

Evaluación del sistema de tratamiento de agua de proceso de la refinería de petróleo Níco López

Evaluation of the process water treatment system of the refinery Níco López

MSc. Yoel Alfonso Acosta^{1*}  <https://orcid.org/0000-0001-6352-1389>

Ing. Gesner Gordillo Ríos¹  <https://orcid.org/0000-0001-5845-1945>

¹Refinería de petróleo Níco López. Avenida Vía Blanca y Belot, Regla. La Habana. Cuba.

*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: yoel.alfonso.1989@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar el tratamiento de agua, por medio de un sistema de ablandadores en función de las propiedades físicas de la resina Lewatit S 1667 de origen alemán, resina seleccionada para la remoción de la dureza. El sistema de intercambio catiónico demanda un volumen de resina de 5 m³ y una altura de lecho de 1,59 m, el cual requirió una altura de la columna de 3 m. La cantidad de agua de servicio que se debe tratar es de un caudal promedio de 57 m³/h (250 gpm). El ablandador trabaja por un tiempo de 22 h por ciclo. Con pruebas de carga efectuadas se pudo eliminar la dureza de 252 mg/L a 0,0916 mg/L representando un rendimiento del 96,36%. La capacidad de útil de la resina aun cuenta con grado de actividad de un 1,4 eq/L lo que representa un 68% de la capacidad total de la resina.

Palabras clave: ablandador; dureza total; Intercambio iónico.

ABSTRACT

The present work was carried out with the objective of evaluating the water treatment, the medium of a softener system and the function of the physical properties of the resin. The cation exchange system demands a resin volume of 5 m³ and a bed height of 1,59 m, which requires a column height of 3 m. The amount of service water to be treated is an average of 57 m³/h (250 gpm). The softener works for a time of 2 2h per cycle. With load tests carried out, the duration of 252 mg/L to 0,0916 mg/L could be eliminated, representing a yield of 96,36%. The useful capacity of the resin in an account with an activity level of 1,2 eq/L, which represents 60% of the total capacity of the resin.

Keywords: softener; total hardness; ion exchange.

Recibido: 20/09/2019

Aceptado: 25/01/2020

Introducción

Casi todas las industrias sin importar el tamaño emplean volúmenes importantes de agua, gran parte de esta en forma de vapor. La generación de vapor es uno de los sistemas auxiliares más importantes dentro de la refinería.⁽¹⁾ El vapor es usado en las refinerías generalmente en los stripping, sistema de destilación atmosférica y al vacío, intercambiadores de calor y en la generación de potencia. La Refinería de petróleo Níco López emplea el vapor además para el calentamiento de tanques de almacenamiento de productos oscuros, para la atomización de fuel oil en hornos y calderas, para turbinas de vapor, para el movimiento del soplador principal y el turbocompresor de gases en la Unidad de Craqueo catalítico fluidizado (FCC).^(2, 3)

El agua que hoy se recibe en la refinería es de origen subterráneo, o sea procede de pozos o fuentes aguas naturales. Por este origen esta agua contiene altos contenido de sales disuelta, por lo que de no ser tratada puede provocar inconvenientes en los equipos ya que estas sales se incrustan en las superficies de los equipos limitando su funcionamiento.⁽⁴⁾ En el caso particular de los generadores de vapor acuatubulares

estas incrustaciones disminuye la eficiencia y aumenta considerablemente el consumo de combustible.

De acuerdo a la clasificación de carbonatos contenidos en el agua, esta puede clasificarse a niveles de dureza, la tabla 1 indica las cantidades de sales en cada denominación: ⁽⁵⁾

Tabla 1- Índice de dureza del agua

Denominación	Dureza en mg/L de CaCO ₃
Muy suaves	0-15
Suaves	16-75
Medias	76-150
Duras	150-300
Muy duras	Mayor a 300

Los tratamientos tradicionales que encontramos en las industrias son los ablandadores, ⁽⁶⁾ estos son tambores cargados con una resina de intercambio iónico del ciclo sodio (Na). En operación normal la resina contiene puntos activos cargados con cationes de sodio Na⁺, que los intercambia por cationes de mayor selectividad como el calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺). ^(7, 8) El proceso inverso se denomina regeneración, para esto se hace pasar por el seno del lecho una solución de cloruro de sodio (NaCl), así intercambia los cationes de calcio y magnesio por sodio. ⁽⁹⁾

