

Diseño de un sistema de ablandamiento de agua mediante el intercambio iónico para abastecer dos calderos de 30 BHP

Design of a water softening system using ion exchange to supply two 30 BHP boilers

Projeto de um sistema de amaciamento de água usando troca iônica para abastecer duas caldeiras

Pacherres Uchalín, Manuel Anthony¹

<https://orcid.org/0000-0002-8771-1061>

Saldaña Bernuy, Luis Fernando²

<https://orcid.org/0000-0002-2192-4435>

Recibido: 18.09.2023

Aceptado: 18.11.2023

RESUMEN

El diseño de un sistema de ablandamiento de agua mediante el intercambio iónico para abastecer dos calderos de 30 BHP, se desarrolló para proporcionar agua de alimentación en rangos permisibles de trabajo. El agua es considerada una sustancia pura, pero existen ciertos minerales como el calcio y magnesio que generan dureza en la misma, esta dureza es causante de las incrustaciones y formación de caliche en los equipos térmicos que se ven afectados en su rendimiento al momento de su operación. Los resultados, se diseñaron los equipos principales del sistema de ablandamiento de agua, un tanque de ablandamiento 3.08 ft³ que utiliza 2 ft³ de resina catiónica fuerte ResinTECH CG8, un tanque de salmuera de 18x26 in que utilizará 14 kg de NaCl, el sistema de ablandamiento será controlado por una válvula automática WS1 de la marca Clack y el ensamblaje se hará utilizando tuberías de 1 in de diámetro.

Palabras clave: Sistema de ablandamiento, intercambio iónico, dureza y equipos térmicos.

ABSTRACT

The design of a water softening system using ion exchange to supply two 30 BHP boilers was developed to provide feed water in permissible working ranges. Water is considered a pure substance, but there are certain minerals such as calcium and magnesium that generate hardness in it, this hardness is the cause of incrustations and caliche formation in the thermal equipment that is affected in its performance at the time of its operation. The results, the main equipment of the water softening system was designed, a 3.08 ft³ softening tank that uses 2 ft³ of ResinTECH CG8 strong cationic resin, an 18x26 in brine tank that will use 14 kg of NaCl, the softening system will be controlled by a Clack brand WS1 automatic valve and the assembly will be done using 1 in diameter pipes.

Keywords: Softening system, ion exchange, hardness and thermal equipment.

RESUMO

O projeto de um sistema de amaciamento de água utilizando troca iônica para alimentar duas caldeiras de 30 BHP foi desenvolvido para fornecer água de alimentação em faixas de trabalho permitidas. A água é considerada uma substância pura, mas existem certos minerais como o cálcio e o magnésio que nela geram dureza. Essa dureza causa formação de incrustações e caliche nos equipamentos térmicos que prejudicam seu desempenho no momento do uso. Como resultados, foram projetados os principais equipamentos do sistema de amaciamento de água, um tanque de abrandamento de 3,08 pés³ que utiliza 2 pés³ de resina catiônica forte ResinTECH CG8, um tanque de salmoura de 18x26 que utilizará 14 kg de NaCl, o sistema de abrandamento será controlado por válvula automática WS1 da marca Clack e a montagem será feita com tubos de 1 polegada de diâmetro.

Palavras-chave: Sistema de amaciamento, troca iônica, dureza e equipamentos térmicos.

¹ Universidad Estadual Paulista. Guaratinguetá. Brasil. Ingeniero. manuel.pacherres@unesp.br

² Universidad Estadual Paulista. Guaratinguetá. Brasil. Ingeniero. luis.bernuy@unesp.br

Introducción

El ablandador de agua es una unidad diseñada para eliminar los iones de calcio y magnesio de un volumen determinado, en un tiempo definido; es un equipo que, por medios mecánicos, químicos y/o electrónicos trata el agua para reducir el contenido de sales minerales y sus incrustaciones en tuberías y depósitos de agua (Cervantes, 2015). Dureza. La dureza del agua está determinada por la cantidad de sales de calcio y magnesio que contenga. Mientras más sales de calcio y magnesio tengan, mayor será su dureza. La dureza es una característica perjudicial para las calderas (Abarca, 2008). Intercambio iónico. El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales (Nevárez, 2009).

