

46 201



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE QUIMICA**

**"DISEÑO DE UNA UNIDAD DE FILTRACION  
DE AGUA CON CARBON ACTIVADO"**



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO QUIMICO**  
P R E S E N T A :  
**DAVID GUTIERREZ GARAVITO**

**FALLA DE ORIGEN**



FACULTAD DE  
QUIMICA

1 9 9 0



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# C O N T E N I D O

Capítulos		Páginas
I	INTRODUCCION.	1
II	GENERALIDADES.	7
	2.1.- Superficie de contacto.	7
	2.2.- Regeneración del carbón activado.	7
	2.3.- Procesos de aplicación del carbón activa do.	8
	2.4.- Clorinación.	10
III	PRINCIPIOS Y CONCEPTOS BASICOS DE LA FILTRACION DE AGUA CON CARBON ACTIVADO.	18
	3.1.- Descripción del proceso de filtración.	18
	3.2.- Tipos de filtros.	19
	3.2.1.- Filtros mecánicos tipo gravedad.	19
	3.2.2.- Filtros mecánicos tipo de pre-- sión.	20
	3.3.- Medio filtrante.	20
	3.3.1.- Arena.	21
	3.3.2.- Antracita.	21
	3.3.3.- Lechos mixtos.	21
	3.3.4.- Carbón activado.	22
	3.4.- Adsorción.	25
	3.5.- Tamaño efectivo y coeficiente de unifor- midad.	25
IV	EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE FILTRACION.	27
V	DESCRIPCION DEL PROCESO.	29

Capítulos	Páginas
5.1.- Objetivo.	29
5.2.- Parte principal del filtro.	29
5.3.- Servicio.	31
5.4.- Retrolavado.	31
5.5.- Enjuague.	32
5.6.- Faro.	32
VI	
TECNICAS Y ESTIMACIONES PARA EL CALCULO DE UNA UNIDAD DE FILTRACION DE AGUA CON CARBON ACTIVADO.	34
6.1.- Objeto.	34
6.2.- Diagrama de cálculo.	35
6.3.- Determinación del flujo de servicio por volumen de carbón activado.	36
6.4.- Caída de presión.	37
6.4.1.- Método que utiliza una ecuación particular ( Característica para un tipo de carbón).	37
6.4.1.1.- Viscosidad.	38
6.4.1.2.- Area de filtración.	38
6.4.1.3.- Profundidad de cama.	39
6.4.1.3.- Diámetro de partícula ( Carbón activado ).	40
6.4.2.- Método gráfico.	40
6.4.3.- Método de la ecuación general.	42
6.4.3.1.- Flujo de diseño.	42
6.4.3.2.- Número de filtros.	42
6.4.3.3.- Dimensiones por filtro	43
6.4.3.4.- Confrontación de re-	

Capítulos		Páginas
	sultados	45
6.5.-	Tiempo de contacto. ( <u>TIEMPO DE RESIDEN</u> CIA ).	46
6.6.-	Capacidad de remoción de cloro residual.	47
	6.6.1.- Cantidad de cloro a remover.	48
	6.6.2.- Tiempo de vida útil del carbón activado.	49
6.7.-	Cantidad de agua para reacondicionamien- to.	50
	6.7.1.- Retrolavado.	51
	6.7.2.- Enjuague.	51
6.8.-	Secuencia operacional.	52
 VII	 CÁLCULO DEL EQUIPO REQUERIDO PARA FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO.	 54
	7.1.- Datos de proceso.	54
	7.2.- Volumen del recipiente.	54
	7.3.- Espesor del cuerpo.	55
	7.4.- Espesor de la tapa superior.	55
	7.5.- Espesor de la tapa inferior.	56
	7.6.- Tuberías.	58
	7.6.1.- Proceso.	58
	7.6.2.- Retrolavado.	59
	7.6.3.- Enjuague.	59
 VIII	 COSTOS	 60
	8.1.- Estimación de los costos del equipo	60
	8.1.1.- Costo del equipo principal de proceso.	62
	8.1.2.- Costo físico total.	62
	8.1.3.- Factor de costos indirectos.	63

Capítulos	Páginas
8.2.- Costo de operación por agua de retrolavado.	63
8.3.- Costos de inversión.	64
8.3.1.- Análisis económico del primer año.	65
CONCLUSIONES.	68
INFORMACION ADICIONAL.	69
NOMENCLATURA.	74
BIBLIOGRAFIA.	76

## I.- INTRODUCCION

Este capítulo está enfocado a una breve introducción al campo del pretratamiento del líquido de mayor uso por el hombre que es el agua y en específico, a la filtración con carbón activado, además de incluir en su contenido una visión general del resto de los demás capítulos.

El ingeniero que tiene asignada la tarea de diseñar un sistema de filtración que elimine eficientemente impurezas del fluido influente a la unidad, debe considerar todos los posibles problemas que se pueden presentar en la práctica y los razonamientos seguidos para resolverlos, o sea, la experiencia para obtener en el efluente la calidad requerida y cuidar además, que su habilidad creadora esté enfocada a la agilización del trabajo.

Se puede tener por ejemplo, una demanda de agua filtrada de 1000 gpm =  $5.451 \times 10^6$  lpd, los cuales se requieren ya sea como un flujo adicional o inicial para ser utilizados en servicios generales y unidad desmineralizadora; entonces el hecho de desarrollar un conjunto de especificaciones, así como el diseño de la unidad (entendiéndose como unidad a la planta filtradora) que va a satisfacer la demanda de agua, es un problema típico que se presenta en una industria de proceso.

El objetivo del presente trabajo, es desarrollar el método de diseño encaminado a crear un sistema de filtración de agua con carbón activado para eliminar un contaminante específico que se quiera eliminar, que para nuestro caso es el cloro residual y materia en suspensión.

El desglose de la secuencia típica de tratamiento al que será sometida el agua de acuerdo a su procedencia y uso

posterior, así como contemplar un agua con un análisis complejo que requiera un estudio de las cuatro etapas progresivas que son:

- 1) Estudio preliminar de las isotermas de adsorción - con carbón activado.
- 2) Corridas en columnas de prueba a nivel laboratorio en sus diferentes arreglos.
- 3) Corridas en columnas de prueba a nivel planta piloto también en sus diferentes arreglos.
- 4) Y finalmente, el diseño comercial de la unidad.

O emplear el método simplificado "Profundidad de camatiempo de servicio", están fuera del alcance de la presente tesis; por lo que se ha de incluir un esquema general de alternativas de tratamiento y un sólo tipo de contaminante como lo es el cloro a nivel industrial.

El título de cada capítulo describe fielmente su contenido y refleja a manera de resumen el tema del cual se trata.

Un sistema de filtración de agua con carbón activado - es una instalación entre otras, a la que se recurre cuando se desea eliminar la materia que produzca colores, olores y sabores, además los sólidos suspendidos mediante la adsorción y el filtrado respectivamente, pudiendo llegar incluso a potabilizar el agua.

Cabe señalar que de entre los diferentes tipos de filtros, los presurizados tienen la ventaja de que pueden instalarse en líneas a presión, con lo cual se ahorra un bombeo adicional, el espacio ocupado es pequeño, su construcción es rápida, pueden adicionarse tantas unidades como se

requieran sin afectar al diseño general de las instalaciones, tienen costos de inversión bajos y cuando se usan para purificar agua de pozo, tienen menor probabilidad de contaminación externa de bacterias.

Este tipo de filtración ha encontrado demanda en la industria de proceso, y en especial en el tratamiento de agua para alimentación a calderas.

En la operación de la mayoría de los filtros, el agua entra por la parte superior (flujo descendente y de lecho fijo) del filtro y se distribuye mediante un canal o tubo perforado, filtrándose ésta, al descender a través del medio filtrante para ser colectada por otro tubo perforado que se encuentra en la parte inferior de la unidad.

La selección del filtro es cuestión técnica y económica, pero la experiencia a nivel industrial, nos dice que el filtro vertical y a presión es más eficiente que el horizontal, porque en éste tipo de filtros algunas áreas adyacentes a la envolvente permanecen inactivas durante la operación de servicio y el retrolavado, dificultando así las operaciones de reacondicionamiento de los mismos, pues es necesario hacer lavados seccionales, con lo cual el costo de operación se incrementa significativamente.

Desde el punto de vista operacional, los filtros horizontales no son tan satisfactorios como los verticales, debido a la tendencia del lecho inferior de grava a formar ondulaciones en forma de valles y colinas en la superficie de grava o piedra sobre la cual descansa el medio filtrante. Cuando ocurren éstas fallas, se obtiene una filtración deficiente.

Las unidades de lechos fijos conectados en serie y con flujo descendente, se utilizan para pequeñas cantidades de

carbón y donde se requieran bajas cantidades de filtración.

Las unidades de lechos móviles corresponden a una técnica especializada de los flujos a contracorriente, en donde el agua en cada unidad, se desplaza hacia arriba a través del lecho. Estas unidades son aplicables en sistemas donde se requieren grandes cantidades de carbón y eficiencia a contracorriente.

Las unidades de lechos fijos conectados en paralelo, generalmente son diseñadas con flujo descendente, y cada filtro trabaja como una unidad aislada. Estas unidades son empleadas en donde se requieren grandes volúmenes de agua filtrada y el lecho de carbón tenga espacio suficiente para expandirse hasta un 50 por ciento durante el retrolavado.

Por las consideraciones anteriores, el tipo de filtro seleccionado para filtrar nuestra cantidad de agua (1000 gpm), será vertical, a presión y de lecho fijo.

Las siguientes figuras muestran la sección transversal y una batería de filtros verticales presurizados.

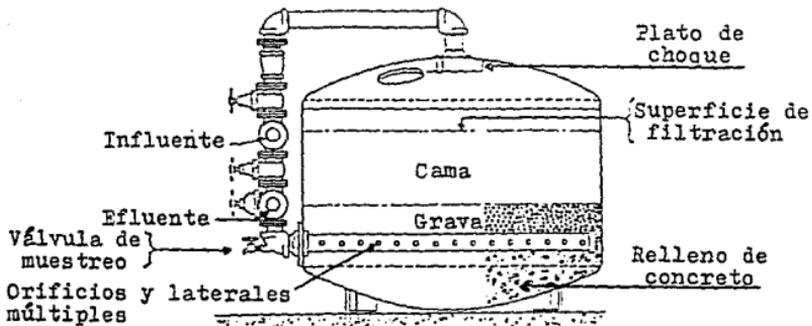


Fig. 1.1.- Sección transversal de un filtro a presión típico.

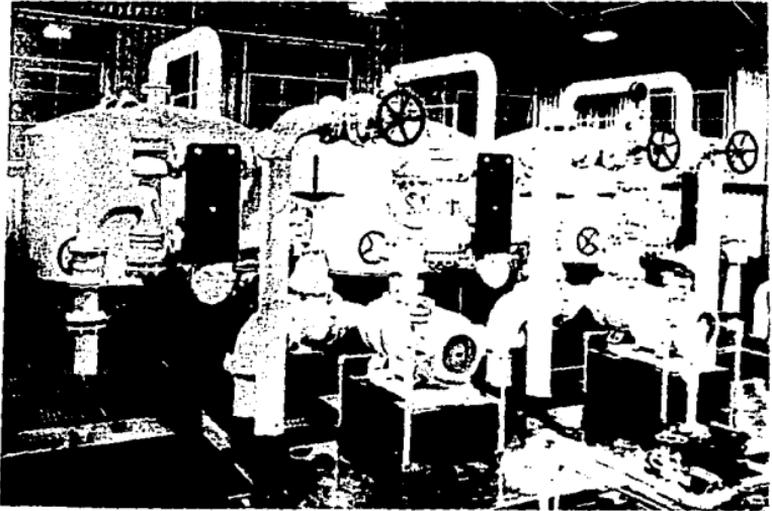
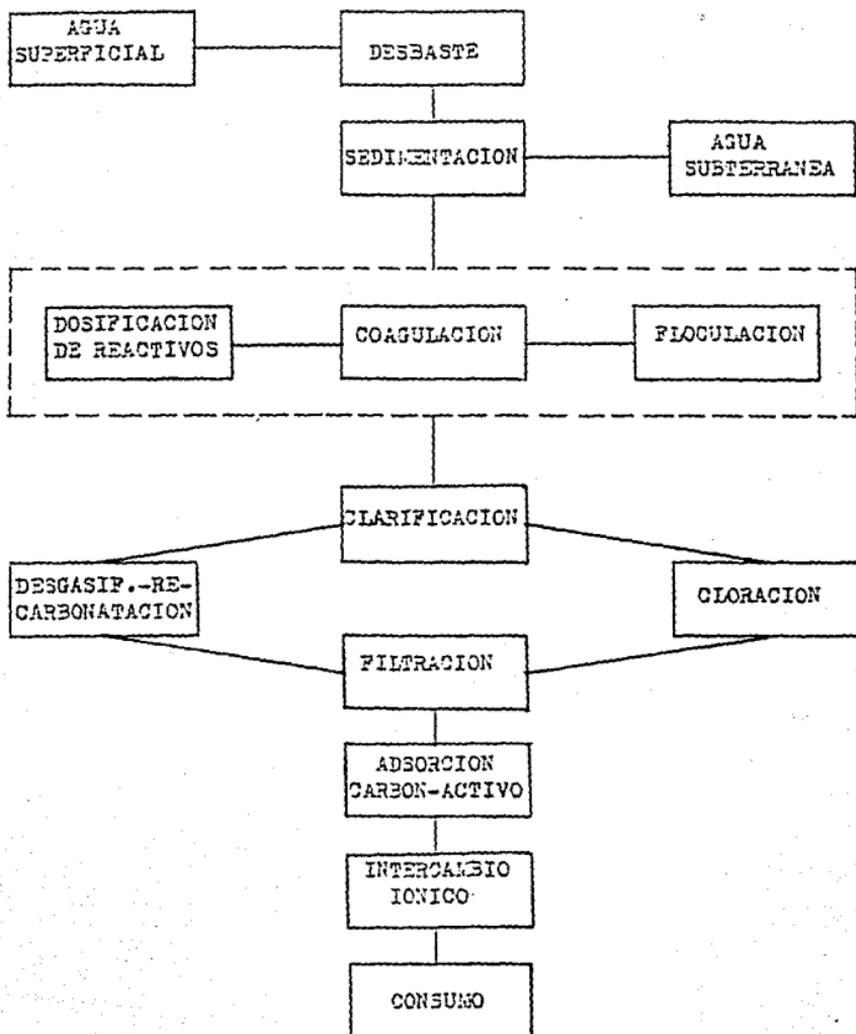


Fig. 1.2.- Batería de filtros a presión.

