

Dimensionamiento de adsorbedores de carbón activado para el tratamiento de líquidos y gases



Ing. Germán Groso Cruzado
7 mayo, 2024



Atención a clientes:



Mis compañeros de atención a clientes que todos los días dan seguimiento a sus proyectos.

Departamento de ingeniería:

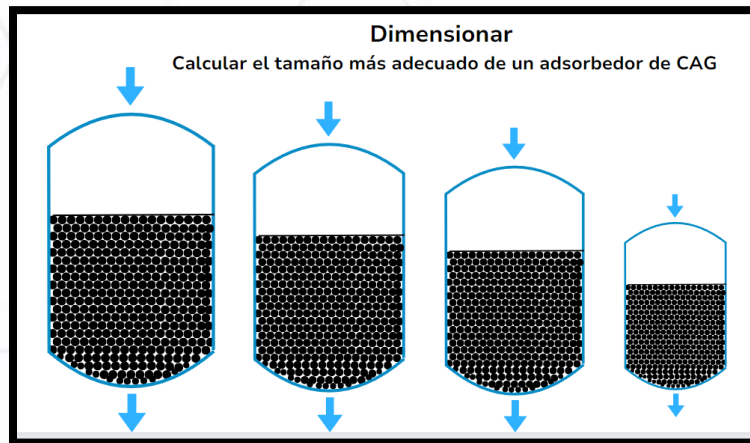


Departamento de logística y almacén:

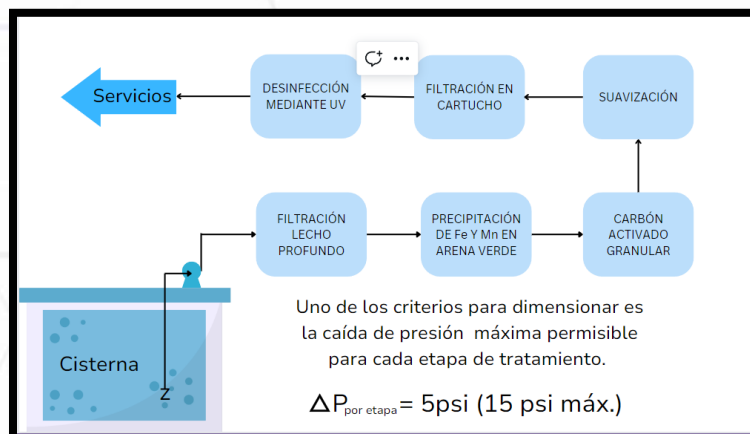


El tema de este webinar me lleva a destacar el trabajo del departamento de ingeniería. Aunque todos mis compañeros de dicha área son jóvenes, es un incipiente grupo de especialistas, que cada día adquieren mayores conocimientos en el ramo del carbón activado y de otros procesos de separación (purificación). También quiero aprovechar para presentar al equipo de logística y almacén, que hace un trabajo extraordinario.

Actualmente atendemos a más de 50,000 clientes registrados, y la logística se va volviendo tan importante, que hoy constituye un elemento central en la empresa.

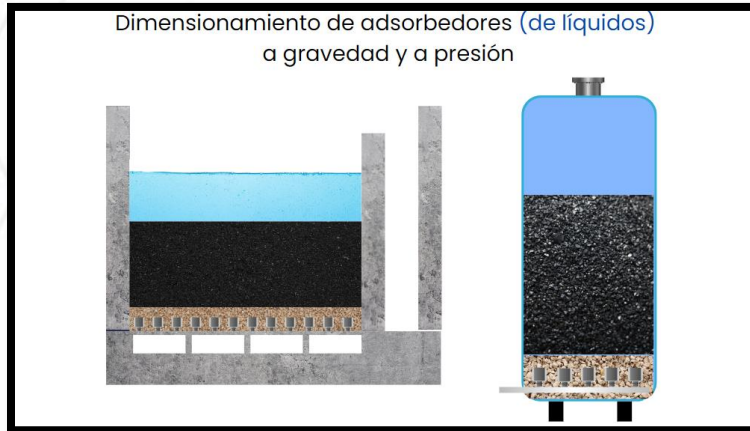


¿Cómo determinar el tamaño más adecuado del adsorbedor que requerimos?