Ciclos de funcionamiento del ablandador de agua, basado en el trabajo de (Hidalgo y Guamán, 2006), podemos indicar:

Etapas de servicio: Es la etapa en donde se efectúa el intercambio iónico, el agua a tratar fluye constantemente por la columna en donde se encuentra contenida la resina. Es el ciclo en donde ocurre el ablandamiento del agua, es en este ciclo en donde se ajusta la velocidad de flujo.

Etapas de retrolavado: Es considerada la primera etapa de regeneración de la resina, en donde ocurre el retrolavado, con el fin de expandir la resina en toda la columna, liberándola de la posible turbidez presente en el lecho, así como también sedimentos que se acumulan durante el proceso de servicio del ablandador (Saha et al., 2020)

Etapas de regeneración: La resina se desgasta durante la etapa de servicio por la sustitución de iones, llegando a un punto denominado, saturación, en el caso particular, para la regeneración de la resina se aplica una solución de Cloruro de Sodio, llamada también solución de salmuera, la cual se hace fluir por el lecho de resina con la finalidad de retirar los iones calcio y magnesio, sustituyéndolos por sodio (Manahan, 2007). Se puede distinguir: **Regeneración co-corriente:** Es la regeneración en donde el flujo se la solución regenerante se hace pasar en la misma dirección que el agua a tratar. Requiere de excesivos volúmenes de salmuera para realizar una sustitución de los iones, la misma que es desigual en las capas de la resina (Azogue, 2022). **Regeneración contracorriente:** Es aquel proceso en donde la salmuera se hace fluir en sentido opuesto al del agua a ser tratada, siendo este el método más eficiente para esta etapa, la fuga iónica es baja, la cantidad de regenerante es menor en comparación con el anterior método (Azogue, 2022).

Etapas de enjuague:

Podemos distinguir: **Enjuague lento:** En esta etapa se hace fluir el agua cruda, una vez terminada la regeneración de la resina. Tiene como propósito, eliminar los restos de solución salina, así como también una completa recuperación de la resina y la adaptación de la misma para el nuevo proceso de ablandamiento (Hidalgo y Guamán, 2006). **Enjuague rápido:** La etapa de enjuague rápido, en donde se pasa un flujo a mayor velocidad para lograr una compactación de la resina, y la eliminación total de salmuera.

Etapas de llenado del tanque de salmuera: Esta etapa cumple una función importante, que es la preparación del tanque de salmuera para la siguiente regeneración de la resina. Proceso que se puede realizar en paralelo con la incorporación del ablandador al nuevo ciclo de tratamiento (Osazuwa y Abidin, 2020).

Parámetros de diseño: Existen parámetros de diseño que deben ser considerados para la construcción de ablandadores de tipo iónico. Es necesario cumplir con estos parámetros para de esta manera conseguir condiciones ideales; que en el mundo de los tratamientos de agua se las conoce como “Condiciones Hidráulicas”. Los parámetros de diseños son: (Cervantes, 2015).

Altura mínima del lecho de resina (h): Se refiere a la altura mínima que debe tener un lecho de resina, esto en función de que debe existir un tiempo mínimo de contacto entre el agua dura y las resinas para garantizar que se lleve a cabo el intercambio de iones. Se establece como altura mínima el valor de 30 in (76.2 cm) (Owens,1995).

Altura de pared lateral mínima (H): Es la altura mínima que deberá tener el tanque donde se producirá el intercambio iónico, en función de la profundidad mínima del lecho; se define el valor de “la pared lateral mínima” en 48 pulgadas el cual se obtiene de la siguiente manera: (Owens, 1995).

Material y métodos:

Para el presente trabajo de investigación se requieren los siguientes parámetros de operación, los cuales servirán de inicio de nuestro diseño:

Datos para el diseño:

1. Dureza del agua: 500 ppm
2. Origen del agua: Pozo
3. Temperatura del agua: 21 °C
4. Sistema requerido: Simple
5. Tipo de control: Automático
6. Tipo de flujo: Continuo

Concentración total de sólidos disueltos, para convertir ppm de CaCO₃ a granos/gal de CaCO₃ se usa un factor de conversión.

$$\text{Concentración total de sólidos disueltos} = \frac{\text{Dureza}}{17.1}$$

$$\text{Concentración total de sólidos disueltos} = \frac{500}{17.1} = \frac{29.24 \text{ granos}}{\text{galón}}$$

