

Sistema de tratamiento de agua proveniente del Lago de Maracaibo para su utilización como agua para calderas

Vanessa Belzares, Tomas Silva y Arrieta Arelis

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química.
Maracaibo, Venezuela.

Correo electrónico: belzares.vanessa@gmail.com, tomasfsilvam@gmail.com y ingarelisarrieta@gmail.com

Recibido: 21-01-2020 Aceptado: 09-07-2020

Resumen

El presente estudio tuvo como finalidad proponer un sistema de tratamiento para el agua proveniente del Lago de Maracaibo a fin de utilizarse como agua para calderas. El proceso investigativo fue de tipo descriptivo con diseño experimental y documental, empleando la observación estructural y documental. Para la realización de esta investigación, se procedió a la caracterización de la muestra de estudio. Conforme a lo obtenido, se diseñó un sistema de tratamiento al agua del Lago de Maracaibo para emplearla como agua de alimentación para calderas y adquirir un agua de alta calidad. Este diseño se realizó en base a las etapas típicas de un tratamiento de agua, también se sugirió el orden secuencial y los equipos necesarios para el mismo. Los resultados indicaron que el agua proveniente del Lago de Maracaibo requiere de una serie de etapas de tratamiento para lograr que esta cumpla con lo estipulado en la norma BS 2486:1997.

Palabras clave: Agua, caracterización, tratamiento, caldera, diseño.

Water treatment system from Lake Maracaibo to use it as boiler feedwater

Abstract

The objective of this study was to propose a water treatment system from Lake Maracaibo for use as boiler water. The research process was descriptive with experimental and documentary design, using structural and documentary observation. For the realization of this investigation, the study sample went into the process of characterization. According to the results, proceeded to perform a water treatment system of Lake Maracaibo for feedwater for boilers to acquire high quality water. This design created based on the typical stages of a water treatment; also were suggested the sequential order and the necessary equipment for it. The results indicated that water from Lake Maracaibo requires a series of treatment stages to ensure that it complies with the provisions of BS 2486: 1997.

Key words: Water, characterization, treatment, boiler, design.

Introducción

El agua es el solvente universal más utilizado en procesos industriales debido a su bajo costo y fácil acceso, y a su vez por su calor específico, ya que almacena y absorbe gran cantidad de calor, actuando como un termorregulador. En la práctica esta es empleada para la generación de vapor, agua de enfriamiento, producción de materia prima, así como para el mantenimiento de los equipos. Cabe resaltar que previo al uso de esta en dichos procesos industriales esta debe ser sometida a un pretratamiento para asegurar que cumpla con los estándares de calidad necesarios y así certificar la eficiencia del proceso y buen funcionamiento de los equipos.

Uno de los factores claves para determinar el tratamiento adecuado al que debe ser sometido el agua es la fuente de origen de la misma, dependiendo de esto, el agua contiene diferentes cantidades de impurezas y de igual forma, esta se ve afectada por el contacto con la atmósfera y el suelo. El agua de

alimentación a ser empleada a las calderas es agua proveniente del Lago de Maracaibo, la cual por ser de origen natural puede tener un elevado contenido de sólidos disueltos, líquidos no mezclados con aguas (por ejemplo aceite), bacterias, colorantes y otros microorganismos, sustancias semi-coloidales y sales minerales disueltas. Por lo tanto, es necesario evaluar el contenido de estas variables para posteriormente tratarla de acuerdo a lo recomendado en la norma BS 2486:1997 [1].

En concordancia con lo establecido por Oelker *et al.*, [2], el tratamiento previo del agua tiene un efecto en la operación eficiente y confiable de los sistemas industriales de generación de vapor. Una de las principales consecuencias que ocasiona el inadecuado tratamiento del agua es el ensuciamiento del sistema el cual puede llegar a generar un tiempo de inactividad no programado, la pérdida de producción y el desperdicio de energía. Por consiguiente, una comprensión básica del tratamiento del agua es esencial para cualquier proceso de tratamiento de agua interno exitoso.

Por lo antes expuesto, el objetivo de la investigación es caracterizar la muestra de agua del Lago de Maracaibo, para luego identificar los procedimientos de ajuste de parámetros para la adaptación de propiedades necesarias en la entrada a las calderas. Para así diseñar un sistema de tratamiento al agua adecuado para calderas, siendo el aporte práctico el que puede generar un nuevo instrumento para la recolección y análisis de datos. Asimismo, el aporte científico se refleja en la adaptación de procesos comúnmente usados en tratamientos de aguas residuales en agua de cauce natural.

Materiales y Métodos

Caracterización de las muestras de agua del Lago de Maracaibo suministradas por la planta de succión E-1 de la empresa mixta Petrocabimas.

Para este objetivo se inició con la captación de las muestras, esto se siguió mediante la norma COVENIN 2709: 2002 [3] "Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo", siendo esta una muestra instantánea ya que se le analizó parámetros fisicoquímicos como cloro residual el cual puede cambiar durante el periodo de almacenaje, a su vez se le evaluó salinidad, alcalinidad, dureza, entre otros. La modalidad del muestreo fue de captación manual, ya que fue tomada en la planta de succión perteneciente a la empresa mixta Petrocabimas ubicada en la ciudad de Cabimas, estado Zulia por el personal autorizado del lugar.