Dimensionar los equipos de manera que cada etapa respete una caída máxima permisible es particularmente importante cuando una bomba alimenta a varias etapas de un tren de tratamiento. En trenes largos es típico que se utilice como criterio de caída de presión por etapa 5 psi, con un valor máximo de 15 psi. Puede haber excepciones, como es el caso de filtros de cartucho de algunas marcas de alta gama, que resisten caídas de presión mayores y que vale la pena aprovechar para maximizar su vida útil. Si solamente alimentaremos uno o dos procesos con la bomba, también hay que cuidar la caída de presión, ya que conlleva un costo energético.

¿Cómo controlar la caída de presión que ocasionará cada proceso? Diseñando equipos de suficiente área de sección transversal al flujo.



El procedimiento para dimensionar adsorbedores de CAG aplica tanto a los que operan a gravedad como a los que operan a presión.

Los datos fundamentales (que define el usuario)

Es muy importante solicitar la siguiente información a quien será el usuario del adsorbedor.

- 1) Características del líquido que se va a tratar y especificaciones que requiere cumplir el líquido tratado**
- 2) Flujo máximo instantáneo de servicio**

También vale la pena conocer si cuenta con cisternas o tanques intermedios que pueden ser útiles cuando la demanda de agua tratada no es constante durante las 24 h del día. Estas cisternas o

tanques pueden hacer la función de “balance” (cuando lo hacen, se les llama así: “tanques de balance”) y permiten diseñar un adsorbedor que opere de manera continua y produzca el agua que se demandará a lo largo del día, sin que tenga que generar el flujo máximo instantáneo que corresponde al momento de demandas altas.

EJEMPLO

- Usuario cuenta con pozo somero (profundidad menor a 50 m), con agua de buena calidad fisicoquímica, índice de Langelier de -0.3 a 20°C, con COT promedio de 7 mg/L. La máxima temperatura del agua en el año es de 25°C.
- El agua del pozo se someterá a cloración a 1 mg/L de cloro libre residual. Posteriormente se filtrará en lecho profundo de arena, para después tratarse con CAG. El objetivo no solo es que el carbón deactive el agua, sino que cumpla con los parámetros orgánicos que limita la NOM-127-SSA1-2021
- El flujo máximo instantáneo esperado es de 200 L/min.
- El usuario no desea que el adsorbedor se dimensione contemplando un sobrediseño en el flujo.

Ponemos un ejemplo para ir explicando el método para dimensionar adsorbedores.

CARACTERÍSTICA DEL CAG PROPUESTO PARA EL CASO DEL EJEMPLO

- Considerando que el pozo es somero (menos de 50 m de profundidad) y que el COT es relativamente alto, utilizaremos carbón activado mineral bituminoso, con un área superficial mayor a 800 mg/g (disponible comercialmente, a un precio competitivo).
- Con el objeto de obtener una buena cinética de adsorción y de, con esto, disminuir la zona de transferencia de masa, usaremos un carbón con granulometría 12x40 (disponible comercialmente a un precio competitivo).

Para el caso del ejemplo, proponemos usar un carbón activado de origen mineral bituminoso, ya que el pozo es somero y parte de las moléculas orgánicas que forman el COT pueden ser medianas o grandes. Si fuera un pozo profundo con un COT menor, habríamos propuesto un carbón de concha de coco ya que sería típico que las moléculas orgánicas fueran pequeñas, ya que las medianas y grandes no suelen llegar a mucha profundidad. Y proponemos 12x40 en lugar del típico 8x30 para lograr una mejor cinética, una zona de transferencia de masa más corta y un mayor tiempo para que el carbón llegue al punto de ruptura (en el que hay que cambiarlo porque deja de cumplir con la máxima concentración permisible del parámetro con el que evaluamos su desempeño).

El parámetro de diseño fundamental

(que aporta el especialista en CAG o el especialista en la aplicación particular que se le dará al CAG)

Habiendo definido el tipo de CAG a utilizar, el especialista puede proponer el parámetro de diseño más importante para cualquier carbón activado.