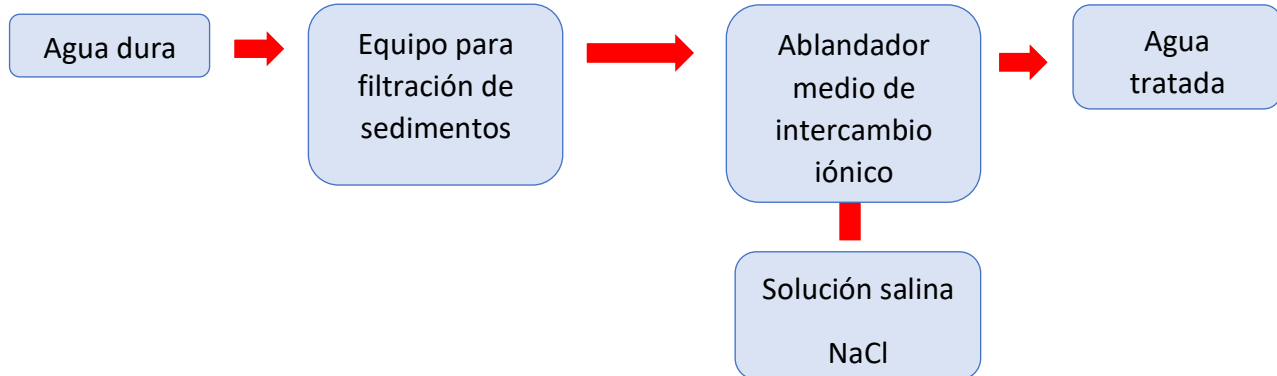


Figura 1. Proceso de ablandamiento de agua

Resultados

El agua blanda requerida por el equipo ablandador de agua se dimensiona en función de una cantidad de flujo que se requiere, por lo tanto, determinaremos el flujo o caudal requerido para abastecer los equipos térmicos existentes. Las calderas existentes tienen una potencia de 30 BHP; en condiciones normales una caldera consume 4.25 galones de agua cada hora por cada BHP de potencia de donde se deriva la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{4.25 \text{ gal}}{\text{hr} * \text{BHP}} * (P)\text{BHP}$$

Donde:

Q = caudal requerido (gal/h)

P = potencia de la caldera (BHP)

$$Q = \frac{4.25 \text{ gal}}{\text{hr} * \text{BHP}} * 60 \text{ BHP} * \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = 4.25 \text{ gpm}$$

Para abastecer ambas calderas de 30 BHP se necesitará suministrar un flujo de agua de 4,25 gpm. Capacidad de trabajo: Se determina la capacidad de trabajo que deberá tener el equipo y se calcula a través de dos parámetros fundamentales que son: dureza y caudal.

$$\text{Cap} = Q * D * fs$$

Donde:

$$Q = \text{caudal requerido (gal/día)} = \frac{4.25 \text{ gal}}{\text{min}} * \frac{6,5 \text{ hr}}{\text{día}} * \frac{60 \text{ min}}{\text{día}} \quad Q = 1657.5 \text{ gal/día}$$

$$D = \text{Dureza} = 29.24 \text{ granos/gal}$$

$$fs = \text{factor de seguridad} = 1.15$$

Reemplazando los valores, obtenemos:

$$\text{Cap} = \frac{1657.5 \text{ gal}}{\text{día}} * \frac{29.24 \text{ granos}}{\text{gal}} * 1.15 = \frac{55735.09 \text{ granos}}{\text{día}}$$

Dimensionamiento del lecho de resina: Seleccionamos la resina de marca Resintech modelo CG8 u cationes de poliestireno gelificado y sulfonado, de alta calidad y capacidad, que se suministra en forma de sodio o hidrógeno como perlas esféricas húmedas, resistentes y uniformes. Está destinado para su uso en todas las aplicaciones de ablandamiento de agua, desalcalización y desionización, esta resina es de tipo catiónica de ácido fuerte, según la misma 1 ft³ de resina contiene 33000 granos, con esta premisa determinaremos el volumen de resina a utilizar.

$$\begin{array}{l} 33000 \text{ granos} \longrightarrow 1 \text{ ft}^3 \\ 55735.09 \text{ granos} \longrightarrow V_r \\ V_r = \frac{55735.09 * 1}{33000} = 1.70 \text{ ft}^3 \end{array}$$