Fig. 1.3  
Esquema general de tratamiento.



## II.- GENERALIDADES

Para lograr una buena filtración, es necesario seleccionar adecuadamente el medio filtrante con la granulometría y tamaño efectivo bien determinados, sin dejar de considerar el tiempo de contacto para efectuar una buena adsorción, y a partir de éste, calcular el número de filtros requeridos, así como los tiempos de operación y reacondicionamiento de los mismos.

### 2.1.- Superficie de contacto.

La adsorción es un fenómeno superficial, como tal, el grado de adsorción es proporcional al área superficial específica, la cual se define como la porción de área total que está disponible para la adsorción. Por tanto, la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente sólido es tanto mayor cuanto más finamente dividido y poroso esté el sólido.

El carbón activado granular, es hoy en día el recurso seguro y económico en la depuración de algunos tipos de aguas residuales industriales o municipales, ya que cada partícula tiene una estructura porosa, lo cual implica que la superficie interna total sea grande, pudiendo así retener las diferentes sustancias. La superficie de contacto total para el carbón activado granular, está considerado entre 0.5 y 1.8 Km<sup>2</sup>/ gr.

### 2.2.- Regeneración del carbón activado.

La regeneración que se le da a éste material, está en función de su procedencia.

Cuando el carbón activado se extrae a partir de vegetales, es obtenido del bagazo de caña, cáscara de nuez, aserrín de madera, etc. los cuales se tratan con un agente ac-

tivante como puede ser el cloruro de zinc, carbonato de potasio ó ácido fosfórico, los cuales proporcionan un medio oxidante, y a temperaturas de 1200 a 1800 grados Fahrenheit se obtenga una carbonización completa con lo cual, los poros del material carbonizado quedan libres y listos para adsorber.

Cuando la procedencia del carbón activado es de origen mineral, es obtenido de las minas de carbón y posteriormente molido hasta la granulometría aproximada y en presencia de dióxido de carbono y vapor sobrecalentado o bien aplicando altas temperaturas, es activado, y para remover todos los materiales solubles, es lavado con ácidos minerales y agua, después es secado y finalmente tamizado para obtener una mayor exactitud en la granulometría.

Cabe señalar que la regeneración es una etapa importante al intentar reusar el carbón activado. Esta regeneración al efectuarse por medio de las técnicas térmicas convencionales descritas, deberá ser durante al menos 15 ciclos sucesivos de saturación y regeneración.

Los intentos de desarrollar un método químico de regeneración que fuera eficaz y económico han fracasado.

En cuanto al uso del carbón activado granular para eliminar cloro libre, se usan ciclos de operación no regenerativos.

### 2.3.- Procesos de aplicación del carbón activado.

Este material puede ser usado para operar ya sea en fase gaseosa o en fase acuosa, y la selección de ésta depende del volumen y del radio del poro de cada gránulo, además de la superficie de contacto total.

El carbón en polvo es dosificado en el seno del liqui-

do y se separa por filtración en un sistema discontinuo es decir, una cantidad de carbón se mezcla continuamente con un volumen específico de agua hasta que la concentración del contaminante en la disolución ha alcanzado un nivel deseado; entonces se saca el carbón y se vierte y regenera para usarlo de nuevo.

Si utilizamos carbón finamente dividido, suele ser difícil separarlo del agua para efectuar la regeneración al contrario de cuando usamos partículas de carbón de tamaño mayor, las cuales pueden separarse más fácilmente cuando es tan agotadas.

El método de flujo continuo del tipo columna tiene ventajas distintivas sobre los métodos discontinuos, puesto que las velocidades de adsorción dependen de la concentración del soluto en la solución que deba tratarse.

En el método de columna, el carbón está continuamente en contacto con una solución fresca, por tanto, la concentración de la disolución en contacto con una capa de carbón de la columna, es relativamente constante.

En síntesis, el carbón granular regenerable es el más usado, debido a la mayor capacidad de adsorción y facilidad de regeneración, eficiencia en calidad de filtración y un costo de operación adecuado.

Este material puede actuar en las siguientes formas:

- 1) Proceso físico.- Eliminación de material en suspensión.
- 2) Proceso adsorbente.- Adsorción de la mayoría de contaminantes disueltos en el agua que produzcan colores, olores y sabores.
- 3) Proceso biológico.- Este carbón puede servir de -

soporte para el desarrollo de microorganismos que contribuyan a la biodegradación de ciertos contaminantes orgánicos.

#### 2.4.- Clorinación.

La clorinación es un proceso en el cual el cloro ya sea en forma líquida o gaseosa ( Y algunas veces una de éstas o ambas formas en combinación con otros materiales ), se agrega al sistema.

La clorinación se emplea ampliamente en la industria primaria para el blanqueo de textiles y en la manufactura y procesamiento de productos químicos orgánicos y en procesos metalúrgicos.

Aunado a las aplicaciones industriales, la clorinación es el principal método de tratamiento químico para la desinfección de aguas tratadas municipales y residuales industriales, además del agua para albercas.

Para satisfacer las necesidades del mercado, el cloro líquido es almacenado en cilindros presurizados a 100 y 150 libras de presión y una capacidad de una tonelada, para de allí ser suministrados a los carros tanque o medio de transporte adecuado y así ser llevado a su punto de aplicación.

A nivel industrial, el cloro se usa en fase gaseosa y líquida.

La alimentación líquida es más adaptable a procesos intermitentes, en los cuales la velocidad de flujo no es crítica, ya que se dosifica una cantidad determinada. La alimentación y control del cloro líquido a un proceso presenta algunos problemas porque el caudal se vaporiza al pasar por cualquier restricción en la línea.

Por otro lado, la velocidad de flujo del cloro gaseoso

es fácilmente medible con un error de  $\pm 2\%$  aproximadamente, y a ésta velocidad de flujo puede ser fácilmente controlada.

Básicamente hay dos métodos para suministrar el cloro gaseoso a un proceso que son :

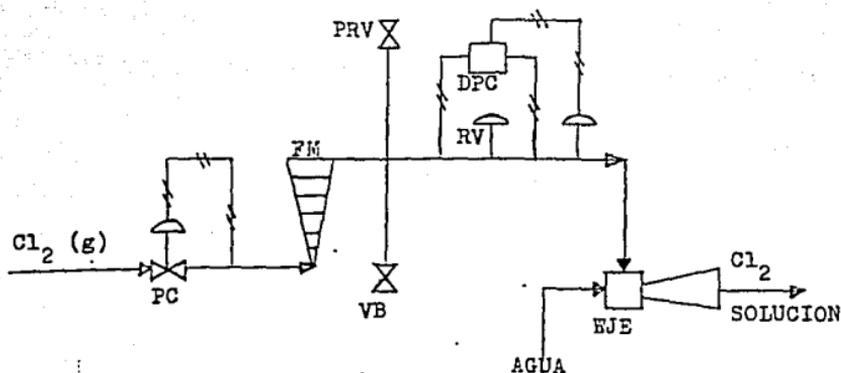
- 1) Alimentación directa.- El gas es alimentado burbujeándolo bajo presión hasta el seno del líquido o introduciéndolo a través de una serie de atomizadores hasta el interior del sistema que va a ser clorado.
- 2) Alimentación en solución.- La entrada de la solución se efectúa a vacío, el cual se disuelve en la corriente que va a ser clorada o en un fluido que va a contenerlo, tal como el agua en un educ-tor o eyector, y después es inyectada a la solución en algún recipiente de reacción u otro punto de aplicación.

En cuanto al control de la alimentación del cloro gaseoso puede ser por :

- 1) Variando la presión diferencial a través de un orificio fijo.
- 2) Variando la apertura del orificio, manteniendo constante la presión diferencial.
- 3) Combinando ambos métodos.

Un clorador típico de solución a alimentar usado en el tratamiento de aguas municipales e industriales es el mostrado en la siguiente figura :

Fig. 2.1  
Arreglo del clorador.



Descripción.- En la figura 2.1 se muestra el arreglo del clorador típico donde :

DPC = Controlador de presión diferencial.

FM = Medidor de flujo.

PC = Válvula de control de presión.

PRV = Válvula relevadora de presión.

RV = Válvula de flujo.

VB = Válvula rompedora de vacío.

WJE = Eyector jet de agua.

El cloro es introducido mediante un vacío creado por el inyector, en el interior del cual el cloro se disuelve y dicha solución será descargada al punto de aplicación. El

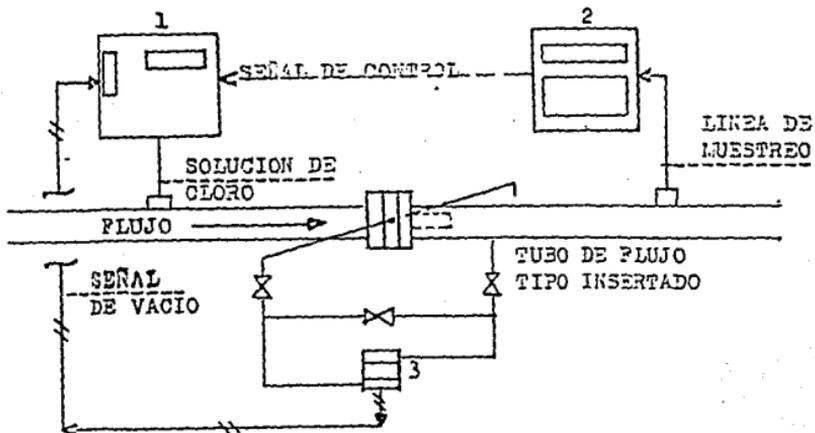
clorador es operado a vacío por razones de seguridad. Si - por alguna causa se produjese un escape de cloro durante la operación, el cual es altamente corrosivo y tóxico, entonces el sistema producirá un escape de aire para que el cloro pueda ser expulsado.

La dosificación de cloro se lleva a cabo a una presión de 50 a 100 psi; éste es goteado bajo una presión de vacío controlada a la entrada.

Para una alimentación automática proporcional al flujo de material que va a ser clorado, se puede aplicar una señal transmitida a ambos lados del diafragma del controlador de presión diferencial o sobre el operador de la válvula automática de flujo.

Uno de los sistemas cerrados de cloración automática ( Close loop ) frecuentemente usado para el tratamiento de aguas, se muestra en la siguiente figura :

Fig. 2.2



Descripción.- En la figura 2.2 se puede observar una ilustración de un sistema de control cerrado cuyas unidades son :

- 1.- Clorador.
- 2.- Sistema electrónico de control de cloro residual.
- 3.- Transmisor de vacío de la presión diferencial.  
 Voltaje : 117 Volts.  
 Frecuencia : 50 / 60 Hz.

La señal de flujo transmitida y el control de esta señal se efectúa por medio del analizador continuo de cloro residual, las cuales son detectadas dentro del clorador. - La primera mediante el controlador de presión diferencial, y la segunda por la válvula de flujo. En ambos casos el control debe ser muy exacto, ya que la demanda de cloro para el agua tratada es variable.

El proceso de cloración es controlado por varios métodos. Así tenemos el control por dosificación, el cual está determinado mediante el análisis de cloro residual remanente en el agua después de un tiempo de contacto especificado.

La desinfección u otro resultado deseado en la cloración del agua, se efectúa considerando que una cierta cantidad de cloro residual puede aparecer después del intervalo de tiempo establecido que va desde unos cuantos minutos hasta algunas horas

A continuación tenemos la definición de algunos conceptos importantes en la cloración.

- 1) Cloración ó clorinación.- Es la operación en la cual se adicionan pequeñas cantidades de cloro debidamente controladas al agua con el objeto de eliminar olores y sabores, así como Hierro y Manganeseo.

