

Tratamiento de agua para la generación de vapor con un sistema de suavizado y dosificación de productos químicos

(Water treatment for a steam generation system with water softening and chemical dosing)

Samuel Cardozo, Yamilet Sánchez y Haydelba D'Armas

Palabras Clave: tratamiento de agua, generación de vapor, calderas, sistema de suavizado, productos químicos

Key Words: water treatment, steam generation, boilers, softening system, chemicals

RESUMEN

En los sistemas industriales de generación de vapor, el tratamiento del agua de alimentación y del agua contenida en las calderas representa una necesidad para garantizar una operación óptima y segura. A fin de evitar un tratamiento inadecuado de estas aguas, que podría acelerar los procesos de corrosión y formación de incrustaciones, se implementó un plan de tratamiento para asegurar la calidad del agua, con el objetivo de determinar su eficiencia. Se estableció un tratamiento externo e interno, que consistió en la puesta en operación de un sistema de suavizado del agua de alimentación a las calderas, y la dosificación continua de un producto químico anti-corrosivo y anti-incrustante. Se realizó el seguimiento de parámetros fisicoquímicos tales como pH, conductividad, dureza, alcalinidad, sólidos totales, turbidez, hierro, sílice, CO₂ libre, sulfito y fosfato, de las aguas del sistema de generación de vapor en una industria automotriz. La investigación arrojó que el producto químico ensayado logró mantener

los parámetros conductividad < 220 μ S/cm, sólidos totales < 150 mg/L, alcalinidad < 50 mg/L y sílice < 4 mg/L, en valores dentro de los intervalos recomendados para calderas de baja presión, lo cual favorece la operación económica y eficiente del sistema de generación de vapor.

ABSTRACT

In industrial steam generation systems, the treatment of the feed and boiler water is a necessity to guarantee an optimal and safe operation. To avoid an inadequate treatment of these waters, which could accelerate corrosion processes and scale formation, a treatment plan was implemented to ensure water quality, with the objective of determining its effectiveness. An external and internal treatment was implemented, which consisted of putting in to operation a water softening system for the boiler feed water, and the continuous dosing of an anti-corrosive and anti-fouling chemical. Several physicochemical parameters from the steam generation system of an automotive industry were monitored, including pH,

conductivity, hardness, alkalinity, total solids, turbidity, iron, silica, free CO₂, sulfite and phosphate. It was found that the tested chemical product was able to maintain the parameters conductivity < 220 μS/cm, total solids < 150 mg/L, alkalinity < 50 mg/L and silica < 4 mg/L, in minimum values within the recommended limits for low-pressure boilers, which favors the economic and efficient operation of the steam generation system.

INTRODUCCIÓN

Uno de los fines principales del consumo de agua, a nivel industrial, es su uso como elemento de transferencia de calor en procesos de calentamiento. La forma tradicional de suministrar energía calorífica a diversas zonas de un complejo industrial, es la generación de vapor mediante el uso de calderas de diversos tipos (Kohan, 2000). El tratamiento del agua de una caldera de vapor es fundamental para evitar problemas como corrosión, formación de incrustaciones y depósitos, y arrastre de condensado. Estos problemas están relacionados con las impurezas y contaminantes contenidas en el agua, como gases disueltos, sales y minerales (González et al., 2000; Mathur, 2011).

Mejía y Orozco (2008) muestran que el tratamiento inadecuado del agua de caldera es responsable de un 30% de las fallas en calderas pirotubulares. Como consecuencia, uno de los objetivos primordiales en la generación de vapor con calderas es asegurar la calidad del agua de alimentación y del agua

contenida en la caldera, logrando de esta forma tres beneficios principales: maximizar la vida útil del sistema de generación y distribución de vapor, reducir los costos de mantenimiento y mantener una eficiencia térmica óptima.

La calidad de estas aguas se consigue cumpliendo con los requerimientos de las normas, que definen los límites recomendados para los parámetros fisicoquímicos relacionados con el tratamiento de agua. En la Tabla 1 se presentan los requerimientos recomendados del agua de alimentación e interna de una caldera de baja presión (hasta 1 MPa) para prevenir problemas de incrustaciones y corrosión.

Generalmente, el agua cruda industrial es la principal fuente de alimentación a calderas, la cual contiene impurezas y contaminantes que deben ser eliminados (Beall, 2003). Esto se logra mediante tratamientos adecuados, los cuales según González et al. (2000) pueden ser clasificados en: tratamientos externos que incluyen todos aquellos que convencionalmente pueden ser aplicados al agua bruta de alimentación, como la desgasificación y el suavizado, y tratamientos internos que comúnmente comprenden todas las dosificaciones de productos químicos que acondicionan el agua ya tratada con la que se pretende alimentar la caldera.

A fin de evitar el tratamiento inadecuado de las aguas de caldera, surge la necesidad de establecer un plan de tratamiento que asegure la calidad

del agua. Por esta razón, en el presente trabajo, se realizó el seguimiento de algunos parámetros fisicoquímicos para el diagnóstico de estas aguas en el

sistema de generación de vapor en una planta automotriz, con el objetivo de implementar un tratamiento externo e interno y determinar su eficacia.