La refinería cuenta con una planta de tratamiento de agua. Dicha planta vino por diseño un ciclo de descarbonatador (ciclo H) y otro de suavizamiento (ciclo Na), en la actualidad por problemas técnicos solo opera el ciclo Na. Estos tratadores están cargados con resina catiónica fuerte Lewatit S. 1667 de origen alemán. ⁽¹⁰⁾ Se propone la instalación de nuevas unidades tecnológicas, esto trae consigo consumos adicionales agua. Por lo que se hace necesario realizar una evaluación del sistema para ver si cumple con los requerimientos operacionales.

Materiales y métodos

Para la evaluación del sistema de tratamiento de agua es necesario conocer algunos de los parámetros de operación, características de los equipos y del agua que se va a tratar.

Características del agua a tratar

El agua que se recibe en la empresa es de origen subterráneo, por lo que contiene alto contenido de dureza temporal, o sea, carbonato e hidrógenos carbonatos de calcio y magnesio.

Al agua cruda se le realizó diferentes determinaciones para comprobar su calidad ⁽¹¹⁾ tales como: Dureza Total, ⁽¹²⁾ alcalinidad (P), alcalinidad (M), oxígeno disuelto, conductividad, cloruros, fosfato y pH. En el caso del agua tratada se le analizó la Dureza Total para comprobar su efectividad.

La TABLA 2 muestra un resumen de los métodos empleados para la determinación de cada parámetro analizados al agua.

Tabla 2- Métodos empleados en el análisis de los parámetros de calidad del agua

Parámetro	Método analítico
pH	Potenciométrico
Conductividad eléctrica	Coductimétrico
Oxígeno disuelto	Volumétrico
Sulfato	Turbidimétrico
Fosfato	Espectrofotométrico
Cloruro	Volumétrico
Dureza total	Volumétrico
Alcalinidad P	Volumétrico
Alcalinidad M	Volumétrico
Sólidos totales disueltos	Gravimétrico

Evaluación de los ablandadores

En la evaluación se tienen en cuenta las ecuaciones de diseño, para esto son necesario determinar algunos de los parámetros propuesto por Owens. ⁽¹³⁾

Volumen de resina

El volumen de resina necesario se determina empleando los parámetros de diseño del fabricante de la resina.

$$V_{\text{resina}} = \frac{V_{\text{agua}} \cdot D}{CA} \quad (1)$$

Donde:

V_{agua} : Volumen de agua (m^3)

D: Dureza (mg/L)

Capacidad de intercambio (mg/L)

Ciclo de trabajo

Es muy importante conocer el ciclo de trabajo de la resina. Este depende del volumen de agua a tratar y el caudal que se emplea. La duración del ciclo se determina mediante la ecuación siguiente:

$$t = \frac{V_{\text{agua}}}{Q} \quad (2)$$

Donde:

V_{agua} : Volumen de agua (m^3)

t: Tiempo de duración teórico del ablandador (horas)

Q: Flujo volumétrico que pasa por el ablandador (m^3/h)

Capacidad operativa de intercambio

La capacidad de la resina está dada por el número de sitios activos donde tiene lugar el intercambio iónico. El fabricante en la Ficha técnica de la resina no proporciona este valor, pero considerando que la resina está 100% regenerada, o sea, capacidad total.

$$V_R \frac{dC_R}{dt} = C_1 Q - C_2 \cdot Q \quad (3)$$

Donde:

V_R : Volumen de agua (m^3)

D_1 : Dureza a la entrada (meq/L)

D_2 : Dureza a la salida (meq/L)

Q: Flujo volumétrico que pasa por el ablandador (m^3/h)

C_R : capacidad Operativa de Intercambio (adimensional)