- 2) Cloro residual.- Es la cantidad de cloro remanente ( mg / lt ) que queda en el agua después del proceso de cloración.
- 3) Cloro residual libre.- Es la cantidad de cloro en forma de ácido hipocloroso ( HOCl ) o del anión hipoclorito ( OCl<sup>-</sup> ) que queda después de haber reaccionado con el agua tratada.
- 4) Cloro residual combinado.- Es la cantidad de cloro residual, combinado con la cantidad de monocloraminas ( NH<sub>2</sub>Cl ), dicloraminas ( NHCl<sub>2</sub> ) y tricloruro de nitrógeno que queda después de haber reaccionado el cloro con aguas que contienen amoníaco o materia orgánica nitrogenada o por la adición de cloro y amoníaco al agua.
- 5) Cloro residual total.- Se denomina cloro residual total a la suma del cloro residual libre y cloro residual combinado.
- 6) Demanda de cloro.- Es la cantidad de cloro que reacciona con el agua que se trata y que depende de todos los factores que puedan influir durante el proceso de cloración, tales como temperatura, tiempo de contacto, pH, naturaleza del contaminante etc.
- 7) Punto de ruptura de cloración.- Es la cloración basada en la producción y control de cloro residual combinado que se forma al adicionar cloro a un agua que contenga amoníaco o materia orgánica nitrogenada.
- 8) Supercloración.- La supercloración se efectúa cuando la dosis de cloro es tal que se sobrepasa

en forma innecesaria el punto de ruptura la cual - no es recomendable debido a un consumo de cloro adicional.

- 9) **Precloración.**- Es el proceso de adicionar el cloro al agua antes de que pase por los filtros lo - cual es benéfico porque además de satisfacer las - necesidades de desinfección, conduce a las siguientes acciones favorables :
- a) Ayuda la coagulación de aguas coloreadas y oxida al fierro y manganeso.
  - b) Previene el crecimiento de algas.
  - c) Evita la descomposición de algún lodo que se - llegara a formar.
  - d) Controla el crecimiento de microorganismos en los lechos de filtros.
- 10) **Post-cloración.**- Es la acción de efectuar la cloración después de que el agua pasa por los filtros. Este proceso se empleaba antiguamente y hoy se prefiere la precloración.
- 11) **Decloración.**- Es la operación de eliminar cloro residual. Se ha observado en muchos casos aún - cuando el punto de ruptura es sobrepasado, que el cloro residual es de pequeña magnitud ( lo cual es factible aun cuando se empleen altas dosis de cloro).

En algunos casos la supercloración conduce a un cloro residual de tal magnitud que hace necesaria su eliminación, y para ello podemos emplear las siguientes operaciones :

- a) **Eliminación por aereación.**- Generalmente es insu-

- ficiente y se requieren estructuras y diseños especiales.
- b) Adición de anhídrido sulfuroso.- Este compuesto gaseoso es aplicado por medio de equipos similares al clorador, y por cada ppm de cloro residual que se quiera eliminar, es necesario adicionar 0.9 ppm de anhídrido sulfuroso.
- c) Adición de sulfito de sodio.- Este compuesto deberá usarse en forma cristalina, ya que la forma anhidra es de difícil solubilidad. Su aplicación puede ser mediante aparatos de dosificación en saco o en solución. Se requieren aproximadamente 3.5 ppm de sulfito por cada ppm de cloro residual que se quiera eliminar.
- d) Adición de hiposulfito de sodio.- La cantidad de éste compuesto es la equivalente a la del cloro residual que se quiera eliminar. Se utilizan cantidades un poco mayores si el pH del agua es menor que 7. Este proceso es más caro que la adición del sulfito.
- e) Adsorción con carbón activado.- El carbón en polvo puede ser aplicado directamente sobre los equipos que reciben el agua con cloro residual, lo cual no es recomendable, por lo que es necesario tener un filtro de carbón activado, y su diseño es uno de los principales objetivos de este trabajo. Este proceso de adsorción, produce una retención completa de cloro residual si se cumplen las especificaciones que se encuentran al final del capítulo VI.

### III.- PRINCIPIOS Y CONCEPTOS BASICOS DE LA FILTRACION DE AGUA CON CARBON ACTIVADO

#### 3.1.- Descripción del proceso de filtración.

La remoción de sólidos suspendidos al pasar un flujo de agua u otro líquido a través de un medio poroso, es esencialmente una acción mecánica. Las partículas pueden o no pasar por los intersticios del medio filtrante debido a su tamaño. Sin embargo, esta acción por sí sola no puede dar una clarificación total.

Los sólidos que se encuentran finamente divididos, pueden ser eliminados por películas gelatinosas que se forman alrededor de los gránulos del medio filtrante. Estas películas se forman por medio de una acción biológica en algunos filtros, la cual es más acentuada en filtros lentos de arena. La resistencia de la capa a la ruptura se debe por lo general a su relación con organismos microscópicos.

La profundidad de penetración de los sólidos en el lecho filtrante, depende en gran parte del flujo de filtración ( Carga ), del grado de pretratamiento así como de las dimensiones y graduación del medio filtrante. Si un filtro es operado adecuadamente, la eficiencia de éste se ve incrementada con el tiempo. La materia es floculada y llena los espacios vacíos del medio filtrante y la capa artificial produce intersticios más finos y ayuda tanto a la remoción de sólidos solubles como a la remoción de sólidos suspendidos.

A medida que se elimina la materia en suspensión, las oquedades disponibles para el flujo disminuyen y la velocidad de flujo a través de las mismas aumenta necesariamente. Para mantener una velocidad de filtración deseada, se re---

quiere más y más energía para hacer pasar el agua a través del filtro. Esto puede observarse como una disminución en la energía total del agua desde la alimentación hasta el lado del efluente del filtro. Cuando esta disminución de energía o pérdida de carga es grande, o cuando no podemos mantener el caudal deseado con el sistema de equipo disponible, o cuando la calidad del agua de salida se deteriora debido al paso de sólidos en suspensión, entonces el filtro debe quitarse de operación y reacondicionarse.

### 3.2.- Tipos de filtros.

#### 3.2.1.- Filtros mecánicos tipo gravedad.

En este tipo, los filtros pueden ser rectangulares o circulares, los cuales se construyen de madera, acero o con creto, en donde el medio filtrante es arena con una profundidad de 24 a 36 pulgadas ( 61 a 97.4 cm ) de medio filtrante. El flujo de agua para lavado es de 15 a 30 gpm por pie cuadrado de área filtrante ( 611 a 1 222 lpm por metro cuadrado ). Con frecuencia los lechos filtrantes son lavados superficialmente con un flujo adicional al flujo ascendente de agua de lavado, y cuando la cantidad disponible de agua para lavado es insuficiente, se puede hacer un lavado por secciones. El lavado seccional no se emplea excepto cuando el método normal no puede llevarse a cabo. Comúnmente se instalan tanques de coagulación y sedimentación antes de los filtros, y dichos tanques que constituyen en sí un pretratamiento que sirve para dos propósitos a saber :

- 1) Para la remoción de sólidos suspendidos mediante la sedimentación, reduciendo así, la carga sobre los filtros y el material coagulado sobre la superficie del medio filtrante.
- 2) Para prevenir que las partículas finamente dividi-

das penetren en el lecho filtrante.

### 3.2.2.- Filtros mecánicos tipo de presión.

Los filtros a presión son esencialmente iguales a los de gravedad, con la excepción de que el material filtrante está contenido en un recipiente cerrado y de que el flujo de agua es forzado a pasar a través del lecho filtrante bajo una presión relativamente alta.

Este tipo de filtración tiene gran demanda en la industria y en especial para el tratamiento de agua destinada a la generación de vapor, ya que este equipo de filtración puede ser instalado en línea a presión eliminando así la instalación de un sistema de bombeo adicional.

Este tipo de filtros se construyen en forma vertical y horizontal, los cuales se utilizan para filtrar pequeñas y grandes cantidades de agua respectivamente. Para el tratamiento de aguas lodosas, es necesario instalar tanques de sedimentación separados, los cuales deberán ser usados cuando el agua cruda contenga grandes cantidades de materia en suspensión.

Los filtros verticales a presión varían en tamaño de 12 a 120 pulgadas ( 30.48 a 304.8 cm ) de diámetro y los horizontales de 6 a 8 pies ( 182.8 a 243.9 cm ) de diámetro y de 8 a 25 pies ( 2.44 a 7.62 m ) de longitud.

Los recipientes se diseñan para soportar presiones de acuerdo a la presión correspondiente al suministro de agua. Generalmente las presiones de trabajo van de 65 a 100 psi ( 4.43 a 6.3 kg / cm<sup>2</sup> ).

### 3.3.- Medio filtrante.

De entre las diferentes sustancias que se han usado pa

ra el filtrado de abastecimientos industriales, éstas comprenden arena, coque, carbón vegetal y mineral, partículas de mármol, magnetita, lava, carbón de antracita, tierra diatomácea, asbesto, telas burdas, carbón activado y muchas otras.

### 3.3.1.- Arena.

La arena es el medio filtrante más ampliamente usado para el filtrado de agua fría y en filtros destinados al tratamiento de agua para calderas.

### 3.3.2.- Antracita.

Este material se ha empleado en forma limitada para la filtración de agua municipal durante muchos años, así como también en la filtración de agua para sistemas de ablandamiento en caliente con cal-soda.

### 3.3.3.- Lechos mixtos.

Existen dos escuelas de pensamientos en el diseño de filtros de doble capa o mixtos. Una sugiere que la especificación de un material filtrante grueso de la zona superior sea tal que el entremezclado se reduzca a un mínimo en la interfase con la zona inferior del otro material filtrante fino.

La segunda escuela sugiere que se produzca algo de entremezclado en la interfase con el fin de reducir la tendencia a formar una capa impermeable en la interfase durante la filtración. Esta capa es más difícil de que se forme si la interfase está compuesta por una mezcla de un material fino y otro material grueso.

No existe ninguna evidencia concluyente para defender cualesquiera de las dos escuelas. Sin embargo parece ser que la permeabilidad de la mezcla carbón-arena en la inter-

fase está comprendida entre las permeabilidades de los dos medios separados ( Dostal y Robeck, 1966 ). Así, algo de entremezclado debería evitar la formación de una capa impermeable de sólidos en la interfase, la cual podríamos esperar que se formase si tuviera lugar un cambio brusco desde el carbón más grueso del fondo a la arena superior más fina.

#### 3.3.4.- Carbón activado.

El carbón activado es usado como medio filtrante sólo ocasionalmente, ya que los filtros de carbón son precedidos de arena o hulla para la protección de los sistemas de intercambio iónico subsiguientes.

También debe de considerarse que el carbón activado es uno de los medios más seguros para la depuración de ciertas aguas residuales industriales o urbanas.

En general, se puede decir que el carbón activado es el más eficaz de los adsorbentes conocidos para el tratamiento de líquidos. Este material tiene la característica de que puede adsorber algunas ppm de cloro u otro oxidante que pueda perjudicar a las unidades intercambiadoras de iones como las resinas catiónicas y orgánicas, además del envenenamiento de las resinas aniónicas básicas.

Debido a su poder adsorbente, el carbón activado es usado como desclorinizador. Para éste proceso, la regeneración no se lleva a cabo debido a su gran capacidad. Pero cuando es utilizado para la remoción de materia orgánica su capacidad se ve disminuida, por lo que se han de contemplar sistemas de regeneración, los cuales se diseñan en función de la cantidad y naturaleza de dicha materia orgánica.

También es necesario mencionar que cuando un agua se ve sometida a una supercloración excesiva, la presencia del

carbón activado no produce una adsorción ni combinación de cloro, sino más bien una acción catalítica sobre la siguiente reacción :



Esta reacción implica una disminución en el pH debido a la formación de HCl. Podríamos decir que el poder de eliminar cloro en un carbón queda afectado por todo aquello que oponga resistencia al contacto con el agua a tratar y éstas resistencias pueden ser producidas por sedimentos de carbonato de calcio o la adsorción de diversos contaminantes como clorofenoles, detergentes, etc.

#### 3.4.- Adsorción.

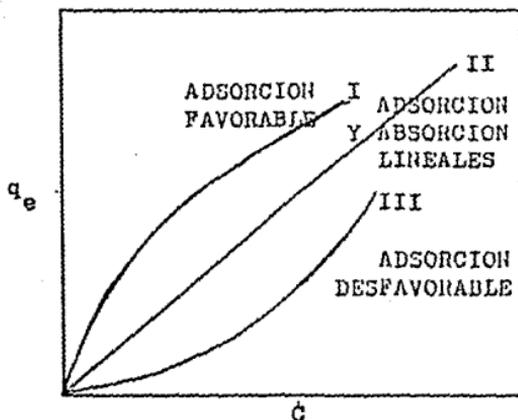
El proceso de adsorción fué observado por C. W. Scheele en el año de 1773 en gases y después para las soluciones por Lowitz en el año de 1785.

La adsorción es la retención física de partículas o coloides sobre la superficie de un sólido, el cual es el adsorbente sin que produzca una reacción química.

Contrariamente, la absorción es un proceso en el cual las moléculas o átomos de una fase interpenetran casi uniformemente en los de otra fase, constituyéndose una " solución " en ésta segunda.

El término " sorción ", incluye la absorción y la adsorción conjuntamente, es una expresión general para un proceso en el cual, el componente se mueve desde una fase para acumularse en otra. Las diferencias fenomenológicas de éstos dos términos se ilustran en la siguiente figura :

Fig. 3.1



En la figura anterior  $C$  representa la concentración de la sustancia migrante en la fase líquida en contacto con la fase sólida en la interfase. Y  $q_e$  indica la cantidad de sustancia que se ha trasladado a través de la interfase.

Las curvas I y III corresponden a modelos de separación favorables y desfavorables e indican la dependencia curvilínea de la cantidad concentrada en la superficie sólida con la cantidad que permanece en la solución. La curva II representa un modelo de adsorción lineal, también para la adsorción, que nos indica una dependencia directamente proporcional con la concentración.

