

Evaluación de un sistema de intercambio iónico en el tratamiento de agua para la producción de cerveza artesanal

Ion exchange assessment for water treatment in brewing craft beer

Irenia Gallardo-Aguilar^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-6360-6582>

Yisel Pérez-Milian² <https://orcid.org/0000-0002-3270-1608>

Yamila García-Limonta³ <https://orcid.org/0000-0002-3250-8170>

¹Departamento de Ing. Química. Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba

²Estudiante de maestría Universidad de Valladolid España, España

³UEB Papelera “Pulpa Cuba”, Trinidad, Cuba

*Autor para la correspondencia: correo electrónico: irenia@uclv.edu.cu

RESUMEN

Para diversificar las ofertas turísticas y aumentar ingresos en divisas, en Cuba, se ha asumido la ejecución de fábricas-tabernas de cerveza artesanal, contratando los servicios y tecnologías a compañías extranjeras, pero en los contratos no siempre se incluye la planta de tratamiento de agua, siendo el agua uno de los elementos más importantes en la fabricación de cerveza. Por lo que el objetivo de la investigación es: evaluar un sistema de intercambio iónico disponible, para el tratamiento del agua en la fabricación de cerveza artesanal. En la metodología empleada se identificaron los principales parámetros de calidad del agua de la fábrica para la producción de cervezas artesanales y se estudiaron experimentalmente diferentes tipos de resinas para llevar el agua a los parámetros requeridos. Como conclusiones se obtuvo que: la caracterización del agua de la cervecería permitió determinar, que ésta no cumple con los rangos de dureza de 116- 207 ppm o mg/L (CaCO₃) establecidos para las cervezas claras. la resina apropiada para el tratamiento del agua es la Amberlita, la cual posee una capacidad de adsorción de 38 458,2 mg/L de resina, el escalado a nivel industrial de la columna de intercambio iónico existente, permitió determinar la capacidad de tratamiento

del agua en la fabricación de cerveza artesanal. En la metodología empleada se identificaron los principales parámetros de calidad del agua de la fábrica para la producción de cervezas artesanales y se estudiaron experimentalmente diferentes tipos de resinas para llevar el agua a los parámetros requeridos. Como conclusiones se obtuvo que: La caracterización del agua de la cervecería permitió determinar, que ésta no cumple con los rangos de dureza de 116- 207 ppm ó mg/L (CaCO₃) establecidos para las cervezas claras, la resina apropiada para el tratamiento del agua es la Amberlita, la cual posee una capacidad de adsorción de 38 458,2 mg/L de resina, el escalado a nivel industrial de la columna de intercambio iónico existente, permitió determinar la capacidad de tratamiento de agua por ciclo que fue de 62 788 L, así como los consumos de agua y ácido clorhídrico en el ciclo de regeneración y enjuague de 7 401,14 L y 304,1 L respectivamente.

Palabras clave: cerveza, agua, resinas, capacidad adsorptiva, regeneración.

ABSTRACT

In order to diversify tourist offers and increase foreign currency income, Cuba has assumed the execution of craft beer breweries, contracting the services and technologies to foreign companies, but the contracts do not always include the water treatment plant, being water one of the most important elements in the manufacture of beer. Therefore, the objective of the research is: Assess an available ion exchange system for water treatment in the manufacture of craft beer. In the methodology used, the main water quality parameters of the brewery water for the production of craft beers were identified and different types of resins were experimentally studied to bring the water to the required parameters. As conclusions it was obtained that: The characterization of the brewery water allowed to determine, that this does not comply with the hardness ranges of 116-207 mg/L (CaCO₃) established for clear beers, the appropriate resin for water treatment is Amberlite, which has an adsorption capacity of 38 458.2 mg/L of resin, The industrial scaling of the existing ion exchange column allowed determining the water treatment capacity per cycle, which was 62 788 L, as well as the consumption of water and hydrochloric acid in the regeneration and rinsing cycle of 7 401.14 L and 304.1 L,

Keywords: beer, water, resins, adsorptive capacity, regeneration.