Dimensionamiento del ablandador

En el dimensionamiento del ablandador se emplean las siguientes variables

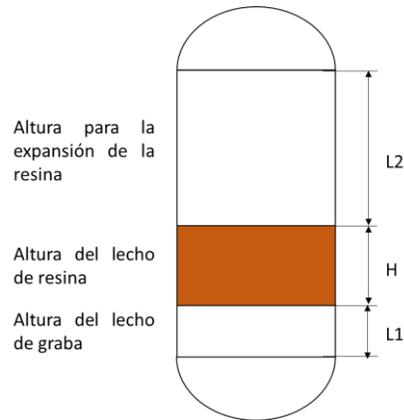


Fig. 1- Variables que forman parte del dimensionamiento del ablandador

$$H = L_1 + h + L_2 \quad (4)$$

Donde:

L_1 : Altura de lecho de antracita (m)

L_2 : Altura para la expansión de la resina (m)

h : Altura del lecho de resina (m)

Velocidad Lineal

Esta es la velocidad de un fluido que circula a través de una sección transversal en un tiempo determinado.

$$V_l = \frac{Q_{req}}{A_C} \quad (5)$$

Donde:

Q_{req} : Caudal requerido en operación (m^3/h)

A_C : Área de la sección transversal del ablandador (m^2)

V_l : Velocidad lineal (m/h)

El área de la sección transversal del equipo debe garantizar el flujo lineal o volumétrico propuesto.

$$A_C = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (6)$$

Donde:

D: Diámetro del ablandador (m)

A_C : Área de la sección transversal (m^2)

Altura del lecho

La altura que alcanza la resina guarda relación con el área del ablandador, tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$h_l = \frac{Q_i}{A_C} \quad (7)$$

Donde:

Q_i : Caudal de ingreso

A_C : Área de la sección transversal del ablandador

Porcentaje de expansión del ablandador

Al diseñar el ablandador es necesario que la altura de este garantice la altura de la expansión recomendada por el fabricante.

$$E_{m\acute{a}x} = h_l \cdot 0,04 \quad (8)$$

Donde:

h_l : Altura del lecho de resina (m)

Altura del lecho expandido

Es preciso conocer la altura del lecho expandido para conocer la altura total de la resina al absorber agua durante el proceso.

$$h_{lex} = h_l + E_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

Donde:

h_l : Altura del lecho de resina (m)

$E_{m\acute{a}x}$: Expansión máxima del ablandador (m)

Cámara de expansión (freeboard)

La cámara de expansión es la mínima altura que se deja por encima de la resina para que se pueda expandir perfectamente durante el contralavado.

$$Freeboard = h_f - h_{lex} \quad (10)$$

Donde:

h_f : Altura del ablandador (m)

h_{lex} : Altura del lecho hinchado (m)

Altura cilíndrica de la columna

Esta altura es la sumatoria de la cámara de expansión y de la resina en su forma expandida.

$$h_c = h_{lex} + Freeboard + 0,3 \quad (11)$$

Donde:

Freeboard: Altura de la cámara de expansión (m)

h_{lex} : Altura del lecho hinchado (m)

Flujo de salmuera

El flujo de salmuera que se requiere para la regeneración de la resina, está dado por:

$$RFR = \frac{Q_{reg}}{V_r} \quad (12)$$

Donde:

Q_{reg} : Caudal de regeneración (m^3/h)

V_r : Volumen de resina (m^3)

Caudal de descompactación

$$V_d = Q_d \cdot t_d \quad (13)$$

Donde:

Q_d : Caudal de descompactación (m^3/h)

V_d : Volumen de descompactación (m^3)

t_d : Tiempo de descompactación (m^3/h)

Volumen de la solución regenerante

Para el volumen de la solución regenerante es necesario determinar la masa de agua y de NaCl.

$$Nivel = \frac{M_{(NaCl)}}{V_{resina}} \quad (14)$$

Donde:

$M_{(NaCl)}$: Masa de NaCl que se empleara (kg)

V_{Resina} : Volumen de resina empleada en el tratador (m^3)

Velocidad de regeneración

La velocidad de regeneración se determina a partir del caudal del regenerante y el área de la columna.

$$V_{reg} = \frac{Q_{reg}}{A_c} \quad (15)$$

Donde

Q_{reg} : Caudal de regeneración (m^3/h)

A_c : Área de la sección transversal del ablandador (m^2)

Tiempo de regeneración de la resina

El tiempo empleado en la regeneración es el cual se hace pasar la solución regenerante por el lecho de la resina.

$$t_c = \frac{V_{agua}}{Q_{reg}} \quad (16)$$

Donde

t_c : Tiempo de regeneración (h)

V_{agua} : Volumen de agua (m^3)

Q_{reg} : Cauda de regeneración (m^3/h)

Resultados

Resultados de los análisis del agua cruda

Se analizó el agua en cuatro momentos diferentes en el año 2018, para tener en cuenta las características del agua en todas las épocas del año.