En cuanto a la caracterización, se obtuvo una data experimental parcial de la misma efectuada anteriormente en el Laboratorio de Análisis Químico de la Empresa Mixta Petrocabimas. Se completó esta data de caracterización de manera práctica en el Laboratorio de la Universidad Rafael Urdaneta.

La medida de la turbidez del agua se realizó siguiendo las ilustraciones suministradas por el manual del equipo de marca LaMotte 2020we. Por otro lado, la medición del pH se efectuó siguiendo las especificaciones del manual del equipo de marca Oakton pH 5+. Finalmente, para la determinación de la conductividad eléctrica se siguieron las instrucciones suministradas por el manual del equipo de marca Orion 3 Star.

Medición de la alcalinidad

Para la determinación de la alcalinidad total del agua se efectuó el procedimiento expuesto por el autor Harris[4], y consistió en tomar una muestra de agua de 10ml la cual fue diluida con agua destilada en un matraz de Erlenmeyer, seguidamente se agregaron 3 gotas de fenolftaleína y 3 naranja de metilo como indicadores para luego titularla con HCl 0.0218N hasta observar el cambio de color naranja a rojo. Posteriormente se anotó el volumen gastado y se obtuvo la alcalinidad por medio del siguiente cálculo:

$$V_{HCl\ gastado} \cdot N_{HCl} \cdot \frac{1\text{Eq } CaCO_3}{1\text{Eq } HCl} \cdot \frac{1}{2\text{Eq} / \text{mol}} \cdot \frac{PM_{CaCO_3}}{V_{muestra}} \cdot \frac{1000\text{mL}}{1L} = \text{ppm } CaCO_3$$

Medición de dureza

Aldabe *et al.*, [5], expresan que la determinación de la dureza del agua se realiza titulando la muestra con una solución de EDTA. Cuando el ión Ca^{2+} se trata con una solución de EDTA, se forma el complejo CaY^{2-} y en el punto final de la titulación Ca^{2+} está totalmente acomplejado. La determinación del punto final se realiza empleando como indicador Negro de Eriocromo que forma un complejo coloreado. Este procedimiento constó de tomar la muestra de agua y diluirla con agua destilada. Adicionalmente, se le agregaron 10 ml de solución buffer pH 10 y 10 gotas del indicador Negro de Eriocromo T, para así proceder a titularla con EDTA 0.0168N hasta observar el cambio de color de morado a azul. El cálculo se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{EDTA\ gastado}}{1000} \cdot N_{EDTA} \cdot \frac{1\text{Eq } CaCO_3}{1\text{Eq } EDTA} \cdot \frac{1}{2\text{Eq} / \text{mol}} \cdot \frac{PM_{CaCO_3}}{V_{muestra}} \cdot \frac{\frac{1000\text{mg}}{1\text{g}}}{\frac{1L}{1000\text{mL}}} = \text{ppm } CaCO_3$$

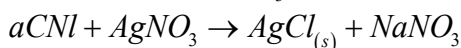
Medición de salinidad

Skoog y West [9, 197], explican que:

La aparición de un segundo precipitado de color distinto constituye la base de la detección del punto final en el método de Mohr. Este procedimiento se utiliza extensamente para la valoración de iones cloruros o de iones bromuros con nitrato de plata patrón. El indicador empleado es el ion cromato, que pone de manifiesto al punto final por dar lugar a la formación de cromato de plata, Ag_2CrO_4 , de color rojo ladrillo.

Teniendo lo expresado anteriormente en cuenta, en primer lugar, se diluyó 25 ml de la muestra de agua del Lago de Maracaibo con agua destilada en un matraz aforado de 100 ml, de esta se tomaron 25 ml a la cual se le agregaron 2 gotas de Na_2CO_3 0.02 N y 2 gotas de fenolftaleína con un gotero observado que esta se tornó de color rosado. Seguidamente a esta solución se le agregaron 3 gotas de H_2SO_4 0.01 N para nivelar el pH de la solución observando de esta manera que se tornó de rosada a incolora. Finalmente, se le agregaron 5 gotas de K_2CrO_4 al 5% tornándose la solución a un color amarillento.

Posteriormente se procedió a la titulación con $AgNO_3$, para esto se colocó la solución en una plancha magnética y se le introdujo en agitador magnético, se llenó la bureta con el $AgNO_3$ al 0.02 N y se comenzó la titulación hasta observar que la solución se tornó de un color amarillento a rojo. Se anotó el volumen gastado de $AgNO_3$ y se procedió a hacer los cálculos.



Cálculo para la determinación la salinidad:

$$\text{ml de } AgNO_3 \cdot \frac{35.5 \frac{\text{mg } Cl}{\text{meqv } Cl} \cdot 0.02 \frac{\text{meqv } AgNO_3}{1\text{meqv } Cl} \cdot 1000\text{ml}}{V \text{ ml muestra}} = \text{ppm } Cl^-$$

Identificación de los procedimientos de ajuste de parámetros para la adaptación de propiedades necesarias en la entrada a las calderas.

En el acondicionamiento del agua para calderas se realizan una serie de procesos para lograr que esta cumpla con lo estipulado en la norma BS 2486:1997[1]. Estos procesos industriales se realizan con el objetivo de atacar a las distintas problemáticas que se presentan en las calderas como incrustaciones, corrosión, arrastre y depósitos. En la elaboración de esta fase se plasmó un listado de los procedimientos que se realizan para el ajuste de las propiedades necesarias para el agua de alimentación de las calderas, esto abarca los parámetros físicos, químicos y microbiológicos del agua.

