0.173	7.54	0.34	$8.8 \cdot 10^{-4}$
17 PM	$2.744 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0.190	7.51	0.33	$7.76 \cdot 10^{-4}$
18 PM	$2.85 \cdot 10^{-3}$	$1.92 \cdot 10^{-3}$	0.233	7.15	0.28	$1.6 \cdot 10^{-3}$
19 PM	$3.32 \cdot 10^{-3}$	$1.98 \cdot 10^{-3}$	0.250	7.30	0.29	$1.2 \cdot 10^{-3}$
20 PM	$2.82 \cdot 10^{-3}$	$2.05 \cdot 10^{-3}$	0.183	7.32	0.29	$1.73 \cdot 10^{-3}$
21 PM	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$1.94 \cdot 10^{-3}$	0.167	7.20	0.30	$1.70 \cdot 10^{-3}$
22 AM	$2.96 \cdot 10^{-3}$	$1.94 \cdot 10^{-3}$	0.163	7.26	0.30	$1.25 \cdot 10^{-3}$
23 AM	$2.93 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	0.183	7.28	0.30	$2 \cdot 10^{-3}$
24 AM	$2.66 \cdot 10^{-3}$	$2.024 \cdot 10^{-3}$	0.183	7.52	0.34	$9.36 \cdot 10^{-4}$

Anexo 4. Suavizador de agua mediante intercambio iónico.