TIEMPO DE CONTACTO EN CAMA VACÍA

TCCV (min)

$$TCCV = \frac{V_c}{F}$$

V_c = volumen de la cama de CAG

F = flujo instantáneo de servicio

Es el tiempo de contacto en cama vacía. Como se observa, el TCCV se calcula dividiendo el volumen de la cama de carbón activado entre el flujo que se trata (flujo de servicio). El TCCV es el tiempo de residencia que tendría el agua en la cama de CAG, si esta se encontrara vacía. Ya que la porosidad típica en una cama de CAG es de alrededor del 40%, el tiempo de contacto entre el agua y el CAG es cercano al 40% del TCCV.

VALORES DE TCCV PARA EL TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS

**Típicamente
entre 20 s y 30 min**

El especialista en carbón activado propone el valor del TCCV con base en su experiencia. Es muy importante que este dato sea adecuado. Si el TCCV utilizado es demasiado chico, el CAG tendrá que remplazarse antes de lo planeado. Si es demasiado grande, el usuario hará una inversión mayor que la que habría sido necesaria.

Con el TCCV se calcula el volumen De la cama de CAG (Vc)

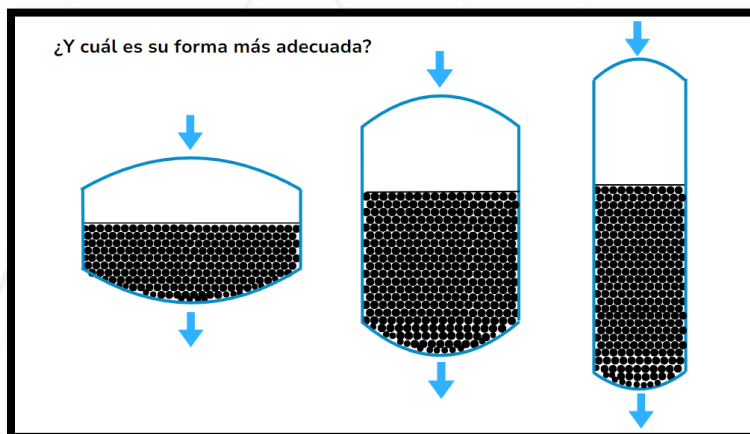
Para el caso del ejemplo, el TCCV recomendado por el fabricante del CAG es 10 min.

$$V_c = F \times \text{TCCV}$$

$$V_c = 200 \text{ L/min} \times 10 \text{ min}$$

$$V_c = 2000 \text{ L}$$

Con el dato del flujo de diseño del adsorbedor y el TCCV, se calcula el volumen de la cama de CAG.



Ya conocemos el volumen de la cama de CAG, pero ¿cuál es la forma más adecuada del recipiente? Los recipientes de la imagen tienen el mismo volumen, y muy diversas proporciones.

El parámetro de diseño que sigue en importancia

(que aporta el especialista en CAG o que decide el ingeniero de procesos que hace el diseño)

CARGA HIDRÁULICA O VELOCIDAD DE FLUJO

$$C_H (\text{gpm}/\text{ft}^2)$$

$$C_H = \frac{F}{A}$$

F = flujo instantáneo de servicio

A = área de sección de la cama de CAG

Con un valor de la carga hidráulica se pueden determinar las proporciones de la cama de CAG. La carga hidráulica se calcula dividiendo el flujo de servicio entre el área de sección (transversal al flujo) de la cama. Esto significa que corresponde a una velocidad de flujo, que podría expresarse en unidades de distancia/tiempo (como suele hacerse en la adsorción de gases o como suele hacerse en el intercambio iónico).

VALORES DE C_H PARA EL TRATAMIENTO DE LÍQUIDOS

- No menos de 1 gpm/ft^2 (para evitar flujo laminar).
- No más de 10 gpm/ft^2 en carbones bituminosos (para evitar demasiada erosión en el CAG).
- El ingeniero de proceso elige la C_H que no genere una caída de presión excesiva.