Diseño de un sistema de tratamiento al agua proveniente del Lago de Maracaibo para ser utilizada como agua para caldera de la empresa mixta Petrocabimas.

Tomando en consideración lo anteriormente analizado en la caracterización, se elaboró una propuesta de un sistema de tratamiento para el agua del Lago de Maracaibo para ser utilizado como agua para calderas obteniendo así un vapor de alta calidad para su utilización en sistemas de inyección de vapor alterna. Para esto se hizo un estudio de los tipos de tratamiento de agua y de las etapas en la que se realiza el tratamiento, cavilando en referencias por autores especializados en el tema como Davis, Masten y González [7], y especialmente con lo estipulado por Metcalf & Eddy Inc, Burton y Tchobanoglous [8]. Finalmente, con ayuda del programa Microsoft Visio se planteó una propuesta de distribución y orden los equipos necesarios para el sistema de tratamiento de agua.

Resultados y Discusión

Captación de la muestra del Lago de Maracaibo

Debido a que el agua empleada a la caldera es agua proveniente del Lago de Maracaibo, lo cual es un cuerpo de agua extenso, la norma COVENIN 2709: 2002 [3] estipula que “lo usual es dividirlos en sectores y captar muestras que pueden ser instantáneas o integradas en cada una de las áreas seleccionadas. También menciona que, “el volumen de la muestra captada debe ser suficiente para llevar a cabo todos los análisis requeridos”. Para muestras instantáneas se sugiere que se deben de tomar 1 o 2 litros de muestra. En el caso particular de la presente investigación, se tomó la muestra en la planta de succión E-1 perteneciente a la empresa mixta Petrocabimas y a su vez se tomó un volumen adecuado debido a la cantidad de agua requerida para realizar los diferentes ensayos.

Caracterización de la muestra

La caracterización para el agua de alimentación a calderas es bastante extensa, pues incluye hasta la concentración de metales en las aguas según la norma BS 2486:1997[1]. En la caracterización realizada en la presente investigación se hizo medición de turbidez, pH, alcalinidad total, salinidad, entre otros, y a su vez se tomaron valores de la caracterización proporcionada. En la Tabla 1 se observó una síntesis de ambas caracterizaciones fisicoquímicas de la muestra de agua:

Tabla 1. Características fisicoquímicas de la muestra de agua

Parámetros	Muestra
Alcalinidad Fenolftaleínica (mg/L)	0.00
Alcalinidad Total (mg de CaCO ₃ /L)	113.36
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻) (mg/L)	92.23
Calcio (Ca ⁺²) (mg/L)	145.49
Cloruros (Cl ⁻)(mg/L)	5112.00

Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	12150.00
Dureza Total (mg de CaCO_3/L)	706.002
Sodio (Na^+)(mg/L)	1236.67
pH	7.38
Magnesio (Mg^{+2})(mg/L)	239.12
Turbidez (NTU)	1.23
Sílice (SiO_2) (mg/L)	0.15
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	4627.00
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1.00

Según los parámetros especificados en la Tabla 1 y por CEPIS [9], el agua del Lago de Maracaibo se clasifica como agua salobre debido a la alta proporción de cloruro de sodio y dureza total, estas aguas suelen tener un rango de sal entre 500 y 30000 mg/L. El valor observado en la tabla de sólidos disueltos totales en la muestra analizada se encuentra dentro del rango antes mencionado. Lo mismo con respecto a la conductividad, esta se puede relacionar directamente con los sólidos disueltos totales, ya que cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica.

Adicionalmente se observó un valor de turbidez de 1.23 NTU, lo cual es un valor relativamente bajo, haciendo referencia al valor máximo de 5 NTU presentes en el agua para consumo humano acorde a la Organización Mundial de la Salud (OMS). En el mismo orden de ideas, la OMS[10] afirma que es necesario eliminar la turbidez en los cuerpos de aguas, ya que este al ser elevado protege a los microorganismos de los efectos de tratamiento de desinfección, a su vez, las partículas que se encuentran suspendidas, influyen en la adhesión de metales pesados, y otros compuestos de tipo orgánico que son tóxicos.

A continuación, en la Tabla 2, se mostró un análisis comparativo entre los valores obtenidos de los parámetros evaluados en la caracterización realizada a la muestra del Lago de Maracaibo con los índices recomendados del agua para calderas de carcasa mayores de 30 bar según la norma británica BS 2486:1997[1].

Tabla 2. Comparación de parámetros fisicoquímicos del agua del Lago de Maracaibo con los de la norma BS 2486:1997[1] de calidad de agua para calderas.

Parámetro	Valor leído	Valor permitido	Diferencia por unidad
Alcalinidad total (mg de CaCO_3/L)	113.36	100 máx.	13.36
pH a 25 °C	7.38	9.5 a 10.5	2.12
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a 25 °C	12150.00	2000 máx.	10150.00
Dureza Total (mg de CaCO_3/L)	706.002	0.002 máx.	706.00
Sílice (SiO_2) (mg/L)	0.15	5 máx.	Dentro del rango
Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	4627.00	1000 máx.	3627.00
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)	1.00	20 máx.	Dentro del rango

En la Tabla 2 se especifican los índices significativos para el agua de alimentación a las calderas considerados en la caracterización. Se observa que los valores leídos de dureza total y alcalinidad total se encuentran notablemente desviados en cuanto a los valores estipulados por la norma BS 2486:1997[1], en los cuales se harán énfasis al momento de realizar el tratamiento de agua debido que estos son factores que repercuten en el funcionamiento óptimo de caldera.