Tabla 1. Límites máximos recomendables de los parámetros del agua de alimentación y de la contenida en una caldera de baja presión (hasta 1 MPa)

Parámetro	Alimentación	Caldera	Parámetro	Alimentación	Caldera
Alcalinidad total [mg CaCO ₃ /L]	25	700	pH a 25 °C	8,5 - 9,5	10,5- 11,5
Alcalinidad cáustica [mg CaCO ₃ /L]	-	300 - 400	Oxígeno [mg O ₂ /L]	0,008	-
Dureza total [mg CaCO ₃ /L]	2	-	Hierro total [mg Fe/L]	0,05	3
Dióxido de carbono [mg CO ₂ /L]	25	-	Cobre total [mg Cu/L]	0,01	-
Contenido de aceite [mg/L]	1	-	Sílice [mg SiO ₂ /L]	-	125
Sólidos disueltos [mg/L]	-	3500	Turbidez [NTU]	20	175
Sólidos suspendidos [mg/L]	-	300	Sulfito [mg SO ₃ /L]	-	30
Conductividad [μS/cm]	3500	7000	Fosfato [mg PO ₄ /L]	-	20 - 50
Condición general	Incolora y clara		Libre de agentes insolubles		

Fuente: González et al., 2000; Oelker, s.f.; Branán, 2000; Flynn, 2009.

METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra un esquema simplificado del sistema de generación de vapor de la industria automotriz. El sistema está comprendido por dos calderas piro-tubulares de 125 HP (marca Continental, modelo 448-125, de 2 pasos), un tanque para el agua de

alimentación (marca Continental, modelo CTI-440), y un equipo de suavizado de agua (marca Continental, modelo 20-0150-M). El vapor generado por las calderas es utilizado para controlar la temperatura de tres etapas del proceso de pre-tratamiento de carrocerías, cuyo propósito es hacer las

partes metálicas del automóvil más resistentes a la corrosión y al desgaste, así como lograr que la superficie sea más apta para recibir la capa de esmalte (Cardozo, 2010).

El análisis de las aguas del sistema de generación de vapor estuvo comprendido por la puesta en operación y estudio del sistema de suavizado del

agua de alimentación a las calderas, una evaluación preliminar de las aguas previo a la implantación de los tratamientos, la aplicación y determinación de la efectividad del tratamiento interno, y finalmente, la determinación de la eficiencia de las calderas.

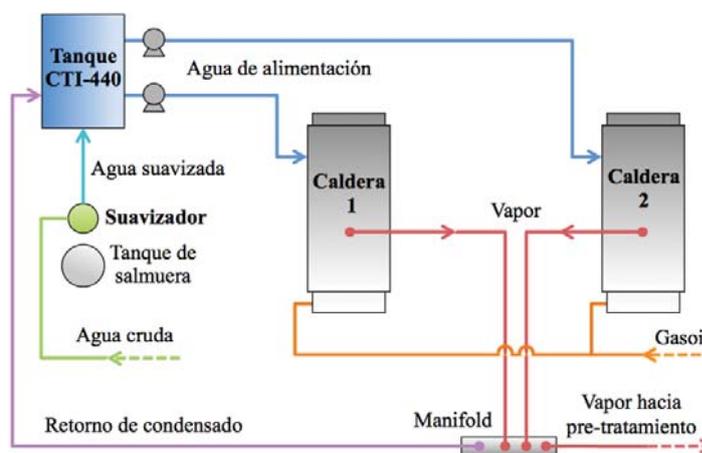


Figura 1. Sistema de generación de vapor de la industria automotriz

Evaluación del sistema de suavizado

Para evaluar el estado inicial de la resina se tomó una muestra del agua de entrada y de salida al suavizador, y se determinó su dureza. En vista de que fue detectado un alto contenido de dureza en el agua de salida, se procedió a la regeneración inmediata de la resina del equipo. La regeneración se llevó a cabo en cinco etapas principales (preparación de la salmuera, retrolavado, regeneración, enjuague y servicio), según especificaciones para estos equipos industriales (Cardozo,

2010; Avilla, 2002; Klenck, 1998). Una vez regenerada la resina, se realizó un seguimiento diario de la dureza total del agua cruda industrial, del agua suavizada, y del agua de alimentación a las calderas, durante 25 días.

Comportamiento previo al tratamiento químico

Se realizó un seguimiento diario de la conductividad (conductímetro marca HANNA Instruments, modelo HI 8033) y pH (pH-metro marca OAKTON, modelo pH 10 Series) del agua suavizada, de alimentación y del agua

contenida en las calderas. El muestreo tuvo una duración de 15 días, a razón de 3 muestras diarias (cada 3 h durante la jornada de trabajo). Adicionalmente, se determinaron otros parámetros fisicoquímicos de interés (IUT, 2001; McCoy, 1969) de manera puntual después del primer y segundo mes, posterior a la puesta en operación del suavizador: dureza total y alcalinidad total (por titulación volumétrica); sílice (por espectrofotometría); hierro total (por absorción atómica a la llama); y sólidos totales (por gravimetría).

Aplicación del tratamiento interno

Una vez culminada la evaluación preliminar y la puesta en marcha del sistema de suavizado, se procedió con la aplicación del tratamiento interno. El producto químico (líquido claro amarillento, densidad: $1,2 \pm 0,2$ kg/m³, pH al 1%: $11,3 \pm 0,2$) se dosificó de forma

manual a razón de 15 mL/h, directamente al tanque de alimentación. La tasa de dosificación se calculó con base al caudal de alimentación promedio por caldera y las especificaciones del fabricante (Cardozo, 2010). Esta cantidad se mantuvo durante los 12 días establecidos para el ensayo, asumiendo la inexistencia de variaciones significativas del caudal de alimentación.

Para evaluar la efectividad del tratamiento se llevó a cabo un seguimiento interdiario de los siguientes parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, dureza total, alcalinidad total, sílice, sólidos totales, turbidez (turbidímetro portátil marca Orbeco-Hellige, modelo 966), fosfato, sulfito y dióxido de carbono libre (mediante titulación volumétrica).