Recibido: 08/05/2024

Aceptado: 15/08/2023

Introducción

La cerveza (del latín *cerevisia*) es una bebida alcohólica, no destilada, de sabor amargo, que se fabrica con granos de cebada germinados u otros cereales, cuyo almidón se fermenta en agua con levadura, principalmente *Saccharomyces cerevisiae* o *Saccharomyces pastorianus* y se aromatiza a menudo con lúpulo, entre otras plantas. La cerveza es la tercera bebida en términos de popularidad junto con el agua y té. Si bien no se conoce con certeza la fecha y lugar en que comenzó a elaborarse, es considerada una de las bebidas alcohólicas más antiguas. Plinio describe en sus escritos que “el ingenio pervertido del hombre ha dado incluso al agua el poder embriagador donde el vino no es factible produciendo bebidas a partir del grano humedecido con las que se intoxican”.⁽¹⁾

La cerveza artesanal es aquella que está elaborada siguiendo una receta propia, por maestros cerveceros que le dan un sabor personal y distinto a las marcas industriales; por lo que su producción es limitada. Es el resultado de la mezcla de agua, malta, lúpulo y levadura y algunas frutas, especias y hierbas de acuerdo a la técnica del maestro cervecero, dándole sabor y aroma especial a esa cerveza.⁽²⁾ El sistema de elaboración de estas cervezas preserva las cualidades de las materias primas, que pasan íntegras a la cerveza, por lo que son una fuente natural de vitaminas, minerales y antioxidantes, beneficiosos para la salud, cuando son consumidas responsablemente. Entre algunos de los beneficios saludables de estas cervezas están su contenido en polifenoles que ejercen un efecto protector sobre el sistema cardiovascular. También su alto contenido en magnesio y potasio y sus bajos niveles de sodio y calcio, provenientes de la cebada malteada usada en su elaboración.⁽³⁾

La cerveza está compuesta en un 90-95% por agua, por lo que se trata del ingrediente más importante, ya que además de ser esencial para la producción de la bebida, facilita su proceso. Tiene gran importancia en el sabor y aroma de la bebida, por lo que su elección tiene que ser minuciosa, ya que se utiliza para el remojo y la maceración de la malta, para que pueda extraer los componentes necesarios de la misma; lo que puede afectar el resultado final de la cerveza, además en otros procesos; por lo que, la composición y la calidad del agua son

de vital importancia. Entre las características químicas del agua que se toman en cuenta para la producción de cerveza están la alcalinidad, es decir su capacidad para neutralizar ácidos, y su dureza, es decir, sus niveles de salinidad ⁽⁴⁾. También hay que saber cómo modificarla para poder crear un estilo auténtico o mejorar el sabor de la cerveza y saber corregirla para alcanzar el pH óptimo. Entre los tres compuestos hallados comúnmente en el agua que modifica el pH de la maceración, están el bicarbonato (HCO_3^-), comúnmente mencionado como dureza temporal o alcalinidad, este aumenta el pH del agua. Los otros dos iones son el calcio (Ca^{++}) y el magnesio (Mg^{++}) y sirven para bajar el pH. Aunque existen muchos otros compuestos en el agua, que no tienen un efecto apreciable en el pH de la maceración.⁵ Los tratamientos para potabilizar el agua, se pueden clasificar de acuerdo con los componentes o impurezas a eliminar, los parámetros de calidad y los grados de tratamientos de agua. Según estos aspectos, los procesos unitarios empleados para la potabilización del agua en función de sus componentes han sido, la filtración coagulación, floculación, decantación, precipitación, intercambio iónico, osmosis inversa, entre otros.

El proceso de intercambio iónico consiste en aprovechar la capacidad que tienen las resinas de intercambiar iones entre una fase sólida y una fase líquida en forma reversible, es decir que regresa a su estado original. Generalmente, la gran utilidad del intercambio iónico radica en el hecho de usar una y otra vez las resinas, puesto que estas pueden ser regeneradas, ya que el cambio que sufren en la operación no es permanente. Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ión de carga opuesta (contraión). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico.^(6,7) El intercambio iónico tiene una capacidad limitada para almacenar iones en su estructura, llamada capacidad de intercambio; por lo que, llegará finalmente a saturarse con los iones que separa de la solución. Entonces se lava con una solución fuertemente regenerante que contiene los iones originales, dejando al material en condiciones útiles de operación⁸. Esta operación es un proceso químico cíclico, y el ciclo completo incluye de ordinario retrolavado, regeneración, enjuagado y servicio.⁽⁹⁾ Entre los parámetros característicos de los intercambiadores iónicos están la capacidad de intercambio y se expresa en equivalentes por litro de resina, o por gramo; la capacidad específica teórica, que

no es más que el número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo; la selectividad, propiedad por la que un intercambiador muestra mayor afinidad por un ion que por otro.⁽⁶⁾