Otro de los parámetros fisicoquímicos para caracterizar las aguas, independientemente del uso al cual estén destinadas, es el pH, el cual es una medida de la concentración de hidrógeno presente en una determinada solución, por lo tanto, este indica la acidez o basicidad de la solución. Esta es la variable principal para la determinación del Índice de Langelier, el cual señala la tendencia del agua a ser incrus-

tante o corrosiva lo que provee una perspectiva a los posibles criterios a tratar. En la tabla se indica un valor de pH de 7.38, comparándolo con la norma BS 2486:1997[1] que oscila entre los valores permitidos de 9.5 a 10.5, este se encuentra fuera de rango.

Identificación de los procedimientos de ajuste a los parámetros para la adaptación de propiedades necesarias en la entrada a las calderas

De acuerdo a lo obtenido en la caracterización de la muestra, y comparándolo con la norma BS 2486:1997[1] es necesario el ajuste de parámetros, para este objetivo se investigó sobre los diferentes métodos que se realizan en la industria para adecuarlos. A continuación, se enlistan las distintas maneras en las que se puede llevar a cabo el ajuste.

pH

Sí al finalizar todo el pretratamiento del agua para la caldera el agua no cuenta con el pH necesario según lo estipulado en la norma BS 2486:1997[1] el cual es de (9.5 – 10.5), este requiere de un ajuste y, para esto se realizan diversos tratamientos. Según la Información Técnica ITSI-03 [11], “el ajuste del pH básico se hace por inyección de Na_3PO_4 , y una inyección adicional de NaOH sólo si es el valor del $\text{pH} < 10$ ”.

Otros de los métodos planteados por Digital Analysis Corporation[12], para el ajuste de pH es un sistema de ajuste de flujo continuo y un sistema de ajuste batch. El sistema de flujo continuo consiste en un tanque de tratamiento con un mezclador, una bomba dosificadora de soda o ácido y una sonda con un controlador de pH. En este sistema, el tanque de tratamiento de pH permanece lleno en todo momento, por lo tanto, la cantidad que entra es la cantidad que sale. A medida que el flujo de soda o ácido ingresa al tanque de tratamiento este se mezcla con el contenido del tanque, la sonda se encarga de enviarle señales al controlador para que el realice los cambios a la bomba dosificadora para que el pH se encuentre en el rango deseado.

Por otra parte, en cuanto al proceso descrito por la empresa citada en el párrafo anterior, el sistema de ajuste batch es un proceso en el que no hay un flujo continuo, sino que permanece el volumen una cantidad de tiempo depositada en el tanque hasta que este alcance con el valor de pH requerido. En este sistema existe un sensor de nivel, y un controlador, el cual le envía la señal a la válvula de descarga para así liberar el contenido del tanque.

Dureza y alcalinidad total

Para evitar los problemas derivados de la alta concentración de dureza o de las incrustaciones de las aguas hay que realizar un óptimo control mediante la estabilización química del agua consistiendo en ajustar el pH, la concentración de dióxido de carbono libre, o la concentración de carbonatos (CaCO_3) del agua a su equilibrio de saturación de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Este último es al que se le debe prestar mayor atención debido a que la norma BS 2486:1997[1] mide la dureza en términos de mg de CaCO_3 , estipulando un máximo de 0,002.

Manahan[13] plantea que se usan varios procesos para ablandar el agua. A gran escala se usa el proceso de soda-cal. Este proceso involucra el tratamiento del agua con cal, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y soda, Na_2CO_3 . El calcio precipita como CaCO_3 lo que permitirá su subsecuente filtración. El agua ablandada por las plantas de ablandamiento con soda-cal usualmente tiene dos efectos. Primero, debido a efectos de sobresaturación, parte del CaCO_3 normalmente permanece en solución. Si no se elimina, el compuesto precipitará posteriormente y causará depósitos dañinos o enturbiamientos indeseables. El segundo problema resulta del uso de carbonato de sodio muy básico que da al agua un pH excesivamente alto.

También existe otros procesos como es el caso del intercambio iónico, que es un proceso en el cual los iones mantenidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales cargados situados en la superficie de un sólido, son cambiados por iones de carga similar de una disolución en la cual el sólido está inmerso Weber[14]. El ablandamiento del agua por intercambio iónico no requiere la eliminación de todos los solutos iónicos, solo de los cationes responsables de la dureza o alcalinidad del agua. Por consiguiente, generalmente solo es necesario un intercambiador de cationes. Además, se usa la forma de sodio en lugar en lugar de la forma de hidrógeno del intercambiador cationes, de forma que los cationes divalentes son reemplazados por los iones de sodio.

Debido a que un intercambio catiónico simple no es capaz de reducir la cantidad total de sólidos en el agua, este tratamiento es a menudo empleado conjuntamente con ablandamiento mediante precipitación, descrito anteriormente. Uno de los tratamientos combinados más comunes y eficientes es el proceso cal-zeolita. Este proceso consiste en un pretratamiento del agua con cal para reducir la dureza, alcalinidad, y en algunos casos sílice, seguido por un tratamiento con ablandadores de intercambio catiónico. Cabe denotar que se juntan los parámetros de dureza y alcalinidad debido a que su ajuste se realiza con los mismos procesos.