RESULTADOS

Evaluación del sistema de suavizado

En la Figura 2 se muestra la variación temporal de la dureza total de los tres tipos de agua evaluados, tras la regeneración de la resina del suavizador. Se puede observar que previo a la regeneración (día 0), la dureza era aproximadamente igual a 78 mg CaCO₃/L. El hecho de que el agua de entrada y de salida del suavizador tuvieran los mismos niveles de dureza es indicativo de que la resina de intercambio iónico, encargada de

la remoción de los iones de Ca⁺² y Mg⁺² (Rondón, 2003), se encontraba saturada, impidiendo el tratamiento adecuado del agua cruda. Adicionalmente, según las recomendaciones expuestas en la Tabla 1, la dureza de la alimentación debe mantenerse por debajo de los 2 mg/L. Sin embargo, la misma se ubicaba unas 40 veces por encima del límite recomendado. La detección de un nivel tan elevado de dureza es una condición alarmante, puesto que representa la principal causa de formación de incrustaciones en los

sistemas con calderas (Flynn, 2009; Bolma, 2005).

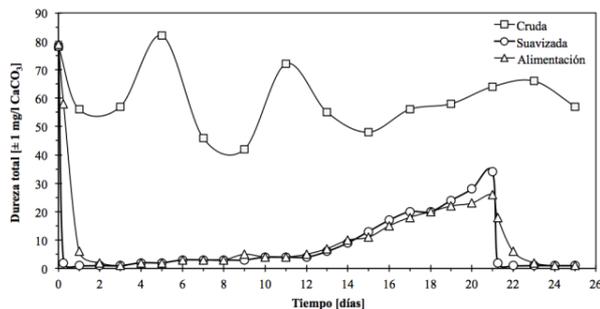


Figura 2. Variación temporal de la dureza de las aguas del sistema de suavizado

Una vez regenerada la resina, para el día 1, se aprecia un descenso drástico de la dureza del agua suavizada a 1 mg/L, lo que simboliza una disminución del 99%. Estos valores muestran que la regeneración de la resina fue efectiva. A partir de este punto, se observa un ascenso gradual de la dureza hasta el día 12, momento a partir del cual la dureza en el agua suavizada comienza a aumentar a una tasa mayor, hasta el día 21, cuando se volvió a regenerar la resina. El aumento en la velocidad de aparición de dureza, puede deberse a que ya para ese día la mayor parte de los sitios activos de la resina se encontraban agotados, lo que trajo como consecuencia un aumento significativo en la dureza.

Por otra parte, también se puede observar que la dureza del agua de alimentación tiene un comportamiento casi idéntico al mostrado por el agua suavizada, tomando valores ligeramente inferiores la mayor parte del tiempo. Este hecho podría atribuirse a que el agua de alimentación a

las calderas es la combinación del agua suavizada y del condensado que se retorna al tanque CTI-440. Este condensado, debido a su naturaleza, está prácticamente libre de impurezas (Flynn, 2009), por lo que al mezclarse con el agua suavizada en el tanque de alimentación, tiene un efecto de dilución.

La condición a la que se dispone el agua cruda es un factor que dependerá del suministro local de agua, por lo que se debe garantizar el funcionamiento óptimo del suavizador para no comprometer el tratamiento externo del agua de alimentación. La frecuencia de regeneración dependerá del límite de dureza que se establezca como máximo admitido en el agua de alimentación. Como se mencionó anteriormente, el límite recomendado es 2 mg/L, pero éste puede ser mayor, por ejemplo, si adicional al ablandamiento se está aplicando un tratamiento químico que ayude a combatir los problemas de dureza.

Generalmente, los tratamientos químicos indican cual es el máximo de dureza en el agua de alimentación con el que pueden trabajar, como es el caso del producto químico ensayado, que trabaja con una dureza de hasta 20 mg/L (Cardozo, 2010). Mientras mayor sea el límite de dureza admitida, menor será la frecuencia de regeneración, y por ende, también el consumo de salmuera (regenerante). Así, regenerando la resina al alcanzar los 20 mg/L de dureza, en vez de los 2 mg/L, se reduce el consumo de salmuera en 75%. Por lo visto, la elección del punto de

regeneración tiene un efecto significativo sobre el consumo de regenerante, que representa el principal gasto de operación en el uso de suavizadores (Webber, 2003), por lo que debe hacerse tomando en cuenta si existe un tratamiento químico posterior, de manera de lograr la mejor sinergia entre ambos tratamientos.

Estudio preliminar de las aguas de caldera
En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la conductividad de las aguas, previo al tratamiento interno. Se observa como la variación de la conductividad del agua suavizada y de alimentación presenta el mismo comportamiento en el tiempo, con la diferencia de que esta última tiende a tener una conductividad ligeramente inferior ($\sim 15 \mu\text{S}/\text{cm}$ menor). Este comportamiento podría deberse al hecho de que el agua de alimentación es producto de la combinación del suministro de agua industrial suavizada, y el retorno de condensado, que según estimaciones representa un 17% del agua de alimentación a las calderas ($\sim 40 \text{ kg}/\text{h}$).