El tratamiento de una disolución con un intercambiador iónico se puede llevar a cabo mediante dos configuraciones distintas, en discontinuo o en columna. En las operaciones en discontinuo, se mezcla el intercambiador y la disolución en un recipiente hasta que el intercambio de iones alcanza el equilibrio. El intercambio en columnas es la que se emplea más a menudo en los procesos de intercambio iónico. El intercambiador se coloca en el interior de una columna vertical, a través de la cual fluye la disolución a tratar y esta puede ser alimentada de dos modos: con las disoluciones de carga y de regeneración introducidas por la parte superior de la columna y con el regenerante en dirección opuesta a la disolución de carga, es decir, por la parte inferior de la columna, a contracorriente.⁽⁷⁾

Teniendo en cuenta todos estos aspectos es que el trabajo tiene como **objetivo**: Evaluar un sistema de intercambio iónico disponible, para el tratamiento del agua en la fabricación de cerveza artesanal.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

El agua con que se surte la fábrica de cerveza artesanal proviene del acueducto de la ciudad, la cual tiene un tratamiento previo, pero mantiene altos niveles de dureza ya que en su mayoría proviene de aguas subterráneas. De esta agua se tomó una muestra y se le determinaron los principales parámetros de calidad, los cuales se compararon con los que se exigen para el agua en la producción de cerveza

Para los experimentos de intercambio iónico en continuo a escala de laboratorio, se utilizó una columna con un diámetro interior (D) 0,015 m y una altura 0,40 m, trabajando a un flujo de 40 veces el volumen de la cama / hora (8 mL/min), la altura de la cama de resina 0,07 m y el diámetro de partícula (dp) va de 0,1 a 0,5 mm en estos tipos de resinas. Se reporta¹⁰, que en columnas modelo, se deben cumplir dos condiciones de diseño: que la relación diámetro interior de la columna/diámetro de partícula, sea igual o mayor a 25 (evita efectos de canalizaciones y reduce el mezclado axial) y que la relación altura/diámetro

interior de la columna sea superior a 4, por lo que la columna cumple con las especificaciones, siendo estas: $25 \leq D/d_p \leq 150$ y $4 < h/D < 20$

Se midió como parámetro de calidad de la dureza del agua, en todos los experimentos, la conductividad a la salida del tratamiento, en un conductímetro marca HANNA y modelo EC 215. Los valores de conductividad en $\mu\text{S/cm}$ fueron convertidos a ppm, SDT (sólidos disueltos totales), equivalentes (mg/L) empleando un conversor de unidades. ⁽¹¹⁾

Evaluación de las resinas mediante ondas de adsorción

Se evaluó primeramente la resina disponible en la fábrica. Posteriormente se evaluaron otros dos tipos de resinas de tipo lecho mixto (Merck 4836), para el ablandamiento o suavización del agua potable y del tipo gel catiónica fuertemente ácida (Amberlita IRC-50), de elevada pureza. Se determinaron las ondas de adsorción y con esta el punto de ruptura, la capacidad de adsorción de la cama y los porcentajes de remoción mediante las ecuaciones 1, 2 y 3 ¹².

$$q = \frac{V(C_0 - C)}{V_r} \quad (1)$$

$$\%_{\text{remoción}} = \frac{C_0 - C}{C_0} * 100 \quad (2)$$

$$V_r = \pi * r^2 * h \quad (3)$$

donde:

q: capacidad de adsorción del lecho, en mg adsorbido/L de resina :

V: volumen de efluente hasta el punto de ruptura, en L

Co: concentración inicial, en ppm o mg/L

C: concentración en el punto de ruptura, en ppm o mg/L

Vr: volumen de resina, en L

D: diámetro de la columna

h: altura de la cama de resina

Evaluación del sistema de dos columnas de la fábrica con la resina seleccionada en el estudio y su regeneración

Para esto se escaló la columna de laboratorio, empleando la metodología propuesta por Curbelo y referenciada por ¹³, mostrada en la ecuación 3, la cual toma en consideración los parámetros de operación del modelo en función de las mejores condiciones. El volumen de agua a tratar será de 2 000 L/día de

trabajo de la planta. El modelo es la columna a escala de laboratorio y el prototipo es el sistema de intercambio de la fábrica, de dos columnas de polietileno, marca Magnus que trabajan en paralelo la que presenta las siguientes dimensiones: diámetro de 24 pulgadas (60,96 cm) y una altura de 65 pulgadas (165 cm) y un volumen de 100 gal (UK) (466,5 L) cada una, con sistema automatizado que pone el equipo a regenerar cada cierta cantidad de agua tratada.