La fuerza de atracción que ejerce el carbón activado en los compuestos que adsorbe es de muy corto alcance. Si la carga hidráulica es muy pequeña, ocurre un flujo laminar que impide que estos compuestos (o que los compuestos, como el cloro libre, que reaccionan con el carbón) lleguen a la superficie del carbón. Y si los compuestos no llegan a la superficie del carbón, no se introducen en los poros. Por lo tanto, la carga hidráulica no debe ser muy pequeña. Suele recomendarse una carga hidráulica mayor a 1 gpm/ft^2 . Por otro lado, una carga hidráulica alta es deseable en cuanto a que genera turbulencia y facilita que los compuestos adsorbibles o que reaccionan con el carbón lleguen a su superficie. Sin embargo, si la carga hidráulica es demasiado alta, puede causar erosión en las partículas de carbón. Se suele recomendar no pasar de una carga hidráulica de 10 gpm/ft^2 para un carbón de origen bituminoso. El carbón de concha de coco tiene mayor resistencia mecánica, pero carbones de origen de madera o de lignita tienen menor resistencia mecánica.

Desde el punto de vista de la caída de presión que ocurre en el líquido que fluye a través de la cama de CAG, más adelante veremos que dicha caída de presión se puede estimar mediante gráficas que proporcionan los fabricantes de carbón. El ingeniero de proceso que diseña el adsorbedor requiere estimar dicha caída de presión. Mientras su valor esté dentro del rango seguro (ni demasiado pequeña ni demasiado alta), esta no debe ser excesiva respecto a la máxima que deba ocurrir en el adsorbedor.

Con el V_c y con la C_H , se calcula A , el área de sección (transversal al flujo) de la cama de CAG

$$\begin{aligned} F &= 200 \text{ L/min} \\ \text{TCCV} &= 10 \text{ min} \\ V_c &= 2000 \text{ L} \end{aligned}$$

Se propone operar con una C_H de $2.5 \text{ gpm/ft}^2 (101.8 \text{ Lpm/m}^2)$,

$$A = F / C_H \\ A = 200 \text{ Lpm} / (101.8 \text{ Lpm/m}^2) = 1.96 \text{ m}^2$$

Teniendo el volumen de cama y decidiendo el valor de la carga hidráulica con la que se operará el adsorbedor, se puede calcular el área de sección transversal de la cama.

Con el área de sección de la cama de CAG (A) se calcula el diámetro del recipiente (D) (o los lados del tanque, si es un adsorbedor a gravedad)

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$\text{Si } A = 1.96 \text{ m}^2,$$

$$D = 1.58 \text{ m}$$

Si el adsorbedor que estamos diseñando operará a presión y es de sección circular, a partir del valor del área podemos calcular el diámetro.

Con el volumen de la cama de CAG (Vc) y con el área de sección de dicha cama (A) se calcula la altura de la misma (a)

$$a = \frac{Vc}{A}$$

$$a = \frac{2.0 \text{ m}^3}{1.96 \text{ m}^2}$$

$$a = 1.00 \text{ m}$$

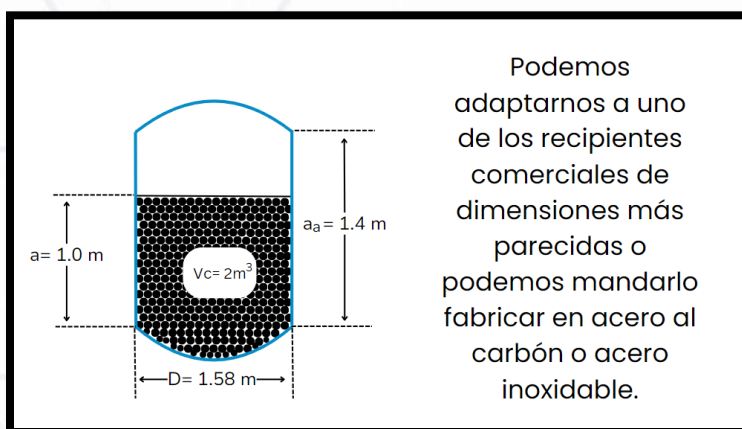
Con el volumen y el área de sección transversal de la cama, calculamos su altura.