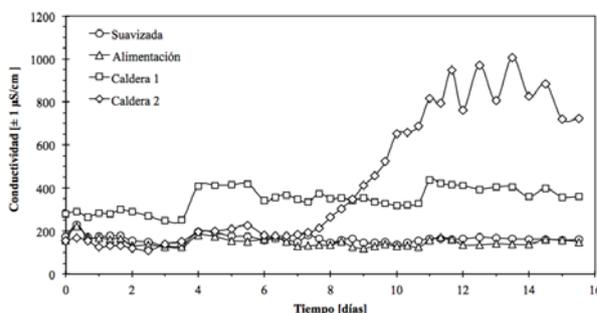


Figura 3. Variación de la conductividad de las aguas previo al tratamiento químico

El condensado formado de un vapor muy puro tiene una conductividad inferior a $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Flynn, 2009), mientras que el agua suavizada mantuvo una conductividad promedio de $163 \mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que podría inferirse que la unión de estas dos fuentes de agua daría como resultado una conductividad intermedia, tal como es el caso del agua de alimentación a las calderas, cuya conductividad promedio fue de $148 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Vale la pena acotar que la conductividad del agua de alimentación no superó los $223 \mu\text{S}/\text{cm}$, valor que se encuentra muy por debajo del límite máximo recomendado de $3500 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabla 1). Según los estándares de la empresa, la conductividad habitual del agua cruda no supera los $280 \mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que se puede inferir que su medición constante no resulta imprescindible para el control de la calidad de esta agua, sino otros parámetros como pH, dureza, alcalinidad, hierro y gases disueltos.

Se puede apreciar que la conductividad del agua de la caldera 1 no mostró mayor variación durante el período de estudio, lo que podría ser consecuencia de que no estuvo en operación la mayor parte del tiempo. A raíz de esto, la caldera 2 se mantuvo en operación continua, lo cual explicaría el incremento constante de la conductividad del agua de esta caldera. A medida que el agua se transforma en vapor, los sólidos disueltos totales (SDT) que entran con el agua de alimentación se van concentrando dentro de la caldera (McCoy, 1969). Esta tendencia se refleja en

el valor de la conductividad, debido a que la misma está directamente relacionada con el contenido de sólidos en el agua (Branan, 2000), lo que resulta de gran utilidad práctica para el control de los SDT en el agua de las calderas de la empresa.

En la Figura 4 se muestra el comportamiento del pH de las aguas, previo al tratamiento químico. Al igual que la conductividad, el pH del agua suavizada y de alimentación a las calderas mostraron un comportamiento similar, que puede ser atribuido, tal como en el caso anterior, a que el agua de alimentación está compuesta, en su mayoría, por agua suavizada. El pH del agua de alimentación osciló entre 7,35 y 8,23, valores que se encuentran fuera del rango recomendando para calderas de baja presión (entre 8,5 y 9,5).

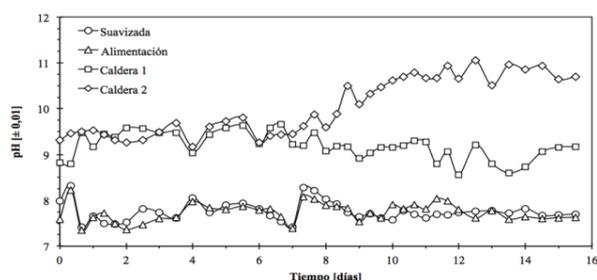


Figura 4. Variación del pH de las aguas previo al tratamiento químico

En el caso del agua de la caldera 1, el pH de la misma varió entre 8,56 y 9,66 con un comportamiento no definido, mientras que el pH del agua de la caldera 2 mostró una tendencia a aumentar con el tiempo, reportándose un pH mínimo de 9,17 y un pH máximo de 11,05. A pesar de que un pH por encima de 9,3 reduce la corrosión por oxígeno, la reacción del hierro con el

agua aún ocurre bajo estas condiciones (McCoy, 1969):



Sin embargo, estudios muestran que al aumentar la alcalinidad del agua se reduce la solubilidad del hierro, y aunque la corrosión no se elimina completamente, se ha observado que a un pH de 11,5 resulta ser mínima (González et al., 2008). En vista de ello, resulta aconsejable la aplicación de un tratamiento que logre controlar el pH del agua, de manera de minimizar la influencia de este factor sobre las reacciones químicas entre el agua interna de las calderas y sus partes metálicas.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos de las aguas del sistema de generación de vapor, durante el primer y segundo mes de puesta en operación del suavizador, previo a la aplicación del tratamiento interno. Es posible apreciar que con el uso del suavizador se disminuyeron los niveles de dureza y alcalinidad en el agua de las calderas, manteniéndose la alcalinidad muy por debajo del máximo permitido (700 mg/L). Adicionalmente, se puede observar como el contenido de sílice en las calderas aumentó, lo cual puede ser atribuido al aumento de sus ciclos de concentración debido a la constante evaporación del agua, al igual que ocurre en el caso de los sólidos totales en la caldera 2.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de las aguas analizadas durante el tiempo previo a la aplicación del tratamiento interno

Parámetro [mg/L]	Alimentación		Caldera 1		Caldera 2	
	Mes 1	Mes 2	Mes 1	Mes 2	Mes 1	Mes 2
Dureza total	86	38	200	40	70	36
Alcalinidad total	70,4	26,2	80,4	36,0	40,2	42,0
Sílice	2,53	1,62	2,49	3,06	1,61	3,57
Hierro	0,33	0,75	0,38	0,70	19,62	13,21
Sólidos totales	-	-	300	90	90	140

Con respecto al contenido de hierro en la alimentación y en el agua de la caldera 2, el mismo no debería superar los 0,05 mg/L y 3 mg/L, respectivamente. La alta concentración de hierro en estas aguas puede ser indicativo de serios problemas de corrosión en el sistema de generación de vapor, tanto de las superficies internas de la caldera, como de las líneas de retorno de condensado.

En años recientes, la remoción efectiva del Ca^{+2} y Mg^{+2} del agua de alimentación ha conllevado a que las fallas de calderas sean causadas predominantemente por la formación de depósitos de hierro sobre las superficies de transferencia (Flynn, 2009). Estos depósitos son porosos, lo que permite la entrada y concentración de sustancias químicas reactivas que empeoran los problemas de corrosión, y a su vez actúan como aislantes térmicos, pudiendo llegar a ocasionar fallas por sobrecalentamiento. Resulta evidente, que adicional al tratamiento externo, es

necesario la implementación de un tratamiento interno, que permitirá trabajar a mayores ciclos de concentración, reducir las pérdidas de energía por purgas, y disminuir la tendencia hacia la formación de incrustaciones y corrosión del sistema, logrando operar las calderas de manera óptima y económica.