Los adsorbentes son materiales porosos con una granometría adecuada y son aplicados al agua directamente en el clarificador o a la sección de empaque en el filtro a presión. El adsorbente más común es el carbón activado, el cual puede usarse en forma granular o en polvo, aunque se

puede recurrir a otros tipos de adsorbentes como pueden ser la alúmina activada, óxido de magnesio, algunas resinas especiales, etc.

La efectividad de los adsorbentes se mide en función de la cantidad de materia que pueda retener por unidad de volumen de adsorbente, y esta retención está en función de la superficie disponible, luego entonces, la efectividad de un adsorbente quedará determinada por su área superficial.

Durante la operación se genera una acción electrolítica entre el carbón activado y las paredes del recipiente que son metálicas, por lo que es recomendable un recubrimiento interno.

### 3.5.- Tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad.

Estos términos son frecuentemente usados para examinar los diferentes medios filtrantes.

El término tamaño efectivo fué adoptado por Hazen para aplicarlo al tamaño de granos ( en milímetros ), tal que el 10 por ciento en peso de las partículas es menor y el 90 por ciento mayor que él.

Otra definición podría ser : El tamaño efectivo es el diámetro del grano del medio filtrante de mayor tamaño correspondiente a un 10 por ciento en peso de la muestra que contiene los granos de menor tamaño.

El término coeficiente de uniformidad es el término empleado para designar la relación entre el tamaño del grano que tiene el 60 por ciento de la muestra más fina que él.

Otra definición podría ser : El coeficiente de uniformidad es el cociente entre el diámetro del grano del medio filtrante de mayor tamaño correspondiente a un 60 por ciento

en peso de la muestra que contiene los granos de menor tamaño y el tamaño efectivo.

#### IV.- EVOLUCION DE LOS PROCESOS DE FILTRACION

El primer intento municipal de tratamiento de aguas - por filtración que tuvo éxito en E. U. A. fué en una planta pequeña de carbón vegetal, arena y grava construida en 1855 para satisfacer los requisitos del municipio de Elizabeth , Nueva Jersey. Hacia el fin de 1860 ya se habían construido 156 plantas en los Estados Unidos y 10 en Canadá.

Se utilizó el proceso lento de filtración con arena y que además contenía coagulantes químicos.

El proceso rápido de filtración se usó posteriormente, en el cual no era necesario adicionar coagulantes químicos. El medio filtrante también era arena y fué patentado por - John W. Hyatt de Newark Nueva Jersey en los primeros años - posteriores a 1880.

Diez años más tarde, la filtración de agua para uso industrial y municipal se efectuaba mediante sistemas de ingeniería. A partir de entonces se han construido miles de - plantas basadas en el principio de Hyatt para el acondicionamiento de aguas tanto para fines sanitarios como industriales, es decir, los medios filtrantes, las formas geométricas y los arreglos de los medios filtrantes en los filtros han cambiado pero manteniendo el mismo principio.

En Inglaterra también se llevó a cabo otro desarrollo del filtro de arena y fué a mediados del siglo XIX. Estos filtros trabajaban con unos caudales por unidad de superficie relativamente bajos (  $0.0976$  a  $0.292 \text{ m}^3 / \text{hr} / \text{m}^2$  ) y generalmente dieron buenos resultados para las aguas superficiales de Inglaterra.

Estos filtros no dieron en general buenos resultados -

para las aguas de América, y esto condujo al desarrollo posterior de la filtración de agua en arena con coagulación.

Los filtros americanos desarrollados al final del siglo XIX trabajaban con velocidades más elevadas, las cuales andaban entre 2.44 y 9.76 m<sup>3</sup>/hr/m<sup>2</sup>. El uso de velocidades más altas en los filtros americanos significa que para alcanzar la velocidad deseada debemos emplear menos área filtrante e invertir menos capital. Los filtros se denominaban corrientemente filtros de arena rápidos para contrastar con los filtros lentos de arena o ingleses.

Al finalizar la segunda guerra mundial, se comenzó a emplear tierra diatomácea en sus diferentes tipos para filtrar agua potable, pero el uso de este tipo de lecho está aún limitado, pues sólo se usa por lo general para albercas y unas cuantas industrias. La perlita está siendo promovida como ayuda de filtración competitiva para estos usos.

Los filtros de precapa de carbón activado granular se utilizan en el tratamiento de agua municipal y residual para eliminar los orgánicos refractarios por adsorción siendo secundaria la eliminación de materia en suspensión con respecto a los materiales disueltos.

## V.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso de filtración de agua en donde el medio filtrante lo constituye el carbón activado, es un proceso relativamente simple cuando el sistema es no regenerativo, pero el operario deberá poseer algunos conocimientos de los principios en que se basa el proceso, pues su eficiencia es directamente proporcional al cuidado ejercido por el operador en el control del proceso.

### 5.1.- Objetivo.

El objetivo principal de la filtración de agua es la remoción de sólidos suspendidos, y para sistemas adsorbentes, la eliminación de contaminantes que produzcan colores, olores y sabores. Para obtener ésto, es necesario tener presentes los siguientes puntos :

- 1) Mantener el medio filtrante en buenas condiciones.
- 2) Proporcionar al filtro las reparaciones requeridas.
- 3) Controlar inteligentemente la aplicación de productos químicos.
- 4) Limpieza regular y completa del lecho filtrante.
- 5) Llevar registros diarios de operación.

### 5.2.- Parte principal del filtro.

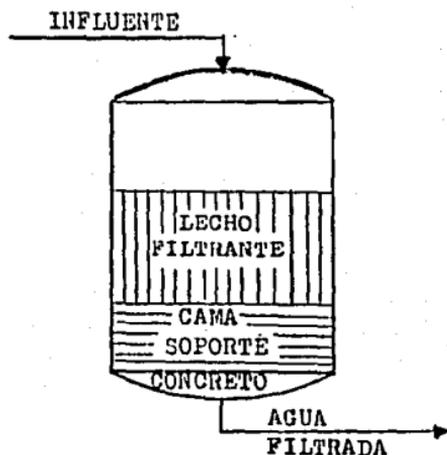
La parte más importante de un filtro es el medio filtrante, por lo que es necesario inspeccionarlo a intervalos regulares de tiempo para determinar su estado y que cumplan eficientemente su misión.

Mientras más partículas se van alojando entre los granos de carbón activado, el flujo se va restringiendo pues se incrementa en los espacios más grandes y decrece en los

espacios más pequeños. A medida que el flujo continúa penetrando en la cama filtrante, la velocidad total decrece con cada nuevo alojamiento de partículas coaguladas en los puntos de baja velocidad, llegando ésta a su límite mínimo, momento en el cual, el lecho de carbón deberá ser reacondicionado para un nuevo ciclo de servicio.

A continuación se muestra un esquema general de operación :

Fig. 5.1



La figura anterior muestra el camino que sigue el agua a través de las diferentes partes del filtro antes y después de ser filtrada. Cuando éste filtro está en operación tiene cuatro etapas, mediante las cuales se transforma el agua pretratada en agua filtrada, y dichas etapas se descri-

ben con un diagrama operativo para su mejor comprensión.

### 5.3.- Servicio.

Esta es la primera etapa de cada ciclo operativo de la filtración con carbón activado, en el cual el influente ( a g u a p r e t r a t a d a ), es forzado a pasar a través del lecho fil tr a n t e para sustraerle la materia en suspensión, cloro li-br e, colores, olores y sabores que dicha agua trae consigo.

Haciendo mención a la figura 5.2, la entrada de agua - pretratada se efectúa al abrir la válvula de control de flujo clave VCF - 01, llegando así hasta el distribuidor colocado en la parte superior del lado interno del recipiente , el cual realiza una descarga de manera uniforme sobre el le ch o de carbón activado, permitiendo con ésto que el proceso de filtración sea más eficiente. La corriente sale ( E --- f l u e ) cuando se abre la válvula de control de flujo cl a v e VCF - 02.

### 5.4.- Retrolavado.

La limpieza de los filtros generalmente se denomina re t r o l a v a d o, que consiste de un flujo de agua hacia arriba ( Flujo ascendente ) a través del medio filtrante, ya que los sólidos retenidos se acumulan en el lecho, provocando una - caída de presión, la cual al llegar a su límite máximo " I n d i c a " que el filtro debe ser retrolavado.

Haciendo mención a la figura 5.3, el flujo es alimenta-d o por la parte inferior del filtro al abrir la válvula de control de flujo clave VCF - 03 y sale cuando abrimos la VCF - 04, abriendo previamente la válvula VCF - 06.

Durante ésta etapa, la cama filtrante sufre una expansión con lo cual se consigue que las partículas de carbón - activado se separen entre sí y asciendan hasta la parte su-

terior del filtro, eliminándose también los finos producidos y posteriormente la clasificación de las partículas; - las más densas se asientan en el fondo, y las menos densas ascienden a la parte superior.

El retrolavado debe iniciarse con un flujo a razón de 2 a 3 gpm / pie<sup>2</sup>, pudiendo llegar hasta 12 gpm / pie<sup>2</sup> sólo cuando se considere necesario, ya que la cama filtrante debe tener una expansión hasta del 50 por ciento. Después el retrolavado debe continuarse hasta que el efluente sea claro.

El tiempo de retrolavado variará de acuerdo con la cantidad de sólidos suspendidos, pero la mayoría de los casos 10 minutos resultan suficientes.

#### 5.5.- Enjuague.

Después del retrolavado el filtro se pone en operación, y la primera agua filtrada se envía al drenaje durante unos cuantos minutos hasta que el agua sale clara. Aunque con un flujo menor al de servicio, esta etapa tiene la finalidad como su nombre lo indica, de " Enjuagar " la cama de carbón activado.

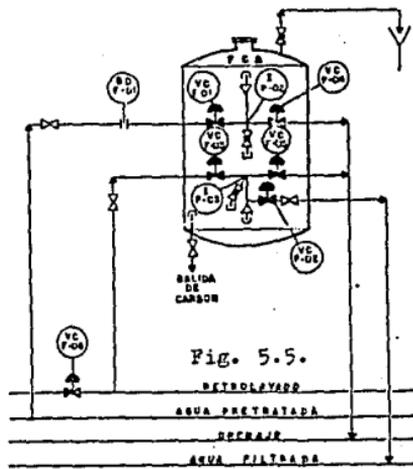
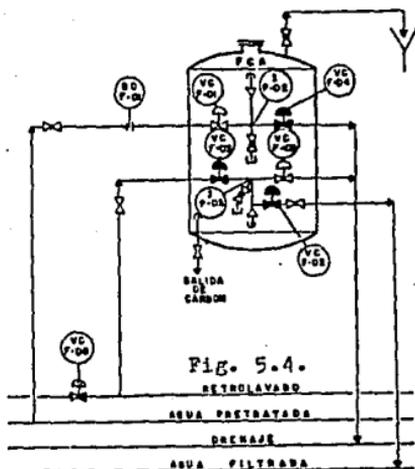
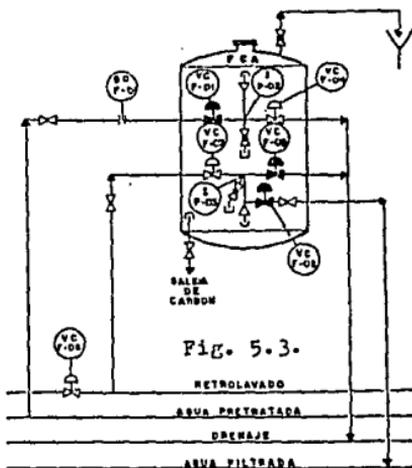
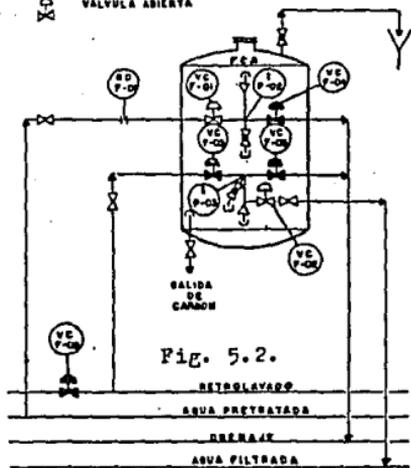
Haciendo mención a la figura 5.4, el agua se introduce al filtro al abrir la válvula de control de flujo VCF - 01 y sale al abrir la válvula VCF - 05.

#### 5.6.- Paro.

Esta etapa es opcional, pues sólo será aplicada cuando el servicio o el filtro lo requieran.

Haciendo mención a la figura 5.5, todas las válvulas permanecen cerradas.

XO2B  
VALVULA CERRADA  
VALVULA ABIERTA



VI.- TECNICAS Y ESTIMACIONES PARA EL CALCULO  
DE UNA UNIDAD DE FILTRACION DE AGUA CON  
CARBON ACTIVADO

6.1.- Objeto.

Presentar en forma secuencial, los cálculos implícitos en el diseño de un filtro de carbón activado.