Tabla 3- Análisis del agua cruda

Análisis		1	2	3	4
pH	Potencial hidrogeno	7,2	7,5	7,3	7,2
λ	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	558	545	578	566
OD	Oxígeno disuelto (mg/L)	7,81	7,56	7,27	7,39
SO_4^{2-}	Sulfato (mg/L)	124,6	131,1	128,5	144,2
PO_4^{3-}	Fosfato (mg/L)	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
Cl^-	Cloruro (mg/L)	38	41	44	39
DT	Dureza total	261	267	256	259
Alc M	Alcalinidad M (mg/L)	306,76	311,85	316,64	319,21
ST	Sólidos totales (mg/L)	809	817	812	822

En la tabla 3 se puede observar que el pH del abasto de agua a la refinería tiene un comportamiento que oscila entre 7,2 – 7,5. Estos valores se encuentran dentro de los límites máximos (6,5 – 8,5) según la NC 1021:2014.

La conductividad promedio del agua cruda analizada fue de 560 $\mu\text{S/cm}$. Este valor cumple con lo planteado por algunos autores, ⁽¹¹⁾ donde los valores normales de este parámetro en aguas dulces comprenden el rango de 100 a 200 $\mu\text{S/cm}$.

El oxígeno disuelto está muy superior a lo reportado en la norma NC 1021:2014, ⁽¹⁵⁾ obteniéndose valores de 7,51 como promedio,

El contenido de sulfato en el agua fue de 132,1 mg/L como promedio, este valor está dentro del parámetro máximo establecidos en las normas NC 1021:2014, (400 mg/L). ⁽¹⁵⁾

La concentración de cloruro en el abasto fue de 40 mg/L, este valor promedio está por debajo de las concentraciones máxima reportadas ⁽¹⁵⁾ para agua potable y de abastecimiento.

Los valores de dureza total clasifican como agua dura, según la tabla 1, o sea, que para ser empleada en procesos industriales deben ser tratadas. ⁽⁵⁾

La alcalinidad del agua se comportó en valor medio de 313 mg/L, clasificando como alta, ya que algunos autores ⁽¹⁶⁾ establecen que baja es inferior a 75 mg/L, media 75 – 150 mg/L, y alta para mayores 150 mg/L.

Caudal de agua requerido

En la elaboración del diseño del sistema de tratamiento se tuvo en cuenta el consumo de agua que se requiere. Los generadores de vapor que están instalados en la

refinería son acuotubulares, de origen ruso. Estos tienen una producción nominal de 25 t/h de vapor. El grupo de generadores de vapor que se abastecerán de esta agua tratada consumen aproximadamente en su totalidad 50 m³/h.

Características del ablandador

Los ablandadores están cargados con resina catiónica fuerte debido al tipo de agua que se procesa. La Lewatit S 1667 es una resina intercambiadora de cationes geliforme, fuertemente ácida con una distribución granulométrica uniforme (monodispersa), a base de un copolímero de estireno divinilbenceno. ⁽¹⁰⁾ El volumen de resina calculado para el ablandador fue de 5 m³. El dimensionamiento del ablandador está en los valores de diseño de relación 2 m de diámetro por 3 m de altura. Ver figura 1. Esta relación (H - D) es mucho más barato ya que los principales componentes de los costos de la columna son los fondos cóncavos y las placas de boquillas. ⁽¹⁷⁾