Comportamiento de las aguas durante el tratamiento químico

A continuación se describe el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación y de las calderas durante el tratamiento químico a fin de evaluar la efectividad de dicho tratamiento.

- pH y conductividad

En la Figura 5 se muestra la variación del pH de las aguas analizadas, donde se puede apreciar que el pH del agua de alimentación, en general, tuvo un ligero incremento con relación al punto de partida, manteniéndose por debajo del

rango recomendado para este tipo de agua (Tabla 1), al igual que el pH del agua de la caldera 2. En el caso de la caldera 1, el pH mostró un comportamiento similar al observado en el estudio preliminar, posiblemente en vista de que la misma no estuvo operativa durante el período de muestreo.

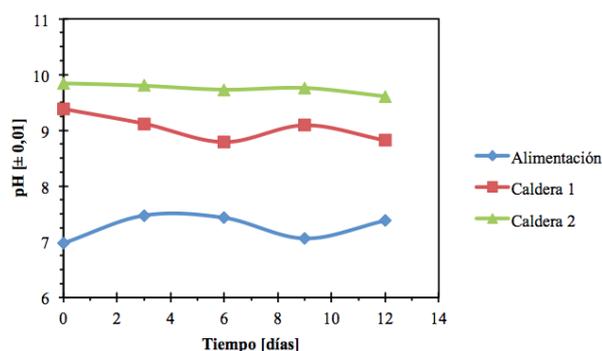


Figura 5. Variación del pH de las aguas durante el tratamiento químico

Con la finalidad de controlar la corrosión y formación de incrustaciones, cuando se realizan tratamientos internos, es aconsejable mantener el pH del agua de la caldera en el rango de 10,5 a 11,5. Debido al comportamiento observado del pH del agua de alimentación y de la caldera 2, se puede inferir que el producto ejerció un leve efecto alcalinizante. Por otra parte, la Figura 6 muestra la variación de la conductividad. En la misma se puede apreciar que la conductividad del agua de alimentación mostró poca fluctuación, en comparación con los valores obtenidos para el agua de las calderas, que mostraron un descenso progresivo; manteniéndose en un valor promedio de 95 y 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para las calderas 1 y 2,

respectivamente. Estos valores se ubican muy por debajo de la conductividad estándar recomendada en este caso (7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) para un control adecuado de los SDT.

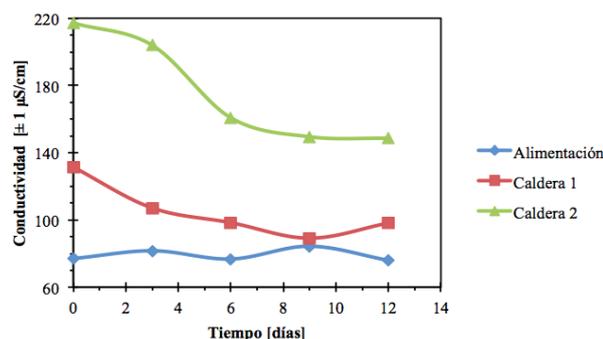


Figura 6. Variación de la conductividad de las aguas durante el tratamiento químico

- Sólidos totales y turbidez

Los resultados obtenidos en el caso de los sólidos totales se reflejan en la Figura 7, donde se observa un ligero incremento y luego un descenso gradual de los mismos. De acuerdo con lo observado, el producto añadido condujo a resultados favorables, ya que posiblemente la disminución en el contenido de sólidos en el agua de la caldera puede ser debida a que uno de los componentes químicos del producto reacciona con los cloruros, sulfatos y carbonatos del agua, para producir compuestos que se depositan, pero no se adhieren a las superficies (Milena, 1988), los cuales son eliminados mediante la purga de fondo, junto con parte del lodo y otras impurezas sólidas que se encuentran allí.

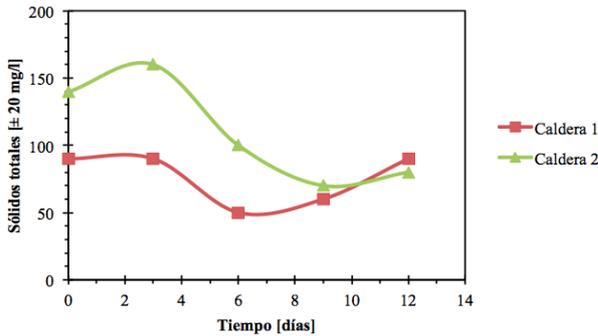


Figura 7. Variación de los sólidos totales en las aguas durante el tratamiento químico

En relación a la turbidez (Figura 8), se observó un incremento de su valor para ambas aguas (calderas 1 y 2), mientras que la turbidez del agua de alimentación fluctuó alrededor de su valor inicial. En vista del comportamiento mostrado por este parámetro, y de que el mismo depende en gran medida de la materia en suspensión, se puede inferir que el tratamiento químico aplicado ocasionó la formación de partículas sólidas, que originalmente se encontraban disueltas en el agua, sumándose a la contribución del efecto de concentración causado por la evaporación continua del agua de la caldera.