$$q = \left[\frac{V(C_0-C)}{V_r} \right]_{\text{modelo}} = \left[\frac{V(C_0-C)}{V_r} \right]_{\text{real}} \quad (4)$$

Para el estudio de regeneración de la resina a escala de laboratorio se emplearon soluciones de HCl de 2% y 5% p/v respectivamente por un tiempo de 60 minutos y a un flujo de 4 veces el volumen de la cama/hora, obteniéndose el flujo de regenerante por la ecuación 4, en dos variantes, una empleando solución al 5% durante 60 min y otra combinando soluciones de 2 % de HCl con un flujo de 1 mL/min hasta que la concentración del efluente está próxima a la conductividad inicial de la solución de 2% y luego se sustituyó por la solución de 5% de HCl en el tiempo restante. ⁽¹⁴⁾

Resultados y discusión

Evaluación del agua con que se surte la fábrica

Los resultados obtenidos comparados con los de la norma interna establecidos para la fábrica, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1- Parámetros de calidad del agua cruda vs parámetros internos de calidad.

Parámetro	Agua cruda	Norma interna de elaboración de cervezas
pH	7,56	6,5-8,5
Conductividad (µS/ cm)	968	*200-625
Dt mg/L de CaCO ₃	472	*116-207
Concentración de Ca (mg/L)	100	*30-50
Concentración de Mg (mg/L)	54	*10-20
STD (mg/L)	619,72	250-400
Concentración de Cloruros (mg/L)	30,10	0-35

* Se refiere a las normas para la elaboración de cervezas claras, no así para la malta y cervezas oscuras.

Como se puede apreciar en la tabla 1 el agua cruda no cumple con ningún parámetro de la norma interna de calidad, para la producción de cervezas artesanales ni para servicios excepto la concentración de cloruros y el pH. Por lo que los esfuerzos estarán encaminados a reducir y eliminar la presencia de contaminantes en el agua, para llevarla a los parámetros correctos para su utilización en el proceso principal. Los resultados que se presentan son un resumen de los resultados del trabajo de fin de grado de uno de los autores.⁽¹⁵⁾

Evaluación del intercambiador iónico de la fábrica

Luego de instalar el intercambiador iónico, se trató el flujo de agua de la cual se tomaron muestras y se le determinaron los principales parámetros de calidad, los que se reflejan en la tabla 2

Tabla 2- Resultados de la evaluación del intercambiador iónico de la fábrica.

Parámetro	Agua cruda	Agua tratada
pH	7,56	7,79
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	968	943
Dt (mg/L) de CaCO_3	472	472
Concentración de Ca (mg/L)	100	100
Concentración de Mg (mg/L)	54	54
STD (mg/L)	619,72	603,52
Concentración de Cloruros	30,10	28,3

Evaluación de la resina Merck 4836

En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos, al tratar el agua cruda con la resina Merck 4836 y en la figura 1 aparece la onda de adsorción obtenida.

Tabla 3- Datos para la onda de adsorción con resina Merck 4836

Volumen efluente (ml)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Concentración (ppm)
100	241	154,24
200	342	218,88
300	352	225,28
400	353	225,92
500	554	354,56
600	791	506,24
700	918	587,52
80	930	595,2
900	943	603,52
1000	967	618,88