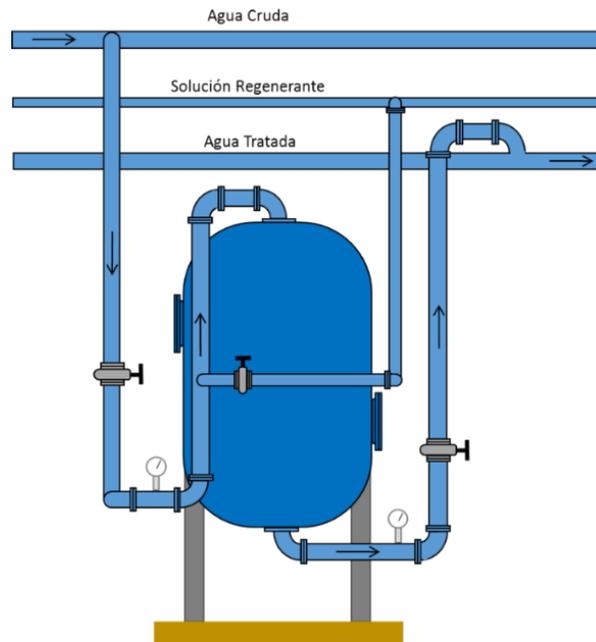


Fig. 2- Ablandador tipo de la Planta de tratamiento de agua de la Refinería de petróleo Níco López

La altura del lecho está dentro de lo recomendado por el fabricante ya que establece que la altura mínima es de 0,8 m. ⁽¹⁰⁾ En la determinar la altura de la cámara de

expansión se acostumbra tomar un por ciento de expansión de un 50 a un 75% de la altura del lecho, ⁽¹⁸⁾ en este caso se tomó un 60%.

Tabla 4- Características del ablandador

Parámetros	Valores	
	Volumen de resina	5,0
Diámetro interno	2	m
Altura del ablandador	2,93	m
Altura del lecho	1,59	m
% de expansión del lecho en el ablandador	0,0638	m
Altura del lecho hinchado	1,6828	m
Cámara de expansión Freeboard	1,09	m

Condiciones de operación del ablandador

Según el tiempo por ciclo calculado para la resina Lewatit S 1667 se demora 22 horas en agotarse, este valor es muy semejante a los valores reportados en el histórico en la planta de tratamiento de agua.

La capacidad útil de la resina es de 1,4 eq/L, este valor es menor a la capacidad total de la resina donde la ficha técnica de Lewatit S 1667 refleja una capacidad total de 2 eq/L. ⁽¹⁰⁾ La capacidad útil típica de las resinas fuertemente ácidas y fuertemente básicas es de 40 a 70 % de su capacidad total. ⁽¹⁹⁾ Esta resina muestra una actividad de un 68% de la capacidad total.

El flujo de salmuera se obtuvo por un despeje de la ecuación 12 empleando una tasa de flujo de regeneración de 3 m³ de sol. regenerante por m³ de resina, resultando un flujo de 15 m³/h.

La velocidad de regeneración se determina teniendo en cuenta el caudal de regeneración y el área de la sección transversal, esta fue de 4,7 m/s. El fabricante reporta que la velocidad de regeneración debe ser aproximadamente 5 m/s, ⁽¹⁰⁾ por lo que se encuentra en parámetros.

La cantidad de NaCl calculado para la regeneración depende del nivel que refleja el fabricante. Este indica que la solución para regenerar debe estar de 8-10 % en peso. Por lo que para preparar una solución a la concentración de 10% se debe disolver

1001 kg de NaCl en 9 m³ de agua, empleando la tabla 6 de densidad de solución de NaCl. ⁽²⁰⁾

El tiempo de regeneración de la resina es de 90 min. Para conocer si con el nivel de regeneración que propone el fabricante se alcanza una regeneración completa de la resina, se debe comprobar si existe un excedente estequiométrico.

$$\%Est = \frac{Nivel \cdot \frac{eqNa}{gNa}}{Cr} \quad (17)$$

donde:

Cr: Capacidad útil de la resina (eq/L)

Nivel: Nivel de regeneración (g/L)

eqNa: Equivalente de sodio (eq/L)

gNa: Masa de sodio (g)

El % estequiométrico da una medida del exceso que se debe añadir, todo esto es para mantener el proceso en equilibrio. La conversión nunca es del 100% ya que el proceso no es ideal. Por consiguiente, la eficiencia empeora a medida que este valor aumenta, es decir, disminuye la capacidad operativa de la resina. ⁽¹³⁾

El valor estequiométrico es de 170%, en el caso de la resina catiónica fuerte Lewatit S 1667 la eficiencia en la regeneración es de 200%. ⁽¹⁰⁾ Teniendo en cuenta el valor estequiométrico calculado se puede deducir que la resina alcanza una regeneración completa de la resina.