La altura de la parte recta del adsorbedor, (a_a), debe ser al menos 1.4 veces la altura de la cama de CAG (a)

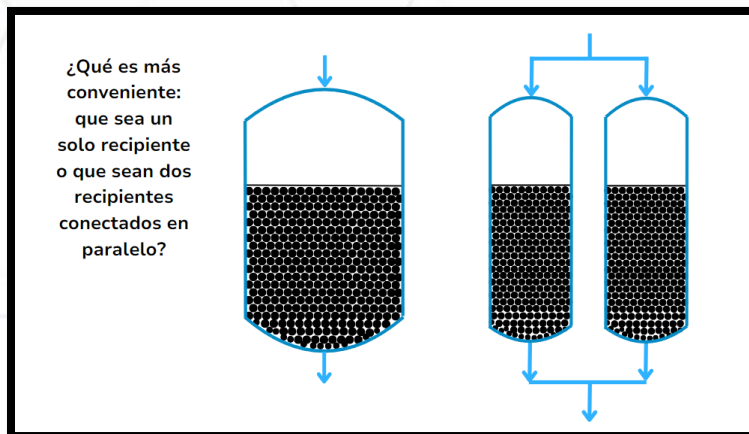
$$\text{Si } a = 1.0 \text{ m}$$

$$a_a = 1.40 \text{ m}$$

La altura de la parte recta del adsorbedor debe ser al menos 40% más que la altura de la cama de CAG para permitir que esta se expanda 30% al retrolavar.

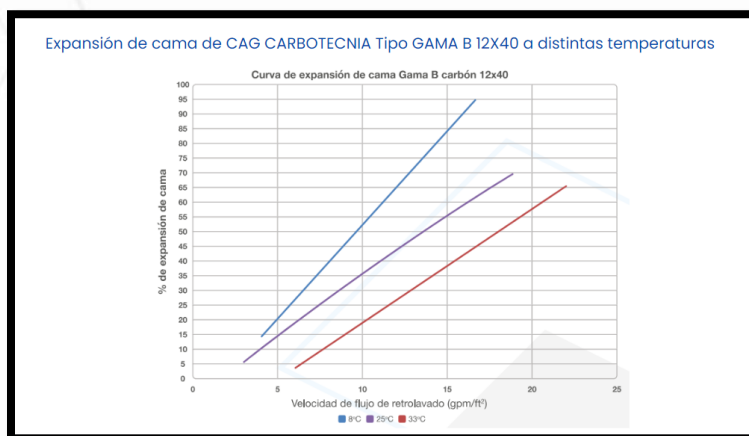


Hay que mencionar que, en el caso de los recipientes fabricados en acero al carbón o en acero inoxidable, la altura que se especifica es la de la parte recta; no se cuenta la altura de las tapas inferior y superior, que suelen ser toriesféricas. Por su parte, en el caso de los recipientes *composite* (también llamados “de fibra de vidrio”), la altura que se especifica incluye la de ambas tapas. Un fabricante muy profesional de recipientes en acero es Blueflow (de Toluca). La marca de recipientes *composite* que ofrecemos es Canature, que nos parece la más alta calidad en el mercado internacional.

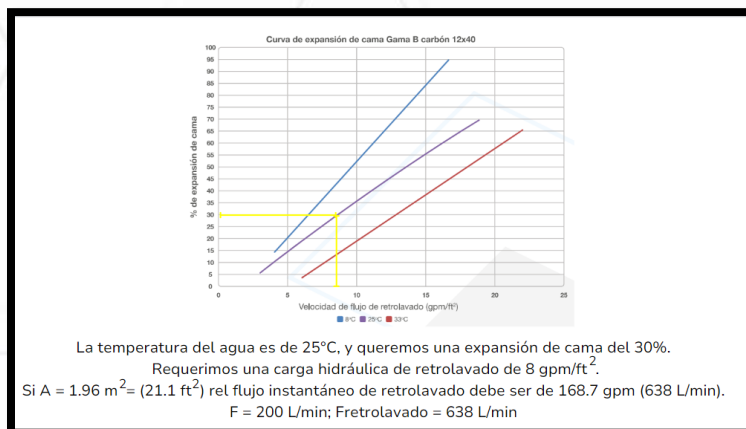


Puede suceder que no encontremos un recipiente con dimensiones parecidas a las que requerimos, pero que encontremos varios recipientes con la altura que requerimos, aunque con un área de sección menor. En este caso, podemos conectar dos o más recipientes en paralelo, de manera que la suma de sus áreas transversales nos dé un área igual o un poco mayor que la requerimos.