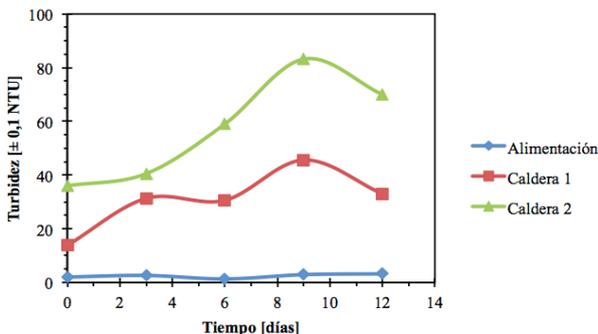


Figura 8. Variación de la turbidez de las aguas durante el tratamiento químico

- Dureza, alcalinidad y dióxido de carbono libre

Según se aprecia en la Figura 9, la dureza del agua de ambas calderas mostró un comportamiento oscilatorio durante el período de análisis, fluctuando entre 35 y 50 mg/L; además, el contenido de dureza en la alimentación se mantuvo en un rango inferior, presentando un mínimo de 28 mg/L. En ambos casos, los valores están por encima de los recomendados para estos sistemas. Este mismo comportamiento fue observado en el estudio preliminar, donde se obtuvo una dureza promedio de 38 mg/L con la puesta en funcionamiento del suavizador (Tabla 2), lo cual sugiere que en este caso el producto utilizado no es el más adecuado para mantener mínimos los niveles de dureza, asociados con la formación de incrustaciones y depósitos cálcicos y magnésicos.

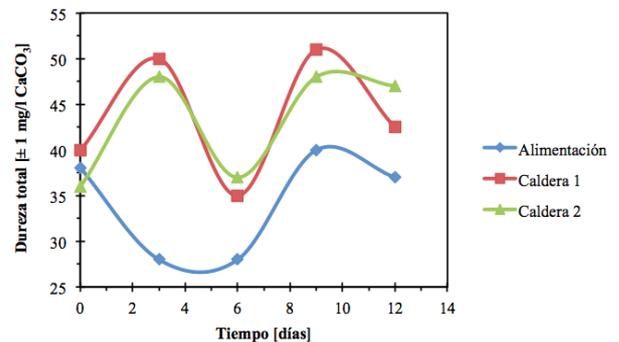


Figura 9. Variación de la dureza total de las aguas durante el tratamiento químico

En el caso de la alcalinidad, se puede observar en la Figura 10 que los valores oscilaron entre un mínimo de 24 mg/L y un máximo de 51 mg/L, los cuales se

encuentran por debajo del margen aceptable (< 700 mg/L). Adicionalmente, es posible apreciar que la alcalinidad del agua de alimentación se mantuvo a una concentración cercana a la recomendada (< 25 mg/L). Estas observaciones reflejan que el producto ensayado regula en gran medida las concentraciones de los carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, responsables de la alcalinidad en el medio.

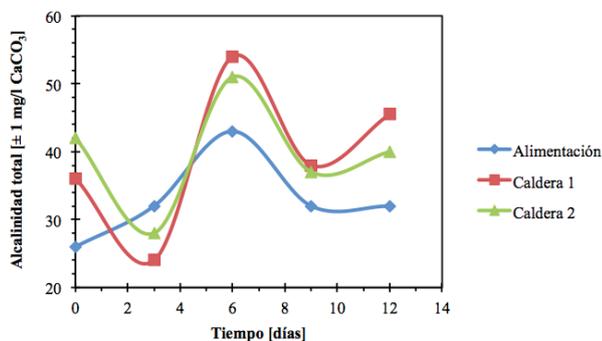


Figura 10. Variación de la alcalinidad total de las aguas durante el tratamiento químico

Los contaminantes principales que conllevan a la corrosión de las líneas de vapor y de retorno de condensado, son los gases contenidos en el vapor generado, siendo el dióxido de carbono el más común de ellos. Para este caso, la concentración de CO₂ libre en el agua de alimentación a las calderas permaneció en un valor promedio de 2,9 mg/L (Figura 11), el cual es aproximadamente 9 veces inferior al máximo recomendado. Tomando en consideración la baja alcalinidad detectada, se puede establecer que la formación de CO₂ se ve desfavorecida, disminuyendo así los daños por corrosión.

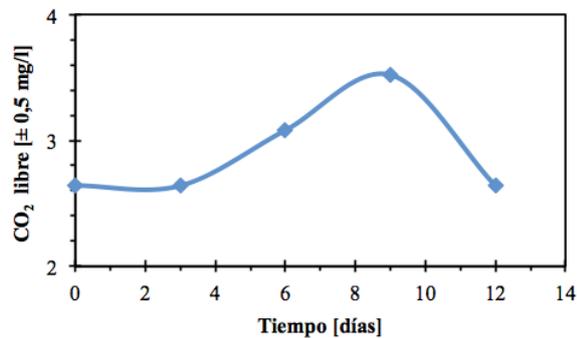


Figura 11. Variación del CO₂ libre en la alimentación a las calderas durante el tratamiento

- Sílice, sulfito y fosfato

Primordialmente, los depósitos de sílice se encuentran en los sistemas de vapor de baja presión, donde el sistema de pre-tratamiento no está diseñado para la remoción de sílice, es decir, el suavizado con resinas catiónicas a base de sodio, o donde la caldera está operando con ciclos de concentración excesivos (Zhou et al., 2012). La variación del contenido de sílice de las aguas se muestra en la Figura 12. Al comparar los resultados obtenidos para este parámetro, durante todo el período de estudio, se observa poca variación en la concentración de sílice en las aguas analizadas, manteniéndose en un valor muy inferior al recomendado (< 125 mg/L).