Para simplificar el procedimiento, mantendremos constantes algunos datos de diseño y son los siguientes.:

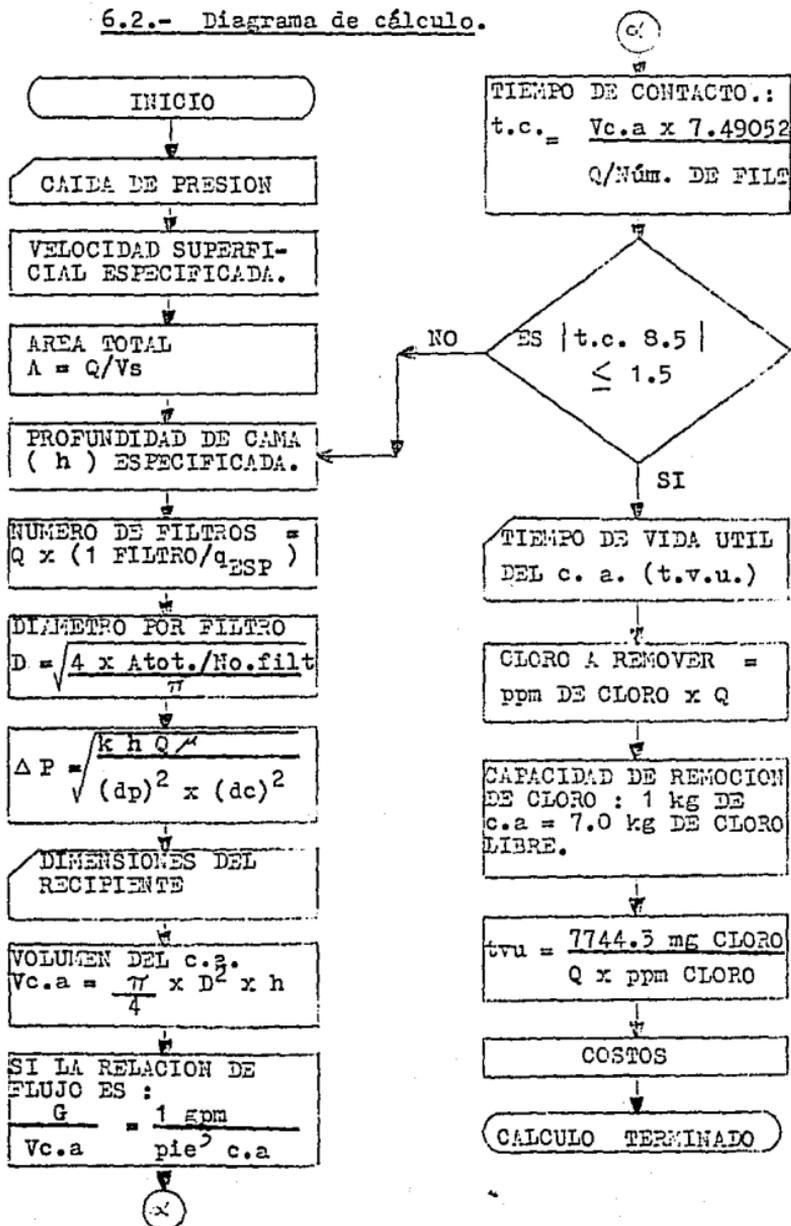
- 1) Gasto volumétrico de agua a filtrar.
- 2) Condiciones de presión y temperatura.
- 3) Tipo de carbón activado.

Los parámetros posibles a variar son los siguientes :

- 1) Análisis del influente.
- 2) Tiempo en el flujo de servicio.
- 3) Número de filtros.

Toda la información necesaria para efectuar el cálculo se encuentra adjunta.

## 6.2.- Diagrama de cálculo.



6.3.- Determinación del flujo de servicio por volumen de carbón activado.

Para especificar el flujo, recurrimos a un fabricante de carbón activado ( Clarímex ) y para su tipo de carbón - nos recomendaron la siguiente relación ;

$$\frac{1 \text{ gpm}}{\text{pie}^3 \text{ de c.a.}}$$

Se nos explicó que el flujo anterior es el recomendado para que el agua influente moje al carbón y pueda efectuarse entonces una buena remoción de cloro que es nuestro problema.

Por tanto, para un flujo de servicio como lo planteamos en el primer capítulo de 1000 gpm tenemos lo siguiente:

$$1000 \text{ gpm} \times \frac{1 \text{ pie}^3 \text{ de c. a.}}{1 \text{ gpm}} = 1000 \text{ pies}^3 \text{ de c.a.}$$

Por medio de la operación anterior, observamos que para un caudal de 1000 gpm de agua a filtrar, la dosis de carbón activado será :

$$D_{\text{c.a.}} = 1000 \text{ pies}^3 \text{ c.a.} \times \frac{7.48052 \text{ gal}}{1 \text{ pie}^3} = 7480.52 \text{ gal}$$

Con lo cual obtenemos un tiempo de contacto ( t.c. ).

$$t.c. = \frac{D_{\text{c.a.}}}{Q} \dots\dots\dots ( 1 )$$

Sustituyendo datos en la ecuación ( 1 ) tenemos :

$$t.c. = \frac{D_{\text{c.a.}}}{Q} = \frac{7480.52 \text{ gal}}{1000 \text{ gal/min}} = 7.48052 \text{ min}$$

El tiempo calculado es muy conservador y lo hemos de confrontar con el que resulte al terminar el cálculo.

#### 6.4.- Caída de presión.

Para calcular la caída de presión al pasar el agua a través de la cama filtrante, podemos hacerlo por diferentes métodos, por ejemplo, cada fabricante tiene muy bien determinada la granulometría y tamaño efectivo de su carbón, luego entonces, cuentan con gráficas en las que, con el tipo de carbón y la velocidad superficial ( Carga superficial ), se puede leer directamente la caída de presión por unidad de profundidad de cama, la cual se considera confiable, pues dichas gráficas están construídas con datos experimentales.

Otro método es realizar el cálculo a partir de ecuaciones reportadas en la literatura que de alguna manera utilizan datos un tanto teóricos, aunque los resultados deben ser muy parecidos a los obtenidos por el método anterior.

De acuerdo al diagrama general de tratamiento, los filtros de carbón activado están precedidos por filtros de arena, antracita, zeolitas o lechos mixtos en general, una posible fuga de sólidos suspendidos formarán una capa de sólidos sobre el carbón activado y producirá una caída de presión, la que según especificaciones y datos experimentales, no debe exceder de las 5 lb / pulg<sup>2</sup>, pues al alcanzarla, el filtro debe ser reacondicionado.

##### 6.4.1.- Método que utiliza una ecuación particular ( Característica para un tipo de carbón ).

Partiendo de nuestro valor original, el flujo de servicio de 1000 gpm, tenemos la siguiente ecuación :

$$h_L = \frac{K v \sqrt{s} L}{g} \times \frac{1}{(d_{50})^2} \dots\dots\dots ( 2 )$$

Donde :

$h_L$  = Caída de presión en pies de agua.

$K$  = Constante adimensional = 550.

$\nu$  = Viscosidad cinemática en  $\text{pies}^2 / \text{seg}$ .

$V_s$  = Velocidad superficial en  $\text{pies} / \text{seg}$ .

$L$  = Profundidad de cama filtrante en pies.

$d_{50}$  = Diámetro promedio de partícula en pies.

$g$  = Aceleración de la gravedad =  $32.174 \text{ pies} / \text{seg}^2$ .

Haciendo las siguientes conversiones :

6.4.1.1.- Viscosidad. ( $\nu$ )

$$\nu = \frac{\mu}{S} = \frac{\text{Centipoises}}{\text{Gravedad específica}} = \text{CENTIESTOKES.}$$

Considerando valores para agua a  $68^\circ\text{F}$ :

$$\mu = 1.005 \text{ Cp}$$

$$S = 1.0$$

$$\nu = 1.005 \text{ Centiestokes} = 1.0814 \times 10^{-5} \frac{\text{pies}^2}{\text{seg}}$$

6.4.1.2.- Area total de filtración =

$$= \frac{\text{Flujo volumétrico en la corriente de proceso. . . . .}}{\text{Velocidad lineal media de la corriente de proceso}}$$

$$A = \frac{q}{V_s}$$

Considerando nuestro valor original de 1000  $\text{gpm}$

$$q = 1000 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times \frac{1}{7.48052 \text{ gal/pie}^3} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 2.228 \frac{\text{pie}^3}{\text{seg}}$$

De acuerdo a las especificaciones de diseño para filtros de carbón activado mostrados en la tabla 6.9 , el  $v_a$

lor de la velocidad de filtración debe estar en el rango de 4 a 6 gpm / pie<sup>2</sup>. Para calcular el área se ha de considerar éste rango de velocidades.

Para  $V_s = 5 \text{ gpm/pie}^2 = 11.14 \times 10^{-3} \text{ pies/seg}$  se obtiene :

$$A = \frac{q}{V_s} = \frac{2.228 \text{ pie}^3 / \text{seg}}{11.14 \times 10^{-3} \text{ pie/seg}} = 200 \text{ pies}^2.$$

En la siguiente tabla, se muestran valores de área, correspondientes a velocidades dentro del intervalo recomendado.

TABLA No. 6.1.

$q' = V_s \left( \frac{\text{gpm}}{\text{pie}^2} \right)$	( pies/seg )	A ( pies <sup>2</sup> )
4	$8.9120 \times 10^{-3}$	250
5	$11.1400 \times 10^{-3}$	200
6	$13.3681 \times 10^{-3}$	166.7

#### 6.4.1.3.- Profundidad de cama.

Para este parámetro de diseño, también se tiene especificado un rango de profundidad, el cual va de 2 a 3 pies, - entonces adoptamos un criterio similar al punto anterior, - se tomará como ejemplo un valor intermedio del rango. Aunque éste valor en realidad dependerá de las dimensiones del recipiente seleccionado, entonces se seleccionará  $L = 2.5$ .

#### 6.4.1.4.- Diámetro de partícula ( carbón activado ).

Dependiendo del tipo de carbón a utilizar, existirá un valor del diámetro medio de partícula. Dato que puede obtenerse con el fabricante de carbón activado. Para este ejemplo se considerará un diámetro de 1.55 mm.

$$d_{50} = 1.55 \text{ mm} = 5.0853 \times 10^{-3} \text{ pies.}$$

#### 6.4.1.5.- Cálculo de la caída de presión :

Utilizando la ecuación 2 con los datos ya descritos, se obtendrá :

$$h_L = \frac{550 \times 1.0814 \times 10^{-5} \times 11.14 \times 2.5}{32.174 \text{ pies/sec}^2} \times \frac{1}{(0.0050853)^2} =$$

$$= 0.1989 \text{ pies de agua} \times \frac{17.7 \text{ psia}}{33.91 \text{ pies de agua}} = 0.0862 \text{ psia}$$

Aplicando la ecuación para diferentes profundidades de lecho y diferentes velocidades superficiales, se obtuvieron los resultados de caídas de presión reportados en la siguiente tabla :

TABLA No 6.2.

Vs (gpm/pie <sup>2</sup> )	Profundidad de cama L		
	2 pies	2.5 pies	3 pies
4	0.0552	0.0690	0.0828
5	0.0690	0.0862	0.0828
6	0.0828	0.1035	0.1242
Caída de presión $h_L$ en psia			

#### 6.4.2.- Método gráfico.

En este método se utilizará una gráfica característica

del tipo y tamaño de partículas que constituyen el medio filtrante.

Para el caso de nuestro ejemplo se dispone de la fig. 8.1. La caída de presión por pie de profundidad de cama filtrante podrá leerse de esta figura en función de la velocidad superficial.

Si la velocidad superficial es :

$$V_s = 5 \frac{\text{gpm}}{\text{pie}^2} = 11.14 \times 10^{-3} \frac{\text{pie}}{\text{seg}}$$

De la figura 8.1 se obtiene

$$h_f = \frac{0.08 \text{ pies de agua}}{\text{pie de cama}} \times \frac{14.7 \text{ psia}}{33.91 \text{ pies de agua}} = \frac{0.0347 \text{ psia}}{\text{pie de cama}}$$

Y la caída de presión para un lecho de profundidad igual a 2.5 pies será :  $h_L = h_f \times L$

$$h_L = \frac{0.0347 \text{ psia}}{\text{pie de cama}} \times 2.5 \text{ pies de cama} = 0.0867 \text{ psia}$$

Siguiendo el procedimiento gráfico anterior, se construyó la siguiente tabla :

TABLA No. 6.3.

L (pies)	Velocidad superficial $V_s$ en pies/seg		
	$8.912 \times 10^{-3}$	$11.14 \times 10^{-3}$	$13.3681 \times 10^{-3}$
1	0.0282	0.0347	0.0412
2	0.0564	0.0694	0.0824
2.5	0.0705	0.0867	0.1030
3	0.0845	0.1041	0.1235

Caída de presión  $h_L$  en psia

### 6.4.3.- Método de la ecuación general.

Para utilizar éste método, se ha considerado la ecuación reportada en algunos libros de texto y es la siguiente:

$$\Delta P = \frac{k h \mu Q}{(d_p)^2 \times (d_c)^2} \dots\dots\dots(3)$$

Donde :

$\Delta P$  = Caída de presión en psia.

$k$  = Constante adimensional = 0.000538.

$h$  = Profundidad de cama en pies.

$\mu$  = Viscosidad en centipoises ( Cp ).

$Q$  = Gasto volumétrico de agua a filtrar en gpm.

$d_p$  = Diámetro de partícula en mm. ( 1.55 ).

$d_c$  = Diámetro de columna en pies.

Como puede observarse, en ésta ecuación es necesario fijar el diámetro de columna, y para hacerlo se requiere de terminar antes la superficie total y con ésta el número de filtros requeridos, lo cual nos lleva primero a dimensionar el recipiente.

#### 6.4.3.1.- Flujo de diseño.

El flujo de diseño será el requerido anteriormente e igual a 1000 gpm.