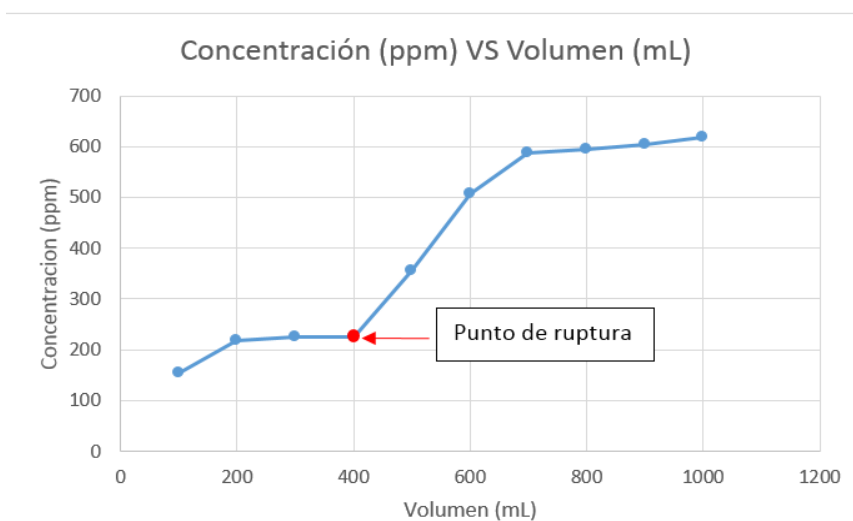


Fig. 1- Onda de adsorción de la resina Merck 4836

En la figura 1 se observa que el punto de ruptura se encuentra en el valor de 225,92 ppm para un volumen de efluente pasado de 400 mL, este punto es el que se toma como agotamiento del lecho para regenerar la resina, además se aprecia que la resina empleada llega a agotarse completamente ya que se alcanza el valor inicial de conductividad y esto se logra para un volumen de agua tratada de 700 mL.

Evaluación de la resina Amberlita IRC-50

En la tabla 4 se muestran los datos obtenidos, al tratar el agua cruda con la resina Amberlita IRC-50 y en la figura 2 aparece la onda de adsorción obtenida. El punto de ruptura de la onda de adsorción, correspondiente a la resina Amberlita IRC-50, se encuentra en el valor de $351\mu\text{S}/\text{cm}$ o 224,64 ppm para un volumen de efluente de 1200 mL. En la fig.2 se aprecia que esta resina no llega a agotarse completamente ya que no se alcanza el valor inicial de conductividad. Lo cual hubiese sido posible si el volumen de agua tratada hubiese sido mayor. Como se observa esta onda es más plana que la anterior. Estas curvas generalmente tienen una forma de S, pero pueden tener una gran pendiente o ser relativamente planas y, en algunos casos, considerablemente distorsionadas, lo cual depende de la rapidez real y el mecanismo del proceso de adsorción, la naturaleza del equilibrio de adsorción, la velocidad del fluido, la concentración de soluto en la alimentación y la longitud del lecho adsorbedor.⁽⁹⁾ Para el intercambio iónico, en que los procesos de intercambio son más lentos, las curvas se hacen más planas.

Tabla 4- Datos para la onda de adsorción con resina Amberlita IRC-50

Volumen efluente (ml)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Concentración (ppm-mg/L)
120	275	176,00
240	280	179,20
360	291	186,24
480	310	198,40
660	327	209,28
720	331	211,84
840	338	216,32
960	346	221,44
1080	350	224,00
1140	350	224,00
1200	351	224,64
1320	418	267,52
1440	463	296,32
1560	499	319,36
1680	539	344,96
1800	604	386,56
1920	668	427,52
1980	695	444,80

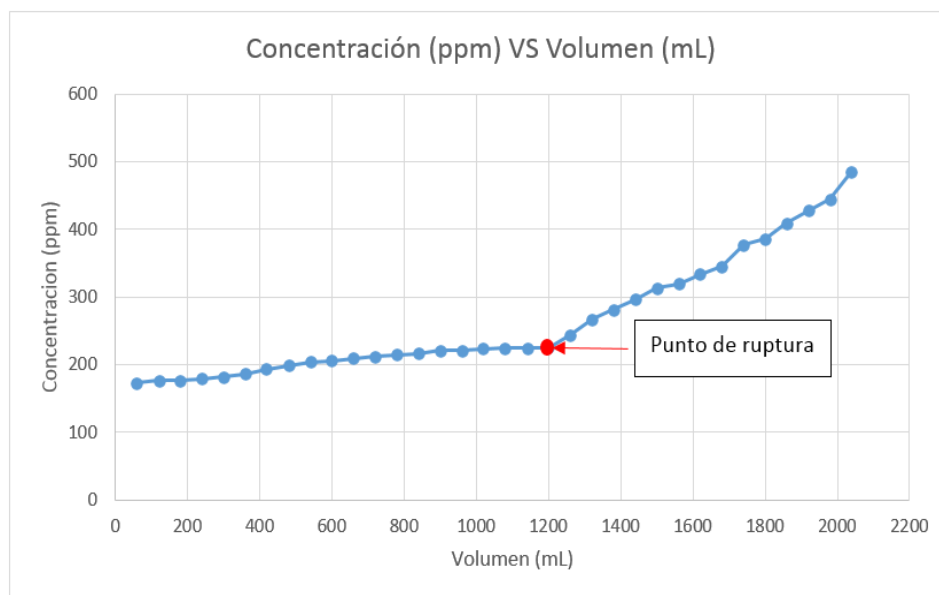


Fig. 2- Onda de adsorción de la resina Amberlita IRC-50

Con la determinación del punto de ruptura para las ondas de cada resina, se calcularon los porcentajes de remoción y la capacidad adsorptiva de las mismas las que se muestran en la tabla 5