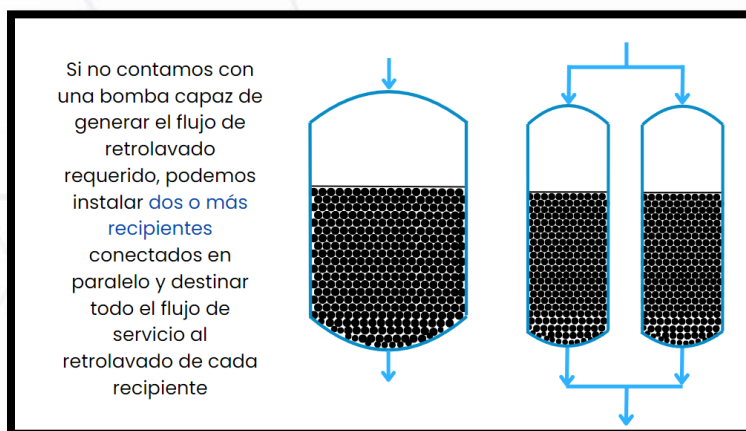
Una vez que se ha o se han elegido los recipientes en los que se colocará el CAG, hay que recalcular el TCCV y la C_H que realmente tendremos (ya que el volumen de la cama de CAG y el área de sección transversal pueden haber cambiado).



Conociendo el área de sección transversal del recipiente o de los recipientes que operarán como adsorbedores, debemos calcular el flujo de retrolavado requerido para expandir la o las camas de CAG un 30%. Si se instalan dos o más recipientes conectados en paralelo, estos se retrolavan secuencialmente (no simultáneamente).



Para el caso de nuestro ejemplo, se logra una expansión de 30% del carbón Gama-B 12x40 con una carga hidráulica de retrolavado de 8 gpm/ft² y con un flujo de 638 L/min. Podemos observar que el flujo de retrolavado requerido es más tres veces el máximo flujo de servicio.

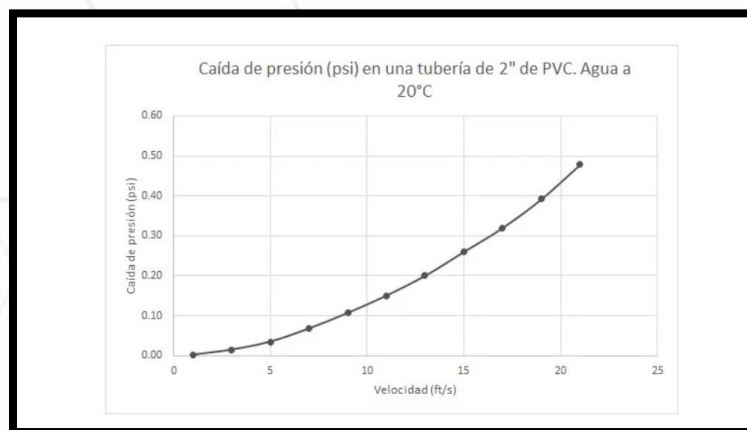


Si no contamos con la bomba que pueda generar el flujo suficiente de retrolavado para lograr la expansión de la cama de CAG, la solución puede estar en conectar dos o más recipientes en paralelo, de manera que cada uno de ellos pueda retrolavarse adecuadamente con el flujo que puede generar la bomba. Para el caso del ejemplo, si instalamos tres recipientes conectados en paralelo, cada uno de ellos requerirá un flujo de $(638/3 =) 213$ L/min para retrolavarse. Este flujo es muy parecido al máximo de servicio (200 L/min).

Velocidad recomendada para agua que fluye en tuberías:

Flujo continuo: 4 a 8 ft/s
Flujo esporádico (retrolavado): no más de 10 ft/s (15 ft/s en casos extremos)

Conociendo el máximo flujo de servicio y el máximo flujo de retrolavado (este último corresponde a la temporada del año en la que el agua tiene mayor temperatura), podemos estimar el diámetro recomendado de las tuberías que se conectan al recipiente.



Mientras mayor es la velocidad del líquido en una tubería, mayor es la caída de presión que experimenta. La gráfica de la imagen se calculó para el flujo de agua por tubería de PVC de 2" de diámetro, en posición horizontal, sin accesorios y con una longitud de 100 m. La caída de presión dependerá de las particularidades de cada instalación. Es importante que esta no sea muy alta en las tuberías porque se suma a la que ocasiona la cama de CAG, las toberas y las válvulas.