Aceites y grasas

A pesar de que la norma BS 2486:1997[1] no especifica una concentración permisible de aceites o grasas, se deben plantear procesos que asistan en la eliminación de estos compuestos ya que son conocidas por los especialistas del sector las afecciones que producen aguas arriba, produciendo incrustaciones en las canalizaciones. Pero estas afecciones no se limitan sólo a las conducciones, sino que una vez en las calderas, continúan generándose otras de diferente naturaleza. Además de consolidarse como un sólido hidrófobo que tiene tendencia a incrustarse y producir atascos, los aceites y grasas tienen otras propiedades que repercuten directamente en el proceso.

Según Lenntech[15], los aceites y ácidos grasos se pueden eliminar mediante el uso de las técnicas siguientes: tamizados, coagulación, floculación, flotación, centrifugación, fluidificación, electrólisis, decantación, precipitación. A continuación, se procederá a describir los procesos de mayor utilización a nivel industrial, sus beneficios y defectos.

Uno de estos procesos es denominado Flotación Por Aire Disuelto (o por sus siglas en inglés DAF). En unas condiciones de ausencia de agitación, se aprovecha la diferencia de densidad para separar el aceite del agua por flotación. Para acelerar el proceso de flotación del aceite, se burbujea aire por la parte inferior del tanque. La separación es eficiente, pero se requiere un gran espacio y equipos de dimensiones considerables cuando el caudal a tratar es elevado. Nemerow y Dasgupta[16].

La eliminación de aceites y grasas mediante Degradación Biológica, aunque es posible, presenta una serie de dificultades que se deben salvar, tanto en condiciones aerobias como en anaerobias. En primer lugar, el aceite y las grasas no disponen de una composición que permita su biodegradación si no se dosifican productos químicos. En segundo lugar, el proceso biológico no soporta bien fluctuaciones en el caudal o en la carga de entrada. Además, en un proceso aerobio, la biodegradación de aceites y grasas conlleva un gran consumo de oxígeno, lo cual requiere un elevado consumo de energía y unos costes de operación elevados.

En conjunto a los procesos de floculación y coagulación, la utilización de Membranas Filtrantes potencialmente puede permitir la producción de agua de gran calidad a partir de cualquier emulsión de aceite en agua. No obstante, la filtración mediante membranas tiene una gran problemática: el ensuciamiento de las membranas, el cual es debido a la formación de una capa formada por una biopelícula, materia orgánica, depósitos inorgánicos o de naturaleza coloidal, entre otros. Esta capa se acumula sobre

las membranas por procesos naturales durante el proceso de filtración y produce una disminución en la capacidad de tratamiento.

Oxígeno disuelto

El oxígeno es el parámetro más importante en el control de la calidad de las aguas superficiales en cauces naturales. Provoca la corrosión de los metales, en líneas y equipos y se elimina por desgasificación o mediante reductores como el sulfito de sódico y la hidracina. Entre otros reductores se encuentran taninos, derivados a base de hidroquinona/pirogalol, derivados de hidroxilamina, derivados del ácido ascórbico, entre otros. Estos eliminadores, catalizados o no, reducen los óxidos y el oxígeno disuelto. La mayoría también pasivan las superficies metálicas. Los productos químicos añadidos para reaccionar con el oxígeno disuelto deben ser introducidos en el sistema de alimentación de agua de forma continua. La elección del producto y la dosis requerida dependerán de si se utilizará un calentador de desaireación. Rigola[17].

La desaireación puede realizarse utilizando un medio físico como calentadores de desaireación o desaireadores de vacío o un medio químico como eliminadores de oxígeno (tratamiento de pulido) o resinas catalíticas. Los contratistas de membrana se utilizan cada vez más. El dióxido de carbono a menudo se elimina con un medio físico.

El propósito de un desaireador es reducir los gases disueltos, particularmente el oxígeno, a un nivel bajo y mejorar la eficiencia térmica de la planta al elevar la temperatura del agua. Además, proporcionan almacenamiento de agua de alimentación y condiciones de succión adecuadas para las bombas de agua de alimentación de calderas. Lenntech afirma que:

La desaireación es impulsada por los siguientes principios: la solubilidad de cualquier gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial del gas en la superficie del líquido, disminuye al aumentar la temperatura del líquido; la eficiencia de eliminación aumenta cuando el líquido y el gas se mezclan completamente. Lenntech [18]

Turbidez

En referencia a los diferentes métodos de ajuste de turbidez, Rigola[17] plantea que los principales tratamientos de eliminación pueden ser la coagulación y filtración, la cloración, o la adsorción en carbón activo. Según Davis, Masten y González [7] mediante la coagulación se elimina turbiedad, color y bacterias del agua que se va a tratar. El objetivo es cambiar la carga superficial de las partículas para que se adhieran entre sí y formar partículas mayores que se asienten por gravedad. Para esto se utilizan polímeros que promueven la coagulación.