Comprobamos con la siguiente fórmula:

$$V_r = \frac{Q * \text{Dureza}}{\text{Capacidad de intercambio} * 17.1}$$

$$\text{Volumen de resina al 100\%:} \quad V_r = \frac{1657.5 \text{ gal} * 500 \text{ ppm}}{33000 \frac{\text{granos}}{\text{ft}^3} * 17.1 \frac{\text{ppm}}{\text{granos}} * \frac{\text{gal}}{\text{gal}}} = 1.47 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volumen de resina al 75\%:} \quad V_r = \frac{1657.5 \text{ gal} * 500 \text{ ppm}}{33000 \frac{\text{granos}}{\text{ft}^3} * 17.1 \frac{\text{ppm}}{\text{granos}} * 0.75 \frac{\text{gal}}{\text{gal}}} = 1.96 \text{ ft}^3$$

$$\text{Seleccionamos el tanque:} \quad V_{\text{resina}} = 2 \text{ ft}^3$$

Seleccionamos el tanque comercial:

$$\varnothing = 12 \text{ in} \quad H = 52 \text{ in} \quad A = 0.78 \text{ ft}^2$$

$$\text{Longitud del tanque:} \quad V_{\text{cilindro}} = 3.08 \text{ ft}^3$$

$$H_{\text{cilindro}} = \frac{V_{\text{cilindro}}}{A_{\text{cilindro}}} = \frac{3.08 \text{ ft}^3}{0.78 \text{ ft}^2} = 3.95 \text{ ft} = 47.38 \text{ in}$$

$$\text{Altura de la resina:} \quad h_{\text{resina}} = \frac{V_{\text{resina}}}{A_{\text{cilindro}}} = \frac{2 \text{ ft}^3}{0.78 \text{ ft}^2} = 2.56 \text{ ft} = 30.76 \text{ in}$$

$$\text{Altura de la cama de expansión:} \quad h_{\text{expansión}} = 37.5\% (h_{\text{resina}}) = \frac{37.5}{100} (30.76 \text{ in}) = 11.54 \text{ in}$$

$$\text{Altura grava:} \quad H_{\text{cilindro}} = h_{\text{resina}} + h_{\text{expansión}} + h_{\text{grava}} = 47.4 - 30.8 - 11.5 = 5.1 \text{ in}$$

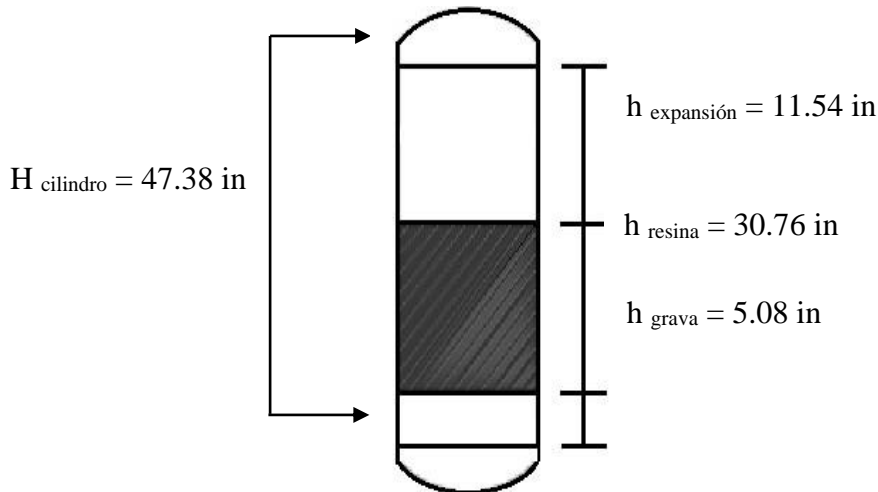


Figura 2. Dimensiones del ablandador

Selección de la válvula de control automática, con los parámetros hallados seleccionamos la siguiente válvula automática:

Marca: Clack

Modelo: WS1

Tensión: 220/110 V

Rango del flujo volumétrico: 0.25 – 27 gpm

Rango de temperatura: 4.5 – 44 °C

Diámetro de tanque: 6 a 22 in

Selección de los distribuidores:

Marca: Carbotecnia

Tipo: Johnson

Material: Acero inoxidable

Flujo máximo: 10 gpm

Flujo máximo de retrolavado: 14.5 gpm Caudal de retrolavado:

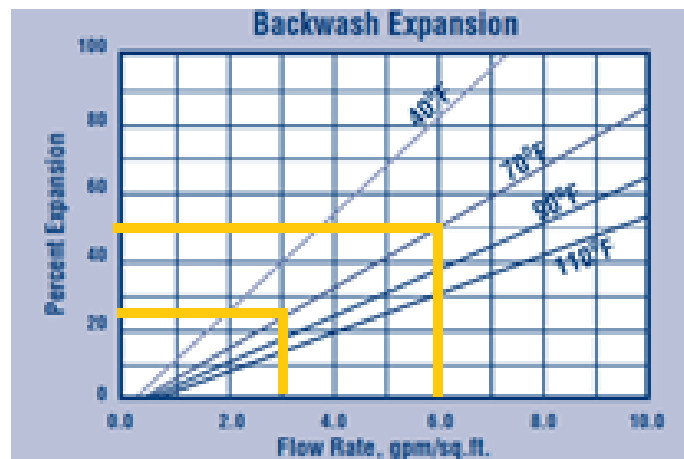


Figura 3. Valores del caudal de retrolavado mínimo y máximo

Flujo de retrolavado mínimo: $3 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2}$

Flujo de retrolavado máximo: $6 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2}$

Caudal de retrolavado mínimo:

$$Q_{\text{retrolavado mínimo}} = 3 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2} * 0.78 \text{ ft}^2 = 2.34 \text{ gpm}$$

Caudal de retrolavado máximo: $Q_{\text{retrolavado mínimo}} = 6 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2} * 0.78 \text{ ft}^2 = 4.68 \text{ gpm}$

Dimensionamiento del tanque de salmuera:

Cantidad de cloruro de sodio:

$$\begin{array}{l} 1 \text{ ft}^3 \longrightarrow 15 \text{ lb NaCl} \\ 2 \text{ ft}^3 \longrightarrow \text{Cantidad}_{\text{NaCl}} \\ \text{Cantidad}_{\text{NaCl}} = \frac{2 \text{ ft}^3}{1 \text{ ft}^3} * 15 \text{ lb NaCl} = 30 \text{ lb NaCl} \end{array}$$

$$\text{Cantidad}_{\text{NaCl}} = 30 \text{ lb NaCl} * \frac{1 \text{ kg NaCl}}{2.2 \text{ lb NaCl}} = 13.64 \text{ kg NaCl} \approx 14 \text{ kg NaCl}$$

Tamaño del tanque de salmuera: El compuesto que se utilizará para regenerar la resina catiónica fuerte será una solución en agua de cloruro de sodio (NaCl), mejor conocida como sal en grano. Esta solución se debe preparar a una concentración del 26%.

$$\begin{array}{l} 2,6 \text{ lb NaCl} \longrightarrow 1 \text{ gal H}_2\text{O} \\ 30 \text{ lb NaCl} \longrightarrow \text{Cantidad}_{\text{H}_2\text{O}} \\ \text{Cantidad}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{30 \text{ lb NaCl}}{2 \text{ lb NaCl}} * 1 \text{ gal H}_2\text{O} = 11.54 \text{ gal H}_2\text{O} \end{array}$$

Seleccionamos un tanque de siguientes dimensiones de 18x26'' para una capacidad 27 galones de la marca Clack. Calculamos los tiempos de regeneración del sistema ablandador:

Tiempo de retrolavado:

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi}{4} (12^2) * 52 = 5881.06 \text{ in}^3 \\ V &= 5881.06 \text{ in}^3 * \frac{1 \text{ l}}{61.0237 \text{ in}^3} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} = 25.46 \text{ gal} \end{aligned}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{retrolavado}} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Flujo de retrolavado}}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{retrolavado máximo}} = \frac{25.46 \text{ gal}}{2.34 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 10.88 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{retrolavado mínimo}} = \frac{25.46 \text{ gal}}{4.68 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 5.45 \text{ min}$$

Succión de salmuera:



Figura 4. Flujo de succión de salmuera

$$\text{Flujo}_{\text{succión}} = 0.37 \text{ gpm}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{succión}} = \frac{\text{Volumen de salmuera}}{\text{Flujo}_{\text{succión}}} = \frac{11.54 \text{ gal}}{0.37 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 31.19 \text{ min} \approx 32 \text{ min}$$

Enjuague:



Figura 5. Flujo de enjuague

$$\text{Flujo}_{\text{enjuague}} = 0.48 \text{ gpm}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{enjuague}} = \frac{\text{Volumen de salmuera}}{\text{Flujo}_{\text{enjuague}}} = \frac{11.54 \text{ gal}}{0.48 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 24.24 \text{ min} \approx 24 \text{ min}$$

Reposición de agua al tanque de salmuera:

Tabla 1
Tasa de flujo para el restrictor

Control de flujo	Tasa de flujo (GPM)
V3162	0.5
V3162-007	0.7
V3162-010	1
V3162-013	1.3
V3162-017	1.7
V3162-022	2.2
V3162-027	2.7
V3162-032	3.2
V3162-042	4.2
V3162-053	5.3
V3162-065	6.5
V3162-075	7.5
V3162-090	9
V3162-100	10

$$\text{Tiempo}_{\text{reposición}} = \frac{11.54 \text{ gal}}{1 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 11.54 \text{ min} \approx 12 \text{ min}$$

Velocidad lineal:
$$v_l = \frac{4.25 \text{ gpm}}{0.78 \text{ ft}^2} = 5.45 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2}$$

La velocidad lineal debe encontrarse entre 4 a 10 $\frac{\text{gpm}}{\text{ft}^2}$; el valor que obtuvimos anteriormente está dentro del rango, con lo cual comprobamos la validez de los resultados.

Velocidad espacial:
$$v_e = \frac{4.25 \text{ gpm}}{3.08 \text{ ft}^3} = 1.38 \frac{\text{gpm}}{\text{ft}^3}$$

La velocidad espacial debe encontrarse entre 0.25 y 5 $\frac{\text{gpm}}{\text{ft}^3}$; el valor que obtuvimos anteriormente está dentro del rango, con lo cual comprobamos la validez de los resultados.

Criterios de selección para las tuberías del ablandador: En función del caudal de 4,25 galones/minuto para el cual se diseñó el equipo y la presión hidráulica existente en la red, se decidió utilizar tuberías de material PVC. Este material posee ventajas comparativas con relación a otro tipo de tuberías: es económico, flexible, durable, de poco peso y de fácil transporte e instalación; además, son las tuberías que incluyen diámetros comerciales menores de 2 pulgadas y que fácilmente se encuentran en el mercado.

El diámetro de las tuberías se seleccionó considerando la capacidad de flujo normal en tuberías.

Tabla 2

Capacidad de flujo en tuberías

CAPACIDADES DE FLUJO EN TUBOS - Normal a máxima	
1" = 16-30 gpm	3" = 120-270 gpm
1-1/4" = 31-35 gpm	4" = 250-500 gpm
1-1/2" = 40-70 gpm	6" = 500-1100 gpm
2" = 65-120 gpm	8" = 1000-2000 gpm
2-1/2" = 80-170 gpm	10" = 1500-3000 gpm

Con esta tabla se determinó el diámetro de las tuberías Ø 1", la cual cumple con las condiciones necesarias. Tubería de PVC de Ø 1: La denominación de tuberías PVC proviene del policloruro de vinilo, que es un polímero termoplástico. "Termoplástico" implica que a temperatura ambiente los materiales presentan características más rígidas que cuando la temperatura es aumentada.

Selección de válvulas y tuberías: La oferta en diseños y tipos de válvulas es muy amplia y ofrece múltiples posibilidades, por lo cual se debe seguir una secuencia lógica de parámetros para su selección. Naturalmente estos parámetros estarán influenciados por factores ajenos al aspecto técnico tales como la disponibilidad, o economía.

Válvula de globo: para el trabajo que realiza el ablandador, este tipo de válvula es la más apropiada ya que son de fácil apertura, durables y económicas: excelentes características de flujo, no se corroe y no hay desgaste, presión máxima de trabajo: 232 psi y Rosca NPT



Figura 6. Válvula de globo

Accesorios de PVC: elementos fabricados en PVC (Policloruro de vinilo), como: este material garantiza la conservación de la calidad del agua, presión máxima de trabajo: 235 psi y resistencia a la corrosión interna



Figura 7. Accesorios de PVC.

Manómetro: Para la selección de manómetros generalmente se selecciona un rango de presión dos veces la presión de operación de trabajo y está debe limitarse al 75% del rango del manómetro de presión.



Figura 8. Manómetro

Discusión

El diseño del sistema de ablandamiento de agua para suministrar 1657.5 galones diarios de agua blanda a los calderos destaca por su enfoque en la eficiencia operativa y la precisión técnica. A continuación, se analizan los aspectos más relevantes de este diseño en términos de capacidad, configuración, tiempos de regeneración y caudales, así como su impacto en la operación de la planta de vapor.