Es necesario descompactar la resina antes de regenerarla y al mismo tiempo eliminar cualquier impureza retenida en el lecho. Para esto se emplea un caudal de descompactación de 15 m³ y una duración de 12 - 15 min. ⁽²¹⁾

La velocidad lineal fue de 18,07 m/h (7,39 gpm/pie²) este valor es satisfactorio ya que deben encontrarse en el rango de 9,79 a 24,44 m/h (4 a 10 gpm/pie²), se comporta normalmente el valor de 19,56 m/h (8 gpm/pie²). ⁽¹³⁾ En la ficha técnica de la resina Lewatit S 1667 establece como valor máximo para este parámetro 60 m/h, cumpliendo así con lo establecido por este documento técnico. ⁽¹⁰⁾

Tabla 5- Parámetros operacionales del ablandador

Parámetros	Valores	
Tiempo de ciclo de trabajo	22	h
Capacidad útil de la resina	1.4	eq/L
Flujo de salmuera	6.0	m ³ /h
Caudal de descompactación	12.5	m ³ /h
Masa de NaCl	1001	kg
Tiempo de regeneración	1.5 (90)	h (min)
Velocidad lineal	7.39	gpm/pie ²

Para determinar la capacidad del tambor de la solución regenerante hay que tener en cuenta el volumen de la solución. La tabla 6 muestra la densidad de soluciones de NaCl en función de la concentración y la temperatura. ⁽²⁰⁾

Tabla 6. Densidad de soluciones de NaCl

Porcentaje. %	0 °C	10 °C	25 °C	40 °C
1	1.00747	1.00707	1.00409	0.99908
2	1.01509	1.01442	1.01112	1.00593
4	1.03038	1.02920	1.02530	1.01977
8	1.06121	1.05907	1.05412	1.04798
12	1.09244	1.08946	1.08365	1.07699
16	1.12419	1.12056	1.14010	1.10688
20	1.15663	1.15254	1.14533	1.13774
24	1.18999	1.18557	1.17776	1.16971
26	1.20709	1.20254	1.19443	1.18614

Para esto se realizó una interpolación para obtener la densidad a 10% en peso de NaCl.

$$V_{sol} = \frac{kgNaCl}{\rho(NaCl)_{25^{\circ}C}} \quad (18)$$

donde:

kg NaCl: Es la masa de NaCl para la preparación de la solución regenerante (kg)

ρ (NaCl)_{25°C}: Es la densidad de la solución NaCl a 10% en peso (kg/m³)

El volumen de solución regenerante es de 8,45 m³. El tambor real que almacena la solución tiene un sobre diseño de un 20% mayor al volumen de la solución.

Conclusiones

El agua que se recibe hoy en la refinería de petróleo Níco López es un agua muy carbonatada por lo que tiene que ser tratada para emplearla en el proceso. En la evaluación del sistema de tratamiento de agua de la refinería se obtuvo que Planta de tratamiento puede brindar el volumen de agua para la nueva unidad que se propone instalar. La resina presenta una capacidad útil de 1,4 eq/L, aunque ha perdido ligeramente su actividad en un 32 % puedo satisfacer los parámetros operacionales actuales.

Referencias Bibliográficas

1. A. VALLES CRUZ, L. ACOSTA CORDERO, A. PÉREZ GONZÁLEZ. Evaluación energética de los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de una refinería cubana de petróleo. *Revista Especializada en Ingeniería*. 2014, **8**, 89-96. ISSN: 1900-6608.
2. REFINERÍA DE PETRÓLEO NÍCO LÓPEZ. Régimen Tecnológico Unidad de Destilación Atmosférica y al Vacío. RÑ-DT/G 0901. Versión 02. La Habana, Cuba. 2017.
3. REFINERÍA DE PETRÓLEO NÍCO LÓPEZ. Régimen Tecnológico Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado. RÑ-DT/G-10-03. Versión 03. La Habana, Cuba. 2017.
4. SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, A; OLIVER LÓPEZ, Y; RODRÍGUEZ RICOA, I. L; CABRERA CARRAZANA, R. J. GUERRA VALDÉS, Y B. Evaluación, modelización y optimización de una columna de intercambio iónico empleada en el tratamiento de aguas de procesos. *Revista Afinidad LXXIII*, 2016, **73** (575), 210-218. ISSN: 0001-9704.