La filtración consiste en hacer pasar el agua lentamente a través de lechos de medios granulares, por lo general pueden ser arena, carbón de antracita o granate, la cual son capaces de retener o remover algunas de sus impurezas. Estos dos procesos juntos resultan ser bastante efectivos en remover los sólidos suspendidos, que están cercanamente relacionados a la turbidez, del agua.

La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble en el agua. El uso de carbón activo es el principal elemento para tratar la turbidez, adsorbiendo diversas sustancias como metales pesados, colorantes, detergentes, sustancias de mal olor y color al agua, entre otros. Lenntech[18] describe el proceso como agua siendo bombeada dentro de una columna que contiene el carbón activo, esta agua deja la columna a través de un sistema de drenaje. La actividad del carbón activo de la columna depende de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias. El agua pasa a través de la columna constantemente, con lo que produce una acumulación de sustancias en el filtro.

Conductividad

Existe una relación estrecha entre la cantidad de TDS y la conductividad eléctrica, mientras mayor sea el valor de la conductividad eléctrica (medida con un conductímetro), mayor será la cantidad de sales disueltas en el agua. Por lo tanto, se puede concluir que los tratamientos que se realizan para disminuir los sólidos disueltos totales, pueden ser utilizados para reducir la conductividad eléctrica del agua. Hay algunas opciones de tratamiento para reducir el TDS, como el sistema de ósmosis inversa, filtros y suavizadores, estos últimos siendo explicados anteriormente. Chapman y Kimstach[19]

La ósmosis inversa es uno de los varios procesos de membrana conducidos bajo presión, para la purificación del agua, entre los que también se incluyen la nanofiltración, la ultrafiltración y microfiltración Van der Bruggen et al.,[20]. Según Magara et al.,[21] la ósmosis inversa es una técnica muy útil y bien desarrollada para la purificación y desalinización del agua. El proceso de ósmosis consiste en:

forzar el agua a través de una membrana semipermeable que permite el paso de agua, pero no de otro material. Este proceso, que no es una simple separación a través de tamices o ultrafiltración, depende de la sorción preferencial del agua de una membrana porosa de acetato de celulosa o poliamida. El agua pura de la capa sorbida es forzada a través de los poros en la membrana de bajo presión. Manahan [13]

Desinfección

La desinfección del agua significa la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que existen en el agua. La destrucción y/o desactivación de los microorganismos supone el final de la reproducción y crecimiento de estos microorganismos. Si estos microorganismos no son eliminados el agua no es apta para su utilización en calderas. Existen una gran variedad de métodos de desinfección, entre estos se encuentran la cloración, ozonización y luz ultravioleta.

La utilización del cloro como desinfectante es el método de desinfección más común, la cloración juega un papel muy importante en todo el mundo para evitar infecciones. Se están utilizando numerosos derivados clorados para llevar a cabo estas desinfecciones, como pueden ser el cloro gas, hipoclorito o dióxido de cloro; algunos conocidos coloquialmente como biocidas. El cloro y sus derivados son sustancias de tipo oxidante, las cuales actúan por mecanismo de oxidación, destruyendo la célula tras provocar la rotura de la pared celular Osorio, Torres y Sánchez[22]. Estos se añaden de manera directa en forma de inyección al flujo de agua.

La aplicación de la ozonización es un método de desinfección de aguas potables que se está aplicando ya en la actualidad, pero no es un método solamente aplicable a aguas potables, sino que también se puede aplicar como desinfección de aguas industriales Beltrán [23]. El poder oxidante del ozono es grande por lo tanto se ha demostrado que es un gran agente desinfectante. A pesar de esto, el ozono presenta una serie de inconvenientes como la influencia de la concentración de sólidos en suspensión en la efectividad del proceso, formación de subproductos, elevado coste energético, entre otros.

La desinfección por ultravioleta usa la luz como fuente encerrada en un estuche protector, montado de manera que, cuando pasa el flujo de agua a través del estuche, los rayos ultravioletas son emitidos y absorbidos dentro del compartimiento. Cuando la energía ultravioleta es absorbida por el mecanismo reproductor de las bacterias y virus, el material genético (ADN/ARN) es modificado de manera que no puede reproducirse. Los microorganismos se consideran muertos y los riesgos de enfermedades, es eliminado.

Diseño del sistema de tratamiento al agua proveniente del Lago de Maracaibo

De acuerdo a los valores obtenidos en la caracterización de la muestra de agua del Lago de Maracaibo, para emplearla como agua de alimentación para calderas esta requiere de ajustes a los parámetros conforme a lo establecido en la norma británica de recomendaciones para agua para calderas BS 2486:1997[1]. Para establecer qué tipo de tratamiento requería se hizo un estudio previo a cuáles son los tratamientos estándares que se le realizan a las aguas de acuerdo a su utilidad.

El tratamiento para aguas residuales consta de procesos unitarios, los cuales se agrupan por etapas como tratamiento preliminar, tratamiento primario, secundario y terciario o avanzado. Cada una de estas etapas constituye operaciones básicas, según Metcalf & Eddy Inc, Burton y Tchobanoglous[8], El pretratamiento es fundamentado en procesos físicos, esta etapa se realiza la eliminación de componentes en el que su presencia pueda ocasionar problemas en el funcionamiento de los diferentes procesos u operaciones posteriores, como por ejemplo arena, grasas, objetos gruesos, entre otros. Del mismo modo, los autores expresan que el tratamiento primario se encarga de los procesos físicos y químicos, su objetivo es la eliminación de materia sedimentable y flotante. Las operaciones realizadas en etapa son la decantación primaria y tratamientos fisicoquímicos como la coagulación y floculación.