Tabla 5- Análisis comparativo de las resinas estudiadas

Resina	% Remoción	Capacidad de Adsorción mg /L de resina
Merck 4836	63	12 713,3
Amberlita IRC-50	63,7	38 458,2

Como se aprecia en la tabla 5 los porcentajes de remoción de iones hasta el punto de ruptura de ambas resinas son similares, sin embargo para la Amberlita IRC-50, la capacidad de adsorción es tres veces superior, por lo que se selecciona la misma, para el escalado en las columnas de la fábrica. En la tabla 6 se muestran los parámetros de calidad del agua tratada con Amberlita en el punto de ruptura y se comparan con los parámetros establecidos en la norma interna de la fábrica

En la tabla 6 se observa que los valores de conductividad en el punto de ruptura, que es el que se toma como parámetro, para determinar el agotamiento del lecho, está en el rango de lo reportado por la norma interna para el agua empleada en la elaboración de cervezas claras y es el punto que se toma para el escalado del sistema para la fábrica

Tabla 6- Valores de la muestra al punto de ruptura comparada con la norma interna

Parámetros	Muestra del agua tratada en el punto de ruptura	Norma interna de elaboración de cervezas
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	351	200-625
Dt (mg/L CaCO_3)	0	116-207
Concentración de Ca (mg/L)	0	30-50
Concentración de Mg (mg/L)	0	10-20

Evaluación del sistema de dos columnas de la fábrica con la resina seleccionada en el estudio y su regeneración

En la metodología seleccionada para el escalado ⁽¹³⁾ se cumplen los principios de similitud geométrica, relación de alturas y diámetros constante entre el modelo y el prototipo; térmica, el rango de temperatura de trabajo no varía;

cinemática, las propiedades físicas del fluido se mantienen constantes de una escala a otra, para garantizar el régimen de transferencia de masa y dinámica, se trabaja en régimen laminar. ⁽¹⁶⁾ Para la similitud química fue tomada, la capacidad de adsorción de la cama, constante de una escala a otra, usando la ecuación 3, para procesar 2000L de agua por día de trabajo de la planta. Se obtuvo como resultado que el volumen de resina necesario para la columna a escala industrial sería de 24,5 L. Para las dimensiones de las columnas de la fábrica de 165 cm de altura y 30,5 cm de radio y tomando un 25% de expansión de la cama, recomendado en las especificaciones de esta resina; la altura de resina que necesita cada columna es de 132 cm y el volumen de resina de 385,3 L, por tanto se puede afirmar, que el intercambiador iónico con que se cuenta en la fábrica, con la resina Amberlita, sirve para tratar el flujo de agua necesario, e incluso uno muy superior; ya que tiene una capacidad, para un volumen de resina mayor para el flujo de agua que se necesita. El flujo de agua a tratar sería de 62 788 L de agua por ciclo, antes de regenerar la resina.

Para la regeneración Se determinó el flujo de operación recomendado por ficha para esta resina y usado en el modelo de 40 veces el volumen de la cama/hora, dando un flujo de 15 412 L/h, que fue el usado para calcular la cantidad de solución de ácido clorhídrico como regenerante. Las dos variantes estudiadas resultaron adecuadas para la regeneración a escala de laboratorio, ya que las ondas de adsorción dieron similares, mostrándose la de la variante 2 en la figura 3, en la que se puede observar que el área bajo la curva, correspondiente al volumen de resina regenerada, aumentó considerablemente, llegando alrededor del 96 % de regeneración en solamente 60 minutos. Se logró realizar la regeneración de la mayor parte de la resina alrededor de los 40 minutos quedando solo el 16% del volumen de resina sin regenerar, evidenciándose con ello que el flujo usado es el adecuado. Además, se puede observar el comportamiento de la regeneración y el movimiento de la zona de transferencia de masa en el tiempo el cual aumentó considerablemente su velocidad de intercambio.