Diámetro de las tuberías

$$V_{\text{recomendada}} = 5 \text{ ft/s}$$

Flujo de servicio = 200 L/min = 0.118 ft³/s

A sección tubería = (0.118 ft³/s) / (5 ft/s)

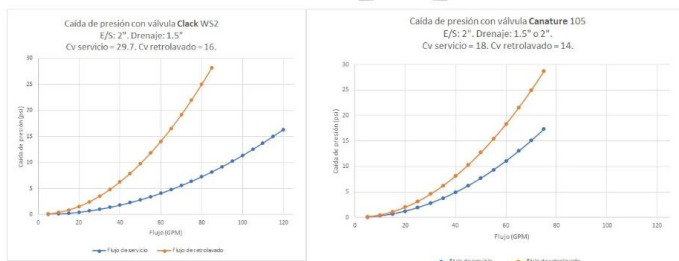
A sección tubería = 0.0235 ft² = 3.39 in²

$$D \text{ tubería} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 2.1 \text{ in}$$

Para el caso del ejemplo, el diámetro recomendado para el flujo de servicio de 200 L/min es de 2.1 in, que nos lleva a elegir tubería de 2" de diámetro nominal.

Caída de presión en válvulas de instalación superior (Clack y Canature)

$$\Delta P \text{ (psi)} = \left[\frac{F \text{ (gpm)}}{C_v} \right]^2$$



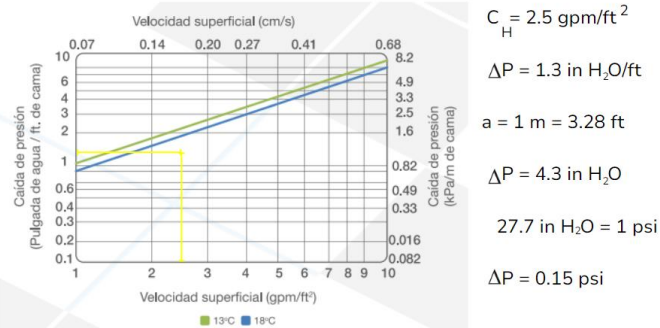
Las válvulas de instalación superior y muchas de instalación lateral tienen una constante, Cv, que aplica para su operación en flujo de servicio y en flujo de retrolavado. Esta constante permite estimar la caída de presión en agua. En la imagen vemos la manera en que aumenta la caída de presión, tanto en flujo de servicio como de retrolavado de dos marcas de válvulas de instalación superior: Clack y Canature. Ambas son muy buenas marcas que ofrece Carbotecnia. Si el ingeniero de proceso encuentra que la válvula que quiere usar causa una caída de presión muy alta, puede optar por instalar dos o más recipientes conectados en paralelo. Varios recipientes conectados en paralelo, cada uno con su válvula de instalación superior, no suelen costar más que un solo recipiente grande. Canature, además, ofrece un controlador que permite programar la operación de dos o más válvulas desde el mismo controlador.

Caída de presión en válvulas de instalación superior

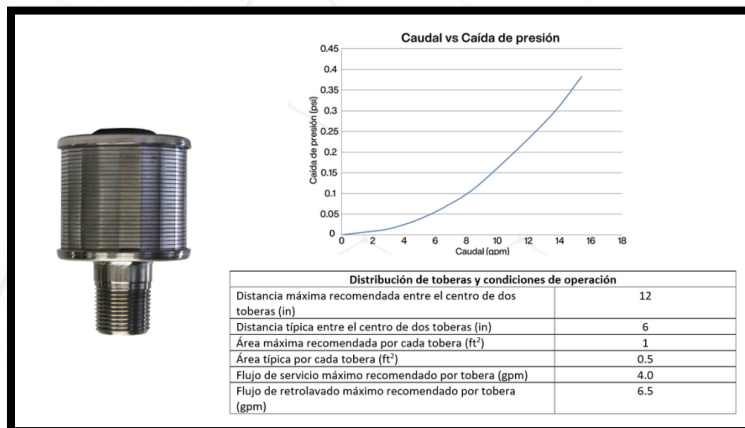
	CLACK	CANATURE
Servicio	3.2 psi	8.6 psi
Retrolavado	10.9 psi	14.2 psi

Para el caso de nuestro ejemplo y considerando las dimensiones del recipiente que calculamos, estas serían las caídas de presión en flujo de servicio y en flujo de retrolavado para las válvulas Clack y Canature propuestas.