Por otro lado, el tratamiento secundario es el basado en procesos biológicos, está diseñado para la eliminación de materia orgánica y sólidos en suspensión, incluyendo la desinfección. En esta se da la degradación bacteriana y la decantación secundaria. Por último, está el tratamiento avanzado, el cual se realiza cuando el agua necesita la eliminación de compuestos tóxicos, nutrientes, materia orgánica en exceso y/o sólidos en suspensión. Este constituye tanto procesos biológicos como físicos y químicos. Metcalf & Eddy Inc, Burton y Tchobanoglous[8], expresan que los procesos u operaciones empleadas para este tratamiento son coagulación química, floculación y sedimentación seguida de filtración y carbono activado. Además, enuncian que para la eliminación de iones específicos presentes y para la reducción de sólidos disueltos, se emplea el intercambio iónico o la osmosis inversa.

En el presente trabajo de investigación se evaluaron las características presentadas en la muestra de agua y en base a eso se propone el tratamiento a realizar para emplearla como agua de alimentación para calderas. La muestra de agua tomada en la planta de succión E-1 presentaba pequeñas partículas sedimentadas, por lo cual se debe emplear un tratamiento primario para eliminarlas mediante filtración. Seguidamente se le debe realizar un tratamiento secundario ya que presentaba formación de hongos en el recipiente de la muestra y para esto se necesita el empleo de un biocida para evitar la formación de biopelículas o biofilm en las tuberías y/o equipos. Adicionalmente esta presentaba una alta dureza, sílice, alcalinidad, por lo que necesita un tratamiento avanzado para la reducción de estos iones presentes los cuales pueden ocasionar incrustaciones en la caldera.

Por lo antes expuesto, se realizó una propuesta de equipos de acuerdo a las etapas en la que se realiza el tratamiento. Para la eliminación de los sólidos sedimentados y flotantes se sugiere el empleo de un filtro de arena y grava. Seguidamente se necesita la remoción de los iones calcio y magnesio, para esto se necesita un suavizador, el cual es una columna rellena de resinas de intercambio, en el ocurre una fluidización solido-liquido entre el agua y las resinas, haciendo efectiva la remoción de estos iones. Finalmente, se sugiere un desaireador o desgasificador, ya que el agua a ser proveniente de un cuerpo de agua de origen natural, contiene oxígeno disuelto y dióxido de carbono disuelto el cual es perjudicial para las calderas ya que esta causa corrosión. El orden de los equipos propuestos se plasma en la figura 1.

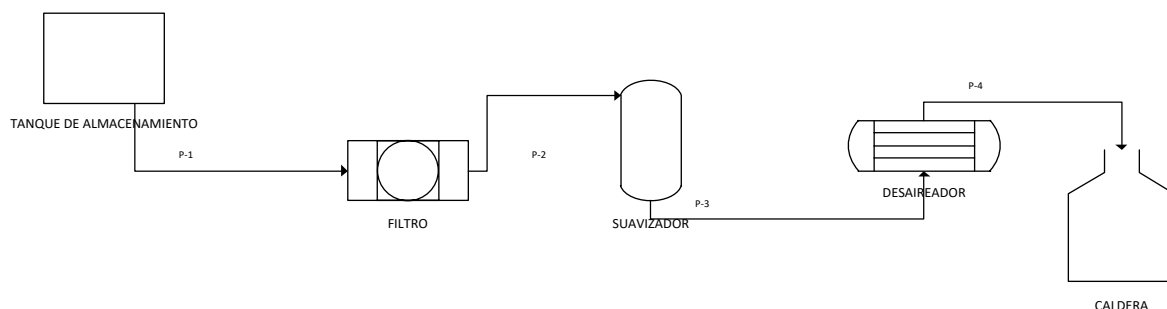


Figura 1. Propuesta de distribución y orden de los equipos en la planta

En la figura 1 se esquematiza la distribución y orden al cual debería ser llevado a cabo el tratamiento del agua. El mismo se basó de acuerdo a las etapas en la cual se realiza un tratamiento y conforme a los requerimientos del agua estipulados en la norma BS 2486:1997[1]. Inicialmente, se propone que el agua contenida en los tanques de almacenamiento sea transportada hacia los filtros, esto se hace con el fin de que previo a este, se haga la inyección de la dosis óptima del floculante y así este elimine los flocúlos formados durante este proceso. Del mismo modo, se plantea hacer la inyección del biocida previo al filtro para que la materia orgánica presente en el agua no afecte tanto a las tuberías o equipos como a las resinas de intercambio contenidas en el suavizador.

Seguidamente, se propone colocar el suavizador posterior al filtro, con el propósito de eliminar los cationes presentes en el agua que puedan ocasionar incrustaciones o depósitos en los equipos consecuentes a este. Finalmente, se plantea colocar el desaireador seguido del suavizador con el objetivo de eliminar los gases disueltos presentes antes de que esta llegue a la caldera, de tal forma, que este alcance la calidad apropiada según lo especificado en la norma anteriormente nombrada. En el caso de ser necesario el empleo de un eliminador de oxígeno disuelto, correspondería hacerse la inyección ya sea en el desaireador o en la salida del mismo, con la intención de que el agua logre el estándar recomendado.