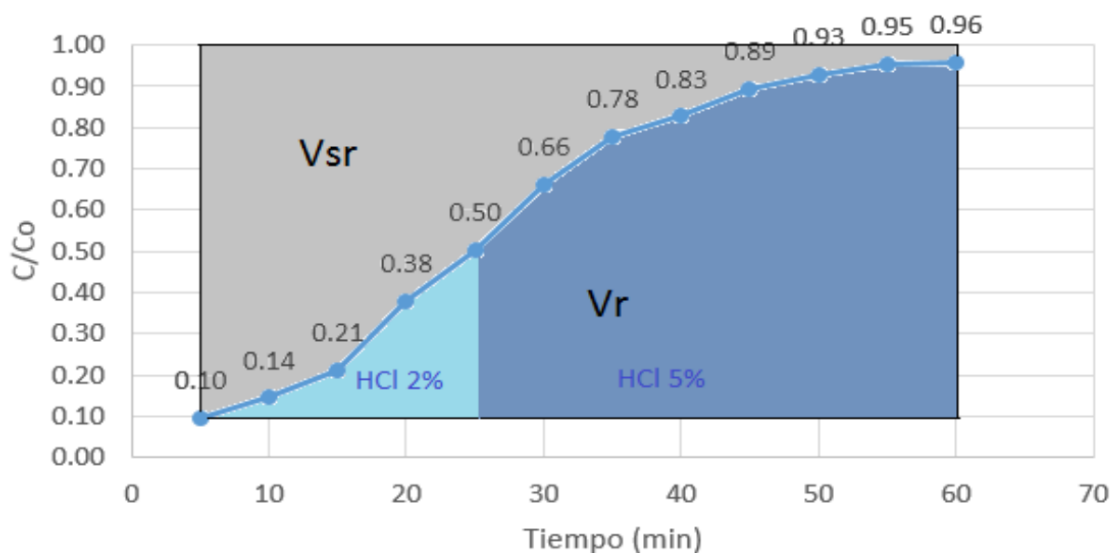


Fig. 3- Onda de adsorción de la regeneración de la resina Amberlita IRC-50, variante 2

De acuerdo a la figura 3 de la variante 2 estudiada se selecciona la misma, pues resulta más económica, ya que se emplea un volumen de 175 mL de HCl al 2% m/v durante los primeros 25 minutos de la regeneración y luego una solución de 125 mL de HCl al 5% m/v en el tiempo restante, a diferencia de la variante 1 que utiliza el mismo volumen de 300 mL pero de HCl al 5% m/v la cual consume más HCl.

Esto se tuvo en cuenta para calcular los gastos de regenerante y de agua de lavado, en el sistema, los cuales fueron de 1 284,4 L de solución de HCL al 2 % y 1 798 L de solución al 5% y los consumos de agua de 4 623 L.

Conclusiones

1. La caracterización del agua de la cervecería permitió determinar, que esta no cumple con los rangos de dureza de 116- 207 mg/L (CaCO_3) establecidos para las cervezas claras.
2. La resina apropiada para el tratamiento del agua es la Amberlita, la cual posee una capacidad de adsorción de 38 458,2 mg/L de resina.
3. El escalado a nivel industrial de la columna de intercambio iónico existente, permitió determinar la capacidad de tratamiento de agua por ciclo que fue de 62 788 L, así como los consumos de agua y ácido clorhídrico en el ciclo de regeneración y enjuague de 7 401,14 L y 304,1 L respectivamente.

Referencias bibliográficas

1. FERREYRA Leonel. Elaboración de cerveza: Historia y evolución, desarrollo de actividades de capacitación e implementación de mejoras tecnológicas para productores artesanales. Cátedra de Agroindustrias y Laboratorio de investigación en Productos Agroindustriales, Facultad de Cs. Agrarias y Forestales. UNLP. 2014. <https://lipa.agro.unlp.edu.ar/wp-content/uploads/sites/29/2020/03/Trabajo-Final-Leonel-Ferreyra-.pdf>.
2. TOVAR, M. Qué es la cerveza artesanal. México 2016. [Consultado 01 agosto 2024] <https://www.cervezaartesanal mexicana.mx/cultura-cervecera/que-es-la-cerveza-artesanal>
3. ENIGMA, Proceso de elaboración de nuestras cervezas. 2019. [Consultado 01 agosto 2024] <http://www.cervezasenigma.com/es/blog/83-conoces-el-proceso-de-elaboracion-de-nuestras-cervezas-aqui-te-lo-contamos>
4. FLÓREZ BENITO, Jorge J. *Planta de acondicionamiento de agua para fabricación de cerveza artesanal*. Proyecto de fin de grado en Ingeniería Química. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, 2020. [Consultado 01 agosto 2024] <https://ingemecanica.com/proyectos/objetos/proyecto157.pdf>
5. SALAMANCA, E. Tratamiento de aguas para el consumo humano. *Módulo Arquitectura CUC*. 2016. **17** (1), 29-48. [Consultado 01 agosto 2024]. ISSN : 0124-6542 <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/article/view/1527>
6. ARVENGTRAINING. Tratamiento de agua por Intercambio iónico. Categoría: Process Engineering. <https://arvengtraining.com/tratamiento-de-agua-por-intercambio-ionico/>
7. HIDALGO DOMÍNGUEZ, F. E. H.; GUZMÁN PÉREZ M.V. *Diseño y construcción de un desmineralizador de lecho múltiple*. Repositorio Institucional Universidad de Guayaquil. 2006. [Consultado 28 febrero 2024] <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/746>
8. REYNA AVILA, B. *El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico*. Trabajo de investigación para obtener el título de Ingeniero Químico Industrial. Instituto Politécnico Nacional. México, DF 2014. [Consultado 01