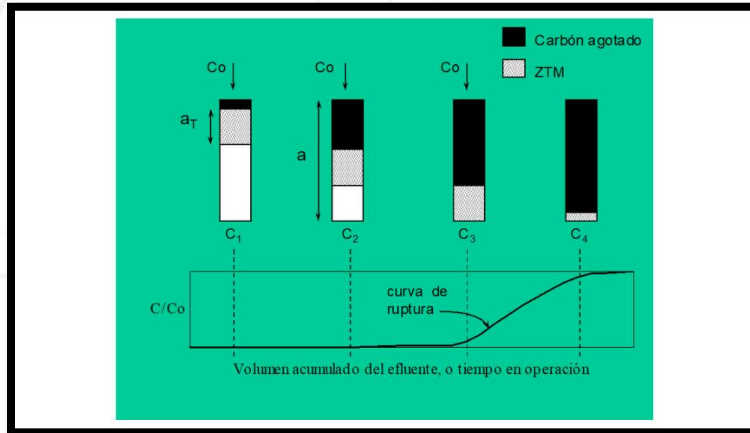
Caída de presión en una cama de CAG tipo Gama B 12 x40 (Carbotecnia)



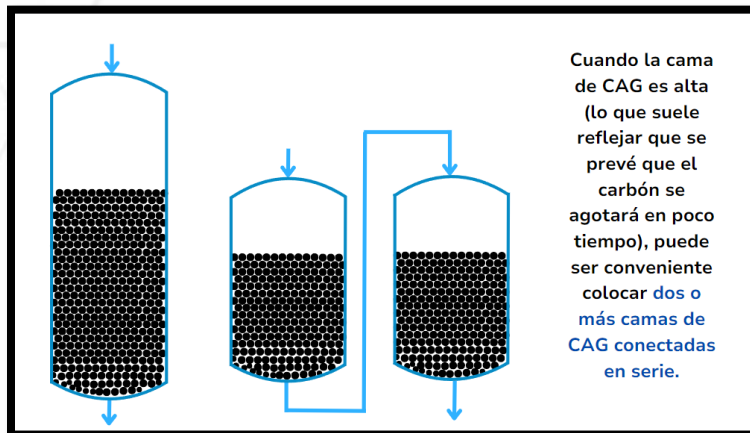
La caída de presión en la cama de CAG se estima mediante la gráfica correspondiente que publican los fabricantes del carbón. Para nuestro ejemplo, esta resultó de 0.15 psi.



Como mencioné anteriormente, las toberas también causan una caída de presión que puede estimarse con la gráfica publicada en sus fichas técnicas. Con el objeto de lograr una buena distribución del flujo, tanto de servicio como de retrolavado, se recomienda que cada tobera tipo Johnson cubra entre 0.5 y 1.0 ft² de área de sección de la cama de CAG. Cada marca y tipo de tobera debe tener una ficha técnica con los datos y recomendaciones pertinentes.



Cuando requerimos un TCCV grande, es porque la concentración de compuestos a adsorber es alta o cuando la cinética (velocidad) de adsorción es baja. En estos casos, la zona de transferencia de masa es alta y el punto de ruptura se alcanza en poco tiempo (el punto de ruptura es en el que el efluente de la cama de CAG incumple en el parámetro con el que se mide el desempeño del carbón). Un alto TCCV lleva al dimensionamiento de camas de CAG que resultan altas.



Conectar dos adsorbedores en serie es lo mismo que tener uno solo del doble de altura. Hacer esto permite cambiar solamente el carbón del primer adsorbedor. En este caso, conviene alimentar el líquido directamente al segundo adsorbedor y luego al primero, que tendrá carbón virgen o reactivado. Esto se puede hacer con dos o más recipientes conectados en serie. Con este método se puede aprovechar mucho mejor el carbón activado pues solamente se retira el que está más saturado.

Gracias por su atención

Tel. + 52 33 3834-0906
ventas@carbotecnia.com.mx