#### 6.4.3.2.- Número de filtros.

La tabla 6.11 indica el flujo máximo usado para un filtro vertical a presión, el cual es de 342 gpm aplicados en un área de 78.5 pies<sup>2</sup>. Con estos datos procedemos a calcular el número de filtros como se indica a continuación :

$$1000 \text{ gpm} \times \frac{1 \text{ filtro}}{342 \text{ gpm}} = 2.92 = 3 \text{ filtros}$$

#### 6.4.3.3.- Dimensiones por filtro.

Establecido el número de filtros, para dimensionarlos, es necesario calcular primero el volumen de carbón activado a dosificar, además de las capas de grava que funcionan como soporte, puesto que ésto afecta directamente también a la caída de presión.

$$\Lambda = \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \Lambda}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 78.5 \text{ pies}^2}{\pi}} = 10 \text{ pies}$$

$$V = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times h$$

La cama soporte se aplica en tres granulometrías diferentes para fines de diseño ocupando el siguiente volumen :

TABLA No. 6.4.

No. de capa	Profundidad h(pies)	Volúmen V(pies <sup>3</sup> )
1	0.67	52.36
2	0.67	52.36
3	0.67	52.36

Debido a que durante las etapas de reacondicionamiento se producen finos, se ha de considerar un 15 porciento de carbón activado adicional.

Con lo que respecta al flujo de retrolavado, éste debe

rá ser tal que produzca una expansión del 50 por ciento del lecho filtrante, para lo cual tenemos :

$$V_T = Vc.a. + 0.15 Vc.a. + 0.5 Vc.a. + 0.075 Vc.a. + Vg + 0.5 Vg$$

$$V_T = 1.725 Vc.a. + 1.5 Vg. \quad \dots\dots\dots( 4 )$$

$$Vc.a. = \frac{\pi r^2}{4} \times (10 \text{ pies})^2 \times 2.5 \text{ pies} = 196.35 \text{ pies}^3$$

$$V_g = 52.36 \text{ pies}^3 \times 3 \text{ capas} = 157.1 \text{ pies}^3$$

Sustituyendo valores en la ecuación (4) tenemos :

$$V_T = 1.725 \times 196.35 \text{ pies}^3 + 1.5 \times 157.1 \text{ pies}^3 = 574.35 \text{ pies}^3 \text{ ( Por cada filtro )}.$$

Como en las etapas anteriores, se procederá a construir una tabla para todo el rango de profundidades de cama de carbón activado, para un área de 10 pies<sup>2</sup>, un volumen de grava constante de 52.36 pies<sup>3</sup> y una expansión del 50 por ciento ya considerado en la ecuación (4), con el objeto de encontrar la longitud del cuerpo del recipiente, es decir, su altura total.

TABIA No. 6.5.

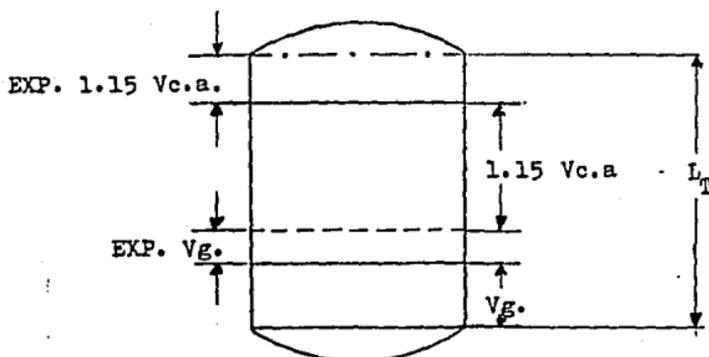
Vc.a (pies <sup>3</sup> )	V <sub>T</sub> (pies <sup>3</sup> )	L <sub>T</sub> (pies)
157.08	428.043	5.45
196.35	495.78	6.31
235.62	563.52	7.18

Con los datos reportados en las tablas 6.4 y 6.5, los

volúmenes y alturas se representan en la siguiente figura :

Fig. 6.1.

Perfil del filtro.



En la figura anterior se ilustran las alturas de cama con las líneas continuas y las expansiones con las líneas discontinuas.

#### 6.4.3.4.- Confrontación de resultados.

Hasta aquí, ya se ha dimensionado en forma general el recipiente contenedor del medio filtrante, y sustituyendo los valores para calcular la caída de presión en la ecuación general, se obtiene :

$$\Delta P = \frac{0.000538 \times 2.875 \times 1.005 \times 342}{(1.55)^2 \times (10)^2} = 0.0022 \text{ psia}$$

La caída de presión anterior corresponde a un volumen de carbón activado de un filtro; agregando un 30 por ciento debido a la cama soporte,

$$\Delta P = 0.0022 \times 1.3 = 0.00286 \text{ psia}$$

Por tres filtros :

$$\Delta P = 0.00286 \times 3 = 0.00858 \text{ psia}$$

Como se puede observar, la ecuación anterior no contempla la velocidad superficial que es un parámetro importante, por lo cual la  $\Delta P$  es menor. Entonces el método a emplear deberá ser el más seguro en cuanto a requerimientos particulares del lugar en donde se vaya a instalar el diseño.

TABLA No. 6.6.

L (Pies)	P/Filtro (Psia)	AP/3 filtros (Psia)
2.0	0.0023	0.0069
2.5	0.0028	0.0086
3.0	0.0035	0.0104

#### 6.5.- Tiempo de contacto. ( TIEMPO DE RESIDENCIA )

El tiempo de contacto real por cada filtro, se puede calcular de la siguiente manera, basándose en el flujo original y el volumen de carbón activado utilizado.

$$t.c. = 225.81 \text{ pies}^3 \text{ c.a} \times 7.48052 \frac{\text{gal}}{\text{pie}^3} \times$$

$$x \frac{1}{1000 \text{ gal/min} \times 1/3 \text{ filtros}} = 5.1 \text{ minutos}$$

t.c. = 5.1 minutos

A continuación se presenta una tabla con los valores del tiempo de contacto obtenidos con los diferentes volúmenes de carbón activado utilizados

TABLA No. 6.7.

1.15 Vc.a. (Pies <sup>3</sup> )	t.c./Filtro (Minutos)	t.c./3 filtros (Minutos)
180.64	4.1	12.3
225.81	5.1	15.3
271.00	6.1	18.3

La tabla anterior es la más ilustrativa del criterio a seguir, puesto que el tiempo de contacto es el mejor parámetro de diseño, ya que este parámetro determina el tamaño del filtro y el tipo de conexión entre los tres filtros, inclinándose por la conexión en paralelo para un tiempo de contacto de 6.1 minutos por filtro.

#### 6.6.- Capacidad de remoción de cloro residual.

Con base en la información proporcionada por el fabricante de carbón activado, si el influente tiene una concentración de 10 ppm de cloro residual, entonces un tiempo de contacto de 7 minutos será suficiente para que en el efluente se reduzca la concentración de cloro hasta de 1 a 3 ppm,

sabiendo que la relación de flujo de servicio por unidad de volumen de carbón activado sea de 1 gpm/pie<sup>3</sup> c.a., y que 1 kg de c.a. puede remover hasta 7.00 kg de cloro libre.

Entonces conociendo la densidad del c.a. y los datos anteriores es posible deducir la cantidad de cloro removido por volumen de carbón activado.

$$Q_{c.a.} = 30 \text{ lb/pie}^3$$

$$1 \text{ kg c.a.} \times \frac{1 \text{ lb}}{0.4536 \text{ kg}} \times \frac{1 \text{ pie}^3}{30 \text{ lb}} = 73.48062 \times 10^{-3}$$

$$1 \text{ kg c.a.} = 73.4862 \times 10^{-3} \text{ pies}^3 \text{ de c.a.}$$

Es decir que  $73.4862 \times 10^{-3} \text{ pies}^3$  de c.a. pueden remover  $7.00 \times 10^6 \text{ mg}$  de cloro libre.

6.6.1.- Cantidad de cloro a remover.

Para realizar este cálculo es necesario fijar el caudal a tratar y saber la concentración de cloro en el influente. Como se indicó, los sistemas de cloración tienen un control muy estricto en la producción de una supercloración, y éstos sistemas generalmente supercloran el agua hasta 6 ó 7 ppm de cloro residual, ya que un valor más alto resultaría muy costoso.

Entonces se puede establecer lo siguiente :

$$Q = 1000 \text{ gpm.}$$

$$\text{Concentración de cloro removido} = 5 \text{ ppm}$$

$$5 \text{ ppm} = 5 \frac{\text{mg}}{\text{lt}} = 18.93 \frac{\text{mg}}{\text{gal}}$$

Para ejemplificar el procedimiento, se utilizará un volumen de c.a. seleccionado de la tabla 6.5.

$$\frac{271.0 \text{ pies}^3 \text{ c.a.}}{1 \text{ filtro}} \times 3 \text{ filtros} = 813 \text{ pies}^3 \text{ de c.a.}$$

Entonces :

$$813 \text{ pies}^3 \text{ c.a.} \times \frac{7 \times 10^6 \text{ mg cloro}}{73.4862 \times 10^{-3} \text{ pies}^3 \text{ c.a.}} =$$

$$7.7443 \times 10^{10} \text{ mg de cloro.}$$

Lo cual indica que  $813 \text{ pies}^3 \text{ c.a.}$  removerán  $7.7443 \times 10^{10}$  mg de cloro libre.

Con ésto se calcula la cantidad de cloro removido por cada minuto :

$$\frac{1000 \text{ gal}}{\text{min}} \times \frac{18.93 \text{ mg cloro}}{\text{gal}} = 18930. \frac{\text{mg cloro}}{\text{min}}$$

6.6.2.- Tiempo de vida útil del carbón activado.  
( t. v. u. )

Con los datos anteriores se esperará que la vida útil de los  $813 \text{ pies}^3$  de c.a. contenidos en la unidad removiendo 5 ppm de cloro libre operando continuamente sería de :

$$7.7443 \times 10^{10} \text{ mg cloro} \times \frac{1 \text{ min}}{18 \ 930 \text{ mg cloro}}$$

$$4.091 \times 10^6 \text{ min} \times \frac{1 \text{ año}}{518.4 \times 10^3 \text{ min}} = 8 \text{ años}$$

Por tanto, t.v.u. = 8 años

Con el propósito de contemplar un rango de diferentes concentraciones de cloro, en la alimentación a los diferentes volúmenes de cama filtrante, y los efectos que produce en cuanto al tiempo de vida útil del carbón, se realizarán cálculos similares a la secuencia anterior manteniendo constante el caudal inicial y los resultados se muestran en la siguiente tabla :

TABLA No. 6.8.

Cloro removido		Vc.a. total de la unidad en pies <sup>3</sup>		
ppm	mg/gal total	541.92	677.43	813.00
5	18 927.06	5.26	6.58	7.89
6	22 712.47	4.38	5.48	6.58
7	26 497.88	3.76	4.70	5.64
8	30 283.29	3.29	4.11	4.93
Tiempo de vida útil del c.a. en años				

Es evidente la información que proporciona la tabla anterior y nuestro caso particular está encerrado en el cuadro.

Como ya es conocido, el agua pretratada contiene una gran variedad de contaminantes además del cloro, los cuales pueden ser removidos por el carbón activado y que reducen la vida útil del mismo.

La cantidad y tipo de dichos contaminantes varían de acuerdo al lugar de procedencia del agua pretratada, por lo que los volúmenes de carbón activado calculados, así como los tiempos de vida útil sirven sólo como referencia para estudio más complejo de estos procesos.

#### 6.7.- Cantidad de agua para reacondicionamiento.

Este capítulo trata del cálculo de la cantidad de agua necesaria para reacondicionar el filtro una vez que ha terminado un ciclo operativo.

Para reacondicionar cada filtro, en ocasiones se debe extraer el lecho filtrante del recipiente que lo contiene - con el objeto de regenerarlo con vapor de agua o en hornos. Para nuestro caso no regenerativo, sólomente se ha de reacondicionar con agua.

#### 6.7.1.- Retrolavado.

En acuerdo a las especificaciones mostradas en la tabla 6.11, el flujo de retrolavado es de 6 gpm / pie<sup>2</sup> durante un tiempo máximo de 10 min.

$$\text{Area} = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{\pi}{4} \times (10 \text{ pies})^2 = 78.54 \text{ pie}^2$$

Por lo que el flujo de retrolavado será de :

$$6 \text{ gpm/pie}^2 \times 78.54 \text{ pies}^2 = 471.24 \text{ gpm.}$$

Y el volumen de agua para retrolavado,

$$471.24 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times 10 \text{ min} = 4712.4 \text{ gal}$$

Cabe señalar que este volumen es por cada filtro.

#### 6.7.2.- Enjuague.

Esta etapa de reacondicionamiento comprende un flujo de 5 gpm/pie<sup>2</sup>, y la literatura recomienda que deberá mantenerse durante 5 minutos. Entonces el volumen de agua para enjuague será de :

$$5 \frac{\text{gpm}}{\text{pie}^2} \times 78.54 \text{ pies}^2 \times 5 \text{ min} = 1963.5 \text{ gal.}$$

La cantidad de agua total para el reacondicionamiento se muestra en la siguiente tabla :

TABLA No. 6.9

Etapa	Flujo (gpm)	Tiempo (min)	Volumen/Filtro (gal)
Retrolavado	471.24	10	4712.40
Enjuague	392.70	5	1963.50
Total			6675.90

### 6.8.- Secuencia operacional.

A continuación se muestra un diagrama de operación con las claves de válvulas referidas al capítulo V.