Conclusiones

La caracterización del agua del Lago de Maracaibo obtenida antes de hacer el tratamiento registró valores iniciales que sin duda necesitan mejoras para su empleo como agua para calderas comparándolo con la norma BS 2486:1997, esta mostró ser un agua dura, con alta salinidad, alta conductividad, aunque sin embargo presentó un pH neutro.

En la identificación de los métodos de ajuste a los parámetros se halló que existen una variedad de procedimientos para el ajuste tanto de pH, dureza total, alcalinidad total, aceites y grasas, como eliminación de microorganismos, reducción de la conductividad, turbidez y oxígeno disuelto. No obstante, de acuerdo al uso que se destine el agua, ciertos métodos son más efectivos para dados casos.

El tratamiento al agua del Lago de Maracaibo diseñado fue adecuado, ya que abarca todos los parámetros a tratar sugeridos en la norma BS 2486:1997, basada en las variables que se encontraban desviadas conforme a la norma y acorde a lo obtenido en la caracterización de la misma.

Referencias Bibliográficas

[1] British Standards Institution BSI2486. "Recommendations for treatment of water for steam boilers and water heaters". London, pp. 1-48. 1997.

[2] Oelker, E.H., Hering, J.G. y Zhu, C. Water: Is there a global crisis? *Elements* 7, 157-162. (2011).

[3] “Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo” (1^{era} Revisión). FONDONORMA. COVENIN 2709:2002, Venezuela, pp.1-13 (2002). Disponible en: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/2709-02.pdf> [05 de mayo 2019]

[4] Harris, D. Análisis Químico Cuantitativo, 2^{da} Ed., Editorial Reverté, S.A., España, (2001).

[5] Aldabe, S., Aramendía, P., Bonazzola, C. y Lacreu, L. Química 2: Química en acción. 1^{era} Ed. Ediciones Colihue: Buenos Aires, Argentina. (2004).

[6] Skoog, D.A. y West, D.M. Introducción a la química analítica. Editorial Reverté: Barcelona, España. (2002).

[7] Davis, M. L., Masten, S. y González y Poso, V. Ingeniería y ciencias ambientales. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A.: México. (2005).

[8] Metcalf & Eddy Inc, Burton, F.L., y Tchobanoglous, G. Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización. (3^{era} ed.). Editorial McGraw-Hill: Madrid, España. (2000).

[9] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, OPS/ CEPIS. Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua: Manual de capacitación para operadores. Organización Panamericana de la Salud Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Lima, Perú. (2002). Disponible en: [http://www.ingenieroambiental.com/4020/operacion%20y%20mantenimiento%20de%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20agua%20\(cepis\)\(2\).pdf](http://www.ingenieroambiental.com/4020/operacion%20y%20mantenimiento%20de%20plantas%20de%20tratamiento%20de%20agua%20(cepis)(2).pdf) [18 de mayo 2019]

[10] Organización Mundial de la Salud (OMS). Calidad del agua potable. (s.f.). [Online]. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/es/ [18 de mayo 2019]

[11] “Calidad del agua de calderas”. Sistemas Industriales de Calderas, S.L. Información Técnica ITSI-03. Toledo, pp.1-9, (2018). Disponible en: <https://docplayer.es/81455831-Informacion-tecnica-itsi-03-calidad-del-agua-de-calderas-version-sistemas-industriales-de-calderas-s-l-enero-de-2018.html> [22 de mayo 2019]

[12] Digital Analysis Corporation. pH Adjustment and Neutralization: The Basics. (s.f.). Disponible en: <http://www.phadjustment.com/pH.html> [10 de mayo 2019]

[13] Manahan, S. Introducción a la química ambiental. Editorial Reverté, S.A.: Barcelona, España (2007).

[14] Weber, W. Control de la calidad del agua: Procesos fisicoquímicos. Editorial Reverté S.A.: Sevilla, España. (1979).

[15] Lenntech. Aceites y grasas. (s.f.) Disponible en: <https://www.lenntech.es/aceite-grasas.htm> [10 de mayo 2019]

[16] Nemerow, N. y Dasgupta, A. Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Ediciones Díaz de Santos: Madrid, España. (1998).

[17] Rigola, L.M. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. MARCOMBO, S.A.: Barcelona, España. (1990).

[18] Lenntech. Adsorción/Carbón activo. (s.f.) Disponible: <https://www.lenntech.es/adsorcion.htm> [10 de mayo 2019]

[19] Chapman, D. y Kimstach, V. *Water Quality Assessments: A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*, 1^{era} Ed. E&FN Spon: Cambridge, Inglaterra, (1992).

[20] Van Der Bruggen, B., Vandecasteele, C., Van Gestel, T., Doyen, W., y Leysen, R. A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. New York, Estados Unidos. 22: 1. (2004).

[21] Magara, Y., Kawasaki, M., Sekino, M., y Yamamura, H. *Development of Reverse Osmosis Membrane Seawater Desalination in Japan*. *Water Science & Technology*. Londres, Reino Unido. (2000). 41: 10.

[22] Osorio, F., Torres, J., y Sánchez, M. Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. Ediciones Díaz de Santos: Madrid, España. (2010).

[23] Beltrán F. *Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems*. Lewis Publishers: Washington, Estados Unidos (2010).