agosto 2024] https://www.academia.edu/37829834/INSTITUTO_POLITECNICO_NACIONAL

9. VILLEGA, A. B. *Acondicionamiento y optimización del agua utilizada para la elaboración de cerveza y servicios*. Trabajo de investigación para obtener el título de Máster en LA Universidad Autónoma de Nuevo León 2002. [Consultado 01 agosto 2024] <http://eprints.uanl.mx/6626/1/1080117198.PDF>

10. TREYBAL, R: E. *Operaciones de Transferencia de Masa*, 2da Edición. McGRAW-HILL Revisión técnica: Dr. Francisco José Lozano. UNAM. Mexico. <https://fenomenosdetransporte.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/operaciones-de-transferencia-de-masa-robert-e-treybal.pdf>

11. LENNTECH. 2017. *Menú de conversor de unidades de conductividad*. ca 2017 [Consultado 01 agosto 2024]

<https://www.lenntech.es/calculadoras/conductividad/conductividad.htm>

12. PÉREZ MILIAN, Y.; GALLARDO AGUILAR, I.; SARRIA QUESADA.F.; PÉREZ PENTON, M.“Purificación de jarabes glucosados mediante intercambio iónico para su posterior conversión a jarabes fructosados”. *AFINIDAD*.2020, **77** (591) pp. 209-214 [Consultado 01 agosto 2024].ISSN : 0001-9704

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7763093>

13. LEIVA-MAS,J. ;MARTÍNEZ-NODAL, P. ; ESPERANZA-PÉREZ, G; RODRÍGUEZ-RICO I.L.; GORDIZ-GARCÍA, C. E. “Absorción de hidrocarburos en columnas rellenas con bagazo: una solución sostenible”. *ICIDCA*. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, **46** (3), septiembre-diciembre, 2012, pp.36-44. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223124988005.pdf>. ISSN 2410-8529

14. SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, A., RODRÍGUEZ RICO I. L., CABRERA CARRAZANA R. J. y GUERRA VALDÉS B. 2016. Evaluación, modelización y optimización de una columna de intercambio iónico empleada en el tratamiento de aguas de procesos. *AFINIDAD*. 2016, **73**(575), pp. 210-218 [Consultado 01 marzo 2024 <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5767168> ISSN : 0001-9704.

15. VENEGAS ORTIZ, Daniel Alejandro. Evaluación de una columna de intercambio iónico para el tratamiento de agua destinada a la producción de cerveza artesanal en la Factoría Santa Ana. 2019. Tesis en opción al título de Ingeniero Químico Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Cuba.

<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/11682/Venegas%20Ortiz%2C%20%20Daniel%20Alejandro.pdf?sequence=1&isAllowed=>

16. CASTELLANOS GONZÁLEZ Roberto A. *Principios Básicos de Escalado*
Publisher: Editora Universitaria, Habana, 2018. Cuba ISBN: 959-16-0112-3.

[Consultado 01 agosto 2024].

https://www.researchgate.net/publication/325908683_Principios_Basicos_de_Escalado.

Conflicto de interés

No existen conflictos de intereses entre los autores

Contribución de los autores

Irenia gallardo Aguilar: dirigió la investigación desde la conceptualización de la misma, análisis de los resultados y estructuración del artículo.

Yisel Pérez Milián: colaboró como profesora en la realización de los experimentos y en el análisis de los resultados

Yamila García Limonta: llevó a cabo los estudios experimentales como estudiante de pregrado.