La capacidad de trabajo del sistema, calculada en 55,735.09 granos por día con 2 ft³ de resina catiónica fuerte, evidencia una adecuada selección del medio de intercambio iónico para cumplir con la demanda diaria. Las dimensiones del tanque comercial ($\varnothing = 12$ in, H = 52 in, V = 3.08 ft³) y el área transversal de 0.78 ft² garantizan una distribución uniforme del flujo y minimizan la pérdida de carga, factores críticos para el rendimiento continuo del sistema. El tanque de salmuera, con una capacidad de 27 galones y un consumo de 14 kg de NaCl por ciclo de regeneración, asegura una regeneración eficiente del lecho de resina. La elección de la válvula de control automática WS1 de Clack, con un rango de operación de 0.25 a 27 gpm, es particularmente acertada para manejar la variabilidad en el flujo, permitiendo una operación automática y consistente.

Conclusiones

El sistema de ablandamiento de agua está diseñado para suministrar 1657.5 galones por día de agua blanda a los calderos cuenta con una capacidad de trabajo de 55735.09 granos por día utilizando 2 ft³ de resina catiónica fuerte y el tanque comercial cuenta con las siguientes dimensiones.

$$\varnothing = 12 \text{ in, H} = 52 \text{ in, A} = 0.78 \text{ ft}^2, V_{\text{cilindro}} = 3.08 \text{ ft}^3$$

El sistema de ablandamiento de agua estará equipado con un tanque de salmuera de 18x26 in con una capacidad para 27 galones el cual utilizará 14 kg de NaCl, una válvula de control automática modelo WS1 con un rango de operación de 0.25 – 27 galones por minuto, ambos de la marca Clack y un distribuidor de acero inoxidable de la marca Carbotecnia con un flujo máximo de 10 galones por minuto, el ensamblado se realizará con tuberías de PVC de 1 in de Ø.

Se calculó los tiempos de regeneración que requiere el ablandador:

Retrolavado máximo: 10.88 min Retrolavado mínimo: 5.45 min

Succión: 32 min

Enjuague: 24 min

Reposición: 12 min

Se determinó los caudales de retrolavado:

$Q_{\text{retrolavado máximo}}: 10.88 \text{ min}$ $Q_{\text{retrolavado mínimo}}: 5.45 \text{ min}$

La velocidad lineal de 5.45 gpm/ft² y la velocidad espacial de 1.38 gpm/ft³ cumplen con los requisitos de operación para el sistema de ablandamiento de agua, con lo cual se comprueba la veracidad de los resultados obtenidos.

Referencias

Abarca, P. (2018). Agua de Alimentación de Calderas. ACHS. Dümmer, Chile.

Azogue G., S. M. (2022). *Estandarización de las condiciones de operación durante el proceso de intercambio iónico para la producción de gelatina en la empresa Gelco–Planta Ambato* (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica). <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/35746>

Cervantes A., L. A. (2015). Diseño y Construcción de un Ablandador de Agua mediante el empleo de Resinas de Intercambio Iónico para Abastecer los Equipos Térmicos del Laboratorio de Termodinámica (Bachelor's thesis). <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/9122>

Hidalgo, F., & Guamán, M. (2006). Diseño y construcción de un desmineralizador de lecho múltiple. *Universidad de Guayaquil. Mémoire de Baccalauréat. Chapitre, 2*, 35-46.

Manahan, S. E. (2006). *Introducción a la química ambiental*. Reverté.

Nevárez R., M. E. (2010). Optimización del proceso de regeneración de resinas de intercambio iónico para ser utilizadas en el desmineralizador de agua de la refinera estatal esmeraldas (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/253>

Owens, D. L. (1995). *Practical principles of ion exchange water treatment*. Tall Oaks Publishing.

Saha, A., Deb, M. K., Mahilang, M., Kurrey, R., & Sinha, S. (2020). Polymeric resins as nano-catalysts: A brief review. *J. Ind. Chem. Soc.*, 97, 1442-1454.

Osazuwa, O. U., & Abidin, S. Z. (2020). The functionality of ion exchange resins for esterification, transesterification and hydrogenation reactions. *ChemistrySelect*, 5(25), 7658-7670.