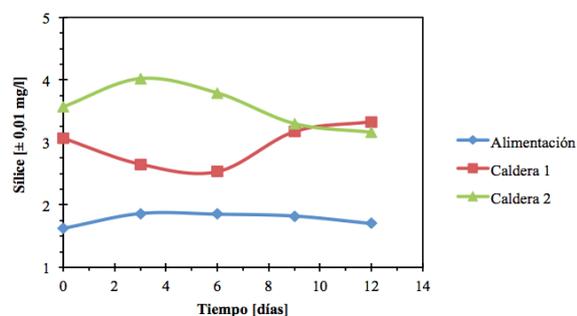


Figura 12. Variación del contenido de sílice en las aguas durante el tratamiento interno

En la Figura 13 se presenta la variación del contenido de sulfitos, el cual mostró un descenso en la caldera 1 y en el agua de alimentación, manteniéndose constante en la caldera 2, con un valor promedio de 0,4 mg/L. La importancia de los sulfitos radica en su capacidad para reaccionar con el oxígeno disuelto en el agua de alimentación antes de que éste ingrese a las calderas, donde ocasiona severos daños por corrosión, formando depósitos de óxidos metálicos.

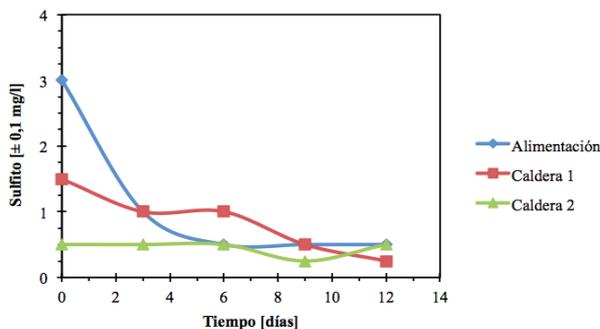


Figura 13. Variación del contenido de sulfitos en las aguas durante el tratamiento interno

Por último, en la Figura 14 se ilustra el comportamiento del contenido de fosfatos.

Eficiencia térmica de las calderas

En la Tabla 3 se muestran los valores registrados para el cálculo de la eficiencia térmica de la caldera. Además, estas variables sirvieron para realizar una serie de aseveraciones referentes al sistema de generación de vapor. Se observa que la temperatura del agua de alimentación se mantuvo alrededor de los 39 °C. Sin embargo, según indicaciones del fabricante (Técnicas de Calderas C.A.,

Se observa un incremento de este parámetro en el agua de alimentación, a medida que desciende en la caldera 2; sin embargo, la concentración de fosfatos se mantuvo, luego de unos días de dosificación, en un valor promedio de 0,50 mg/L y 0,26 mg/L, para el agua de alimentación y de las calderas, respectivamente. Los fosfatos resultan de vital importancia ya que ayudan a controlar el pH, y dar protección contra la dureza, precipitando las sales de calcio y magnesio.

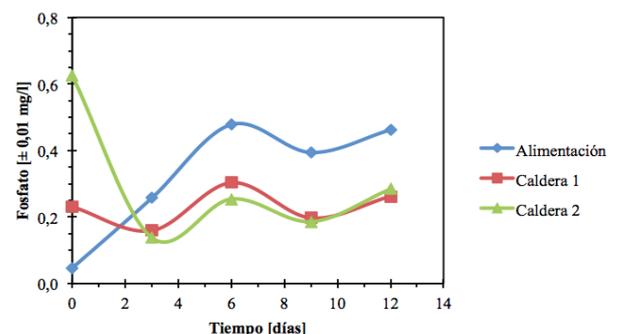


Figura 14. Variación del contenido de fosfatos en las aguas durante el tratamiento interno

2006), esta temperatura debería ubicarse alrededor de los 60 a 90 °C para garantizar un mejor rendimiento de la caldera. El aumento de la temperatura de alimentación podría lograrse incrementando el retorno de condensado, lo que ayudaría a reducir los requerimientos de combustible, minimizar los problemas relacionados con la calidad del agua, y disminuir los costos de tratamiento (Flynn, 2009).

Consecuentemente, es recomendable que se plantee la posibilidad de establecer un mecanismo para la recuperación del vapor

que condensa en su trayectoria hacia los distintos puntos de aplicación en la planta.

Tabla 3. Temperatura del agua de alimentación (T_A), presión (P_V) y temperatura (T_V) del vapor, temperatura de los gases de chimenea (T_{GC}), flujo de vapor (), consumo de combustible (), y eficiencia de la caldera (), durante los días de ensayo

Día	T_A	P_V	T_V	T_{GC}			
	[± 1 °C]	[± 10 kPa]	[°C]	[± 5 °C]	[± 6 kg/h]	[$\pm 0,7$ kg/h]	[$\pm 5\%$]
1	39	850	173	224	239	19,2	77
2	35	810	171	224	244	20,5	74
3	43	820	172	225	210	16,2	79
4	36	820	171	229	200	16,0	78
5	42	830	172	229	284	22,4	78
Promedio	39	830	172	226	235	18,9	77

Según los valores en la Tabla 3 la diferencia entre la temperatura promedio del vapor y la temperatura promedio de los gases de chimenea fue de 54 °C. La temperatura de los gases de chimenea, en condiciones normales de operación, no debe sobrepasar por más de 57 °C la temperatura del vapor producido (Técnicas de Calderas C.A., 2006). Una temperatura excesiva en la chimenea es señal de que la caldera está operando con una graduación incorrecta de aire o se encuentra sucia, y por lo tanto, se está desperdiciando calor. Para corregir esta situación, resulta recomendable efectuar una revisión adecuada de la caldera, de sus componentes externos e internos, con la intención de garantizar su funcionamiento óptimo.