5. AGAMEZ SALVADOR, CARLOS IGNACIO. Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de malagana (*bolívar*). Tesis de pregrado. Universidad de San Buenaventura. Colombia. 2014. Disponible en: <https://bibliotecadigital.usb.edu.co/handle/10819/2797>
6. CORTIJO HERRERA, D. “Desalcalinización del agua mediante intercambio ionico”. Universidad de Lima, Peru. *Revista Ingeniería Industrial*. 2013, **31**, 221-238. ISSN 1025-9929.
7. BOGART, S. J.; WOODMAN, S.; STEINKEY, D.; MEAYS, C.; PYLE, G. G. “Rapid changes in water hardness and alkalinity: Calcite formation is lethal to *Daphnia magna*”, *Science of The Total Environment*, **559**, 2016, 182-191, ISSN 0048-9697.
8. MOREIRA ROMERO, Á F. “Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua”. *Revista Dominio de las Ciencias*. **2**, (4), 2016, 334 – 345. ISSN 2477-8818.
9. JIHYON, Im, “*Investigation of Resin Regeneration in the Suspended Ion Exchange (SIX[®]) System*” Tesis de Maestría. Universidad de New Hampshire, Durham. Estados Unidos. 2015. Disponible en: <https://scholars.unh.edu/thesis/1052>
10. LENNTECH. Ficha Técnica de la Resina Lewatit S 1667. 2012. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Lewatit-S-1667-SP-L.pdf>
11. CHIBINDA, C; ARADA PÉREZ, C. M; PÉREZ POMPA, N. “Caracterización por métodos físico-químicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo la Calera”. *Revista Cubana de Química*. **29**, (2), 2017, 303-321. e-ISSN: 2224-5421.
12. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NC-ISO 6059: 2010. Calidad de agua – Determinación de la suma de calcio y magnesio – método por valoración con EDTA. La Habana. Cuba. 2010.
13. DEAN L. OWENS. *Practical principles of ion Exchange water treatment*. 2da Edición. USA, Tall Oaks Pulishing INC. 1995. ISBN 0-927188-00-7.

14. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NC 1021: 2014. Higiene Comunal. Fuentes de abastecimiento de agua. Calidad y protección Sanitaria. La Habana. Cuba. 2014.
15. ESPINOSA PAZ, T. M; RODRIGUEZ, CARMEN. "Determinación del índice de calidad del agua (ICA), de los ríos Morón y Patanemo del Estado Carabobo, en Venezuela". *Revista INGENIERÍA UC*, 2016, **23**, (2), ISSN 1316-6832.
16. FRANÇOIS DE DARDEL. Plantas de intercambio iónico. 2016. [en línea]. Consultado [6 de octubre del 2018]. Disponible en: http://dardel.info/IX/processes/design_principles_ES.html
17. RIGOLA LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y aguas residuales*. Colombia. Editorial Marcombo. 1999. ISBN 9788426707406.
18. FRANÇOIS DE DARDEL. Capacidad de Intercambio. 2018. [en línea]. Consultado [6 de octubre del 2018]. Disponible en: http://dardel.info/IX/capacity_ES.html
19. PERRY, ROBERT H. *Manual de Ingeniero Químico*. Physical and Chemical Data. 8va Edition. Mc Graw Gill. México. 2008. ISBN 0-07-151125-3.
20. REFINERÍA DE PETRÓLEO NICO LÓPEZ. Régimen Tecnológico del Complejo Termoenergético Título 16. RÑ-DT/G-12-01. Versión 02. La Habana, Cuba. 2018.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Ambos autores participaron por igual en la realización del trabajo, así como en la confección del informe previo, su discusión y realización del informe final.