Fig. No. 6.2

TIEMPO	HORAS		
	MINUTOS		
	0	10	15
ETAPA	SERVICIO	RETROLAV.	ENJUAGUE
VALVULAS ABIERTAS	VCF-01 VCF-02	VCF-03,04 Y VCF-06	VCF-01 VCF-05

La duración del flujo en cada una de las etapas incluyendo la de servicio, son sólo datos aproximados, pues su duración real estará en función del tipo y cantidad de sólidos suspendidos, ya que dichos tiempos serán ajustados durante la operación en la planta en acuerdo a la caída de presión y a la transparencia del agua medida en un aparato apropiado.

Con el fin de evitar ineficiencia en la operación debida a un posible empacamiento que pudiera presentarse en la cama filtrante, es recomendable retrolavar cuando menos una vez, pero no más de tres veces, cada 24 horas; todo esto - con el fin de evitar la producción excesiva de finos y en consecuencia, evitar pérdidas de carbón, además del ahorro de agua.

VII.- CALCULO DEL EQUIPO REQUERIDO PARA  
FILTROS DE CARBON ACTIVADO

Para satisfacer nuestras condiciones de espacio y presión, se diseñará a continuación el recipiente seleccionado para nuestro caso como se indica en la tabla 6.8.

7.1.- Datos de proceso.

Fluido	=	Agua pretratada
Gravedad específica	=	1.0
P. operación	=	100 psi (7.03 kg/cm <sup>2</sup> )
P. diseño	=	125 psi (8.80 kg/cm <sup>2</sup> )
T. operación	=	102.2 °F (39°C)
T. diseño	=	154.4 °F
Altura	=	7.18 pies (2 183.5 mm)
Diámetro interno	=	10 pies (3 048. mm)

7.2.- Volumen del recipiente.

$$\text{Sección transversal} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} (10 \text{ pies})^2$$

$$= 78.54 \text{ pies}^2$$

$$\text{Volumen del cuerpo} = A \times h = 78.54 \text{ pies}^2 \times 7.18 \text{ pies} =$$

$$= 563.92 \text{ pies}^3$$

$$\text{Volumen de la tapa toriesférica} = 80.9 \text{ pies}^3$$

$$= 605.17 \text{ gal}$$

La tapa inferior no está sumada al volumen total pues se considera zona muerta.

Volumen total = 644.82 pies<sup>3</sup>

7.3.- Espesor del cuerpo.

P. diseño/operación	125 psi/72 psi
T. diseño/operación	154 °F/102.2 °F
Tipo de material	A - 285 - C
Corrosión	No.
Eficiencia de soldadura	E = 0.85
Esfuerzo permisible	S = 13 800 $\frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

$$t = \frac{125 \times 5 \times 12}{13\,800 \times 0.85 - 0.6 \times 125} = 0.6435 \text{ pulg}$$

Ajustando a un espesor comercial :

$$t = 0.75 \text{ pulg} = 19 \text{ mm.}$$

7.4.- Espesor de la tapa superior.

P.diseño/operación	125 psi/72 psi
T. diseño/operación	154°F/102.2°F
Corrosión	No.
Eficiencia de soldadura	E = 1.0
Esfuerzo permisible	S = 13 800 psi
L = D	10 pies = 120 pulg

$$t = \frac{0.885 PL}{SE - 0.1P}$$

$$t = \frac{0.885 \times 125 \times 120}{13\,800 \times 1.0 - 0.1 \times 125} = 0.9628 \text{ pulg.}$$

Ajustando a un espesor comercial :

$$t = 1.0 \text{ pulg} = 25.4 \text{ mm.}$$

7.5.- Espesor de la tapa inferior.

Altura de la columna hidrostática :

Parte recta	=	86.16 pulg
Altura de tapa superior	=	21.50 pulg
Altura parte recta tang-tapa/cuerpo	=	2.00 pulg
Altura de tapa inferior	=	21.50 pulg
Altura parte recta tang-tapa/cuerpo	=	2.00 pulg
Total	=	153.16 pulg

$$q = 62 \text{ lb/pie}^3$$

$$62 \frac{\text{lb}}{\text{pie}^3} \times \frac{1 \text{ pie}^3}{1728 \text{ pulg}^3} \times 153.16 \text{ pulg} = 4.8 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

Considerando que  $1 \text{ lb/pulg}^2 \doteq 1 \text{ psi}$

P. hidrostática	=	4.3 psi
P. debida al concreto	=	2.0 psi
P. total	=	152.0 psi

$$t = \frac{0.885 \text{ PL}}{\text{SE} - 0.1 \text{ P}}$$

Donde :

$$P = 152 \text{ psi}$$

$$L = 10 \text{ pies} = 120 \text{ pulg}$$

$$S = 15\,800 \text{ lb/pulg}^2$$

$$E = 1.0$$

$$t = \frac{0.885 \times 152 \times 120}{15\,800 \times 1.0 - 0.1 \times 129} = 1.02 \text{ pulg.}$$

Ajustando a un espesor comercial :

$$t = 1 \frac{1}{8} \text{ pulg} = 28.6 \text{ mm.}$$

7.6.- Tuberías.

Fluido : Agua  
 Viscosidad : 1.005 Cp a 68°F  
 Densidad : 62.371 lb/pie<sup>3</sup> a 68°F

$$v = 0.408 \frac{Q}{d^2} \quad \text{en pies/seg}$$

$$N_{Re} = 123.9 \frac{d v \rho}{\mu}$$

f = Con  $\epsilon/D$ , d ( Crane A-24 )

$$\frac{\Delta P}{100} = 0.0216 \frac{f Q^2 \rho}{d^5} \quad \text{en psi}$$

Velocidad recomendada : 3 - 8 pies/seg.

7.6.1.- Proceso. ( Q = 333.33 gpm )

$\phi_{nom}$ pulg	d	d <sup>5</sup>	Ced	v	N <sub>Re</sub>	$\epsilon/D$	f	$\frac{\Delta P}{100}$
4	4.026	1058	40	8.39	259 731.	0.00044	0.024	3.39
5	5.047	3275	40	5.34	207 235.	0.00035	0.026	1.21
6	6.065	8206	40	3.71	173 019.	0.00030	0.028	0.51

Diámetro seleccionado : 5 pulg.

Material : Acero forjado comercial.

7.6.2.- Retrolavado. ( Q = 475 gpm )

$\emptyset$ nom pulg.	d	$d^5$	Ced	v	$N_{Re}$	$\epsilon/D$	f	$\frac{AP}{100}$
4	4.026	1058	40	11.86	367 152	0.00044	0.0245	6.93
5	5.047	3275	40	7.55	293 000	0.00035	0.0250	2.28
6	6.065	8206	40	5.23	243 905	0.00030	0.0255	0.93

Diámetro seleccionado : 6 pulg.

Material : Acero forjado comercial.

7.6.3.- Enjuague. ( Q = 393 gpm )

$\emptyset$ nom pulg.	d	$d^5$	Ced	v	$N_{Re}$	$\epsilon/D$	f	$\frac{AP}{100}$
4	4.026	1058	40	9.89	306 167.	0.00044	0.025	4.92
5	5.047	3275	40	6.29	244 102.	0.00035	0.026	1.65
6	6.065	8206	40	4.36	203 332.	0.00030	0.027	0.68

Diámetro seleccionado : 5 pulg.

Material : Acero forjado comercial.

## VIII.- COSTOS

Este capítulo trata de un estudio económico por el método del valor presente para evaluar el costo y la inversión total por concepto de agua filtrada.

Un proyecto completamente nuevo, al no ser parte de una empresa ya existente, por lo común no está restringido por políticas establecidas; esto permite una mayor libertad en la planeación para obtener el producto deseado.

Cuando un nuevo proyecto es una extensión de las actividades de una organización ya existente, por lo general es el resultado de una necesidad bien demostrada, ya sea de un nuevo producto o servicio, o de un remedio para alguna dificultad establecida en las operaciones presentes.

Si lo que está involucrado es un producto o un servicio nuevos, la organización o tiene información respecto a la necesidad o está en posición de determinar la necesidad más rápidamente de lo que pudiera hacerlo una organización nueva o una persona física o un grupo todavía no organizado.

En caso de que un proyecto propuesto vaya a permitir una reducción en costos ya existentes, ordinariamente hay disponible una gran cantidad de datos relativos a las condiciones y a los costos que se deben considerar en un estudio económico.

### 8.1.- Estimación de los costos del equipo.

El método de estimación factorial del costo de sistemas de proceso permite evaluar la inversión total fija de un sistema completo a partir de los costos obtenidos para los elementos principales del equipo. Los costos que se ob

tienen por este método se utilizan habitualmente para desarrollar las ecuaciones del costo necesario para optimizar - los detalles de un proceso propuesto.

El punto de partida del método factorial de estimación, es la evaluación de la inversión fija necesaria para los elementos principales del equipo de proceso que se designará por  $I_E$ .

Se ha observado que los costos de otros elementos esenciales necesarios para completar la inversión del sistema - de proceso, pueden correlacionarse con la inversión fija requerida para los elementos principales del equipo, y que la inversión fija total puede estimarse aplicando factores experimentales  $f$ , los cuales se obtienen por medio del análisis de datos de muchos procesos similares:

$$I_F = I_E + \left[ \left( \sum_i f_i I_E \right) \right] f_I$$

Donde:

$I_F$  = Inversión fija para el sistema completo.

$I_E$  = Inversión fija para elementos principales.

$f_i$  = Factores multiplicadores para la estimación de costos de tubería, instrumentación, edificios, etc.

$f_I$  = Factor multiplicador para la estimación de los costos indirectos como ingeniería, contingencias, etc.

El factor de proporcionalidad entre el costo instalado de los elementos principales del equipo de proceso y la inversión total fija, es el denominado factor de Lang ( $f_L$ ).

$$I_F = f_L I_E$$

$$f_D = (1 + \sum_i f_i) f_I$$

8.1.1.- Costo del equipo principal de proceso.

Como equipo principal, tenemos el recipiente denominado como  $I_E$ . En el mercado un equipo de éstas características indicadas en el capítulo VII, tiene un valor aproximado de \$ 39'022,000.00, entonces tenemos lo siguiente :

$$I_E = 39'022,000.00 \times 3 = 117'066,000.00$$

8.1.2.- Costo físico total.

A continuación se dan los valores de los factores experimentales como fracción de  $I_E$  :

Tuberías de proceso :

$$\text{Proceso de fluidos,} \quad f_1 = 0.50$$

Instrumentación :

$$\text{Control poco automatizado.} \quad f_2 = 0.50$$

Edificios de proceso :

$$\text{Construcción semiabierta.} \quad f_3 = 0.20$$

Plantas de servicios :

$$\text{Escasa adición a las ya existentes.} \quad f_4 = 0.04$$

Conexiones entre las unidades :

$$\text{Entre las unidades de servicios.} \quad f_5 = 0.05$$

$$\sum f_i = 1.29$$

$$\text{Costo físico total} = I_E (1 + \sum_i f_i)$$

$$117'066,000. \times (1+1.29) = \$ 268'081,140.00$$

### 8.1.3.- Factor de costos indirectos.

A continuación se dan los valores de los factores experimentales como fracción del costo físico total.

Ingeniería y construcción :

$$\text{Ingeniería inmediata.} \quad f_{I_1} = 0.30$$

Factores de tamaño :

$$\text{Unidad comercial pequeña.} \quad f_{I_2} = 0.05$$

Contingencias :

$$\text{Variaciones imprevistas} \quad f_{I_3} = 0.20$$

$$\sum f_{I_i} = 0.55$$

$$f_I = (1 + \sum_i f_{I_i}) = 1 + 0.55 = 1.55$$

Entonces el total del costo físico lo obtenemos de la siguiente manera :

$$\begin{aligned} I_P &= I_E (1 + \sum_i f_i) f_I \\ &= \$ 268'081,140. \times 1.55 = \$ 415'525,770.00 \end{aligned}$$

### 8.2.- Costo de operación por agua de retrolavado.

Podemos asumir que el retrolavado se efectúa cada ocho

horas, entonces el número de retrolavados por año son los siguientes :

$$1 \text{ año} \times \frac{360 \text{ días}}{1 \text{ año}} \times 24 \text{ horas} = 8640 \text{ horas}$$

$$8640 \text{ hr} \times \frac{1 \text{ retrolavado}}{8 \text{ hr}} = 1080 \frac{\text{retrolav.}}{\text{año}}$$

Entonces el costo será :

$$\frac{1080 \text{ retrolav.}}{\text{año}} \times \frac{\text{volumen de agua}}{\text{retrolav.}} \times \text{costo de volúmen de agua de retrolavado.} = \text{Costo anual de operación por agua de retrolavado.}$$

$$1080 \frac{\text{retrolav.}}{\text{año}} \times \frac{4712.40 \text{ gal}}{1 \text{ retrolav.}} \times \frac{3}{1} \times \$ 0.4543$$

6'936,332. = Costo anual de agua por retrolavado.

### 8.3.- Costos de inversión.

El costo de inversión lo obtenemos a partir de los costos iniciales por concepto del equipo más el costo del c.a.

El costo estimado del equipo es de:

\$ 415'102,450.00

$$\text{Costo de inversión} = \text{Vc.a.} \times \text{c.a.} \times \frac{\text{costo c.a.}}{\text{lb}} + \text{costo del equipo.} =$$

$$813 \text{ pies}^3 \times \frac{30 \text{ lb}}{\text{pie}^3} \times 3,500.00 + \$ 415'525,770.00$$

= \$ 500'890'770.00

### 8.3.1.- Análisis económico del primer año.

Este análisis lo podemos estimar si consideramos una tasa de interés anual, el cual determina en parte el valor del dinero; y un factor de inflación anual que afectará los costos de operación

Se calculan los costos anuales de operación a ocho años así como su valor presente, se suma el valor presente de los costos de operación ya calculados al valor de inversión inicial obteniéndose así, el valor presente de la inversión total

El cálculo de la inversión total se hace mediante la siguiente expresión :

$$I.T. = C_0 + \sum_{n=0}^{n=7} (C_0 \times f^n) \times \frac{1}{(1+i)^n}$$

$$P^n = \sum_{n=0}^{n=7} (C_0 \times f^n) \times \frac{1}{(1+i)^n}$$

Donde :

I.T. = Inversión total a valor presente.

C<sub>0</sub> = Costos de operación del primer año.

i = Tasa de interés = 20 %

P = Valor presente de los costos de operación anual.

f = Tasa de inflación = 1.25

n = Número de años por período.

La ecuación anterior se aplica de la siguiente forma :  
Se calculan los costos para el primero, segundo, tercero,..  
., hasta el octavo año, se hace la suma para obtener el total.

$$(Co \times f^0) \times \frac{1}{(1+i)^0} + (Co \times f^1) \times \frac{1}{(1+i)^1} + \dots + \\ \dots + (Co \times f^7) \times \frac{1}{(1+i)^7} = P^n$$

De esta manera se obtiene que los costos de operación por concepto de agua para retrolavado son : \$ 6'936,332.

Entonces :

Para el primer año :

$$6'936,332. \times (1.25)^0 \times \frac{1}{(1+0.2)^0} = \$ 6'936,332.$$

Para el segundo año :

$$6'936,332. \times (1.25)^1 \times \frac{1}{(1+0.2)^1} = \$ 7'225,246.$$

Para el tercer año :

$$6'936,332. \times (1.25)^2 \times \frac{1}{(1+0.2)^2} = \$ 7'526,402.$$

Para el cuarto año :

$$6'936,332. \times (1.25)^3 \times \frac{1}{(1+0.2)^3} = \$ 7'840,002.$$

Para el quinto año :

$$6'936,332. \times ( 1.25 )^4 \times \frac{1}{( 1 + 0.2 )^4} = \$ 8'166,669.$$

Para el sexto año :

$$6'936,332. \times ( 1.25 )^5 \times \frac{1}{( 1 + 0.2 )^5} = \$ 8'506,947.$$

Para el séptimo año :

$$6'936,332. \times ( 1.25 )^6 \times \frac{1}{( 1 + 0.2 )^6} = \$ 8'861,403.$$

Para el octavo año :

$$6'936,332. \times ( 1.25 )^7 \times \frac{1}{( 1 + 0.2 )^7} = \$ 9'230,628.$$

Los costos totales de operación a valor presente son :  
64'293,731. a una tasa de interés del 20 por ciento y una ta  
sa de inflación del 25 por ciento.

Entonces la inversión total es =

Costos totales de operación a valor presente + Costo  
de inversión inicial.

$$= 500'890,770.00 + 64'293,731.00$$

$$= \$ 565'184,500.00$$

NOTA.- Todas las cantidades de costos incluidas en es  
tos cálculos están en pesos mexicanos.

## C O N C L U S I O N E S

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, podemos decir que el proceso en sí, es económico y eficiente cuando el objetivo sólo es la descloración, ya que no se requiere el diseño de un sistema de regeneración para el medio filtrante, lo cual incrementaría significativamente la economía del proceso, aunado a esto, que no se requiere una operación compleja.

Cuando la unidad sea utilizada para eliminar materia suspendida, la vida útil del medio filtrante se verá reducida, ya que el tipo de contaminante será más variado, lo cual disminuye la capacidad del medio.

Por otra parte, el costo de inversión es relativamente bajo comparado con el costo de cada unidad de volumen de agua filtrada durante la vida útil del equipo.

Para una optimización en la operación y costos, es necesario un estudio más profundo que incluya la parte experimental para construir las isotermas de adsorción y obtener así resultados ampliamente satisfactorios.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

I N F O R M A C I O N   A D I C I O N A L

CRITERIOS DE FLUJO DE SERVICIO Y DE RETROLAVADO  
PARA DIFERENTES MEDIOS Y TIPOS DE FILTROS.

TIPO FILTRO O MEDIO FILTRANTE	CONDICIONES DE DISEÑO GPM/PIE <sup>2</sup>	CONDICIONES DE RE- TROLAVADO GPM/PIE <sup>2</sup>
FILTRO DE ARENA SIN LAVADORES DE SUP.	5 - 6	15 - 20
FILTRO DE ANTRACITA CON LAVADORES DE SUP.	5 - 6	12 - 25
FILTRO DE CARBON ACTIVADO	4 - 6	6
FILTRO DE ZEOLITAS	3 (MAX)	8
FILTRO DE LECHO MIXTO		5 - 10
FILTROS VERTICALES	3	10 - 12
FILTROS HORIZONTALES	3	10 - 12

Tabla 6.9

CARACTERISTICAS DE FILTROS A PRESION

FLUJO NOMINAL	GPM	100	193	251	320	342
DIMENSIONES	DIAMETRO PIES	5	7	8	9	10
	ALTURA,	8'-9"	9'-9"	10'-5"	10'-5"	10'-7"
PESO	LIBRAS	18600	37200	48700	61,700	76,200
AREA LECHO	PIES <sup>2</sup>	19.6	38.5	50.3	63.6	78.5
TAMAÑO DE VALVULAS	CONEXION AL TANQUE PULG	4	6	6	8	8
	INFLUENTE PULG Y EFLUENTE	2	3	4	4	4
	RETROLAV PULG	4	6	6	8	8
	LAV. SUP. PULG	1.5	2	2	2	2
INTERCONEXIO- NES DE TUBERIAS	2 FILTROS PULG	3	6	6	6	6
	3 FILTROS PULG	4	6	6	8	8
	4 FILTROS PULG	6	6	6	8	8
FLUJO RETROLAV.	GPM (60°F)	333	655	850	1080	1350

( Sivalle Tank Inc )

Tabla 6.11

### CARACTERISTICAS DE LA CAIDA DE PRESION.

La caída de presión por pie de profundidad de cama está presentada en la figura 8.1, para varias velocidades superficiales de agua en tratamiento a 25°C. Para otras condiciones, la caída de presión puede ser calculada a partir de la ecuación ( 2 ) del capítulo VI de la página 37 de esta tesis.

En la figura 8.1 se muestran algunos valores graficados que se presentan a continuación:

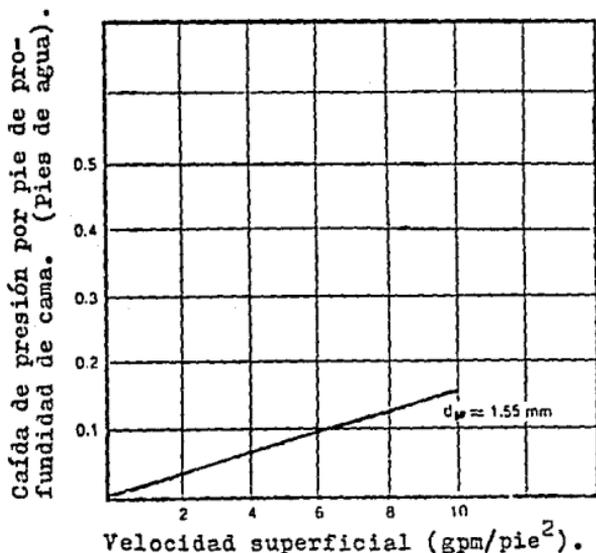


Fig. 8.1.- Características de la caída de presión de Nuchar WV-L - tratamiento de agua a 25°C (77°F).

### CARACTERISTICAS DEL RETROLAVADO.

La expansión de la cama alcanzada a varias velocidades de retrolavado, está mostrada en la figura 8.2 para agua a  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ). La expansión está expresada como un porcentaje del retrolavado y una profundidad de cama fija.

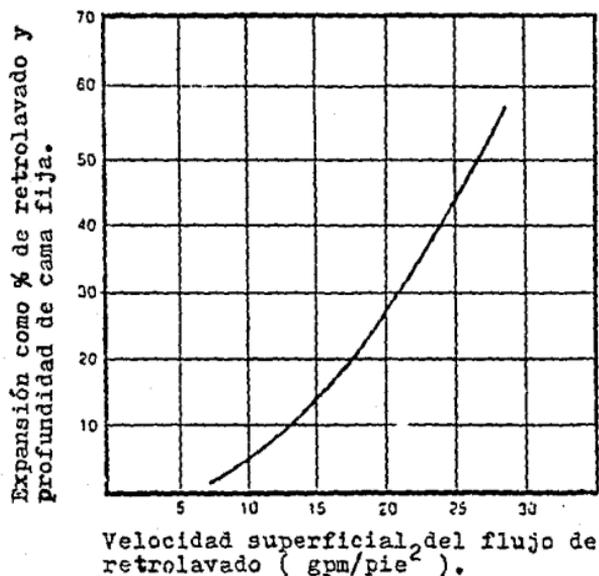


Fig. 8.2.- Características de retrolavado de Nuchar WV-L con agua a  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77^{\circ}\text{F}$ ).

" NOMENCLATURA "

- c.a.- Carbón activado.
- Dc.a.- Dosis de carbón activado.
- t.c.- Tiempo de contacto.
- Q.- Flujo volumétrico en gpm.
- $h_L$ .- Caída de presión en pies de agua.
- K.- Constante adimensional = 550.
- v.- Viscosidad cinemática en  $\text{pies}^2/\text{seg}$ .
- Vs.- Velocidad superficial en  $\text{pies}/\text{seg}$ .
- L.- Profundidad de cama filtrante en pies.
- $d_{50}$ .- Diámetro de partícula en pies.
- g.- Aceleración de la gravedad =  $32.2 \text{ pies}/\text{seg}^2$ .
- S.- Gravedad específica del agua = 1.0
- q.- Flujo volumétrico en  $\text{pies}^3/\text{seg}$ .
- A.- Area en  $\text{pies}^2$ .
- $h_f$ .- Caída de presión en psia.
- AP.- Caída de presión en psia.
- k.- Constante adimensional = 0.000538.
- h.- Profundidad de cama de carbón activado en pies.
- $\mu$ .- Viscosidad absoluta en centipoises (Cp).
- dp.- Diámetro de partícula en mm.
- dc.- Diámetro de columna en pies.
- $A_T$ .- Area total en  $\text{pies}^2$ .
- D.- Diámetro en pies.
- Vt.- Volumen total en  $\text{pies}^3$ .

Vc.a.- Volumen de carbón activado en pies<sup>3</sup>.

Vg.- Volumen de grava en pies<sup>3</sup>.

tvu.- Tiempo de vida útil en años.

ppm CLORO.- Concentración de cloro residual en el influente.

" BIBLIOGRAFIA "

- 1.- A. S. M. E.- Boiler and Pressure vessel Code.- Section VIII, division I.- United Engineering Center.- New York, July 1980.
- 2.- Betz.- Handbook of industrial water conditioning.- Betz Laboratories Inc.- Fifth edition.
- 3.- Crane.- Flow fluids through valves, fittings and pipe. Crane Co.- New York.
- 4.- De Garmo E. Paul y Canada R. John.- Ingeniería Económica.- Compañía Editorial Continental, S. A.- México, 1978.
- 5.- D. F. Rudd and Ch. C. Watson.- Estrategia en ingeniería de procesos.- Editorial Alhambra.- España, 1976.
- 6.- Eskel Nordell.- Tratamiento de agua para la industria y otros usos.- Compañía Editorial Continental, S. A.- México, 1970.
- 7.- Hager, D. G.- "Waste water treatment via activated carbon".- Chem. Eng. Progress, p. 57 ( Octubre, 1976).
- 8.- H. J. Fornwalt and R. A. Hutchins.- "Purifying liquids with activated carbon".- Chem. Eng. Vol. 73, p. 179, Núm. 8 ( Abril, 1966 ).
- 9.- Hutchins A. R.- "New method simplifies design of ... Activated carbon systems".- Chem. Eng. Vol. 80, p. 133, Núm. 16 ( Agosto, 1973 ).
- 10.- Hutchins A. R.- "Thermal regeneration costs".- Chem. Eng. Progress, Vol. 71, p. 80, Núm. 5 ( Mayo, 1975 ).

- 11.- Perry H. Robert and Chilton C. H.- Chemical Engineers' Handbook.- Fifth edition.- Mc. Graw-Hill Chemical Engineering series.- New York, 1975.
- 12.- Sanks, L. R.- Water treatment plant design for the practicing engineering.- Ann Arbor Science Publishers, Inc. Michigan, 1979.
- 13.- Sheppard T. Powell.- Acondicionamiento de aguas para la industria.- Editorial Limusa.- México, 1961.
- 14.- The American Water Works Association Inc.- Water Quality And Treatment.- A Handbook of Public Water supplies.- Third Edition.- New York, 1971.
- 15.- Treybal E. Robert.- Operaciones de transferencia de masa, 2/e.- Libros McGraw-Hill de México, S. A. de C. V.- México, 1980.
- 16.- Ullman.- Enciclopedia de Química Industrial.- Vol.- IX, parte 1, Sección 5