Se obtuvo que la eficiencia térmica de la caldera osciló entre el 74 y el 79%, tomando un promedio de 77%, valor que se ubica dentro del intervalo teórico para

calderas pirotubulares de múltiples pasos (entre 73 y 83%) (Saxxon, 2006). Sin embargo, no se puede afirmar si la caldera se encuentra operando fuera del rango estipulado por el fabricante (del 80 al 85%), debido a que el error asociado a la estimación de la eficiencia es del 5%. En la determinación de la eficiencia por el método directo, el principal factor que contribuye al error de esta medida es el error asociado al cálculo de los flujos, el cual no debe exceder el $\pm 0,75\%$ del valor calculado (Lipták, 1987). En el caso de los cálculos realizados, el error relativo al flujo de vapor y de combustible, fue del 2,5% y 3,7%, respectivamente, lo cual vendría siendo una limitación del método empleado.

CONCLUSIONES

Se puede inferir que el tratamiento externo e interno aplicado en las calderas, tuvo un buen desempeño en el control de la calidad de las aguas, lográndose mantener los parámetros estudiados, como conductividad, dureza, alcalinidad, sílice, sólidos totales y CO₂ libre, en valores mínimos dentro del rango recomendado para evitar en lo posible problemas de corrosión e incrustaciones.

Se hace necesario evaluar otros factores que influyen sobre la eficiencia térmica global de las calderas, como es el caso de la relación aire-combustible y la eficiencia de combustión.

Referencias Bibliográficas

Avilla, J. (2002). Lo esencial acerca del intercambio iónico. *Agua Latinoamérica*. 2(3), 1-3.

Beall, G. (2003). The use of organo-clays in water treatment. *Applied Clay Science*. 24, 11-20.

Branan, C. (2000). *Soluciones prácticas para el ingeniero químico*. 2da edición. México: McGraw-Hill.

Bolma, A. (2005). The premature degradation of ion exchangers resins used in the water treatment for steam generators and the evaluation of its consequences. *IEEE Russia Power Tech*. 1-3.

Cardozo, S. (2010). Optimización del sistema de generación de vapor en una planta automotriz. Tesis de Grado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela.

Flynn, D. (2009). *The Nalco Water Handbook*. 3era edición. Estados Unidos: McGraw-Hill.

González, J., Peña, J. y Susial, P. (2000). Tratamientos externos e internos del agua para calderas: Influencia en el coste del vapor producido. *Ingeniería Química (Madrid)*. 32(369), 147-156.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (2007). *Guía técnica: Procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas*. España: Ahorro y Eficiencia Energética en Climatización, Vol. 5.

Instituto Universitario de Tecnología (2001). *Guía de laboratorio de tratamiento de aguas*. Cumaná, Venezuela.

Klenck, T. (1998). *How it works: water softener*. Estados Unidos: Popular Mechanics. Documento en línea. Disponible en: http://www.popularmechanics.com/home/improvement/interior/1275126?click=img_sr.

Kohan, A. (2000). *Manual de Calderas*. 1era edición, Vol. 1. España: McGraw-Hill.

Lipták, B. (1987). *Optimization of Unit Operations*. Estados Unidos: Chilton Book Company.

Mathur, P. (2011) Reduce energy & water consumption by using polyamines/amines based all organic, phosphate free treatment, for boiler feed water. *Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*. 23(2), 200-202.

McCoy, J. (1969). *Chemical Analysis of Industrial Water*. Estados Unidos: Chemical Publishing Company, Inc.

Mejía, J. y Orozco, W. (2008). *Calderas de vapor*. Instituto Tecnológico Metropolitano, Colombia. Documento en línea. Disponible en: <http://www.scribd.com/doc/53197887/calderas>.

Milena, S. (1988). *Tratamiento de aguas y limpieza química para equipos industriales*. Instituto de Mejoramiento Profesional, Colegio de Ingenieros, Venezuela.

Oelker, A. (s.f.). Artículo técnico: Costo de generación de vapor. Thermal Engineering Ltda., Chile. Documento en línea. Disponible en Internet: <http://www.thermal.cl>.

Rondón, R. (2003). Guía de tratamiento de aguas. Instituto Universitario de Tecnología, Departamento de Química Aplicada, Cumaná, Venezuela.

Saxxon, F. (2006). Tolley's Industrial and Commercial Gas Installation and Practice: Gas Service Technology. 4ta edición, Vol. 3. Gran Bretaña: Elsevier.

Técnicas de Calderas, C.A. (2006). Calderas Automáticas Continental: Catálogo de Mantenimiento de Calderas. Distribuidor Exclusivo del Grupo Avellan, Venezuela.

Webber, W. (2003). Control de la calidad del agua. España: Editorial Reverte.

Zhou, Y., Guo, X., Li, L. y Zhu, Z. (2012). Causes, analysis and treatment measures for excess SiO₂ content in a 300MW unit boiler water. Advanced Materials Research. 361-362, 1859-1862.

Autores

Samuel Cardozo. Ingeniero Químico, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Candidato a MSc en Ingeniería Química, University of Alberta, Edmonton, Canadá.

Email: samuel_cardozo@hotmail.com

Yamilet Sánchez. Ingeniero Químico, MSc en Ingeniería Química, Candidato a Doctor en Ingeniería, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Profesor Asociado adscrita al Departamento de Procesos y Sistemas de la Universidad Simón Bolívar.

Email: ysanchez@usb.ve

Haydelba D'Armas. Licenciado en Química (Universidad de Oriente), MSc en Oceanografía Química (Instituto Oceanográfico de Venezuela), PhD en Química (University of The West Indies, Trinidad y Tobago). Profesor Titular e Investigador adscrita al Departamento de Química, Escuela de Ciencias, Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre.

Email: haydelba@yahoo.com

Recibido: 14/07/2011

Aceptado: 30/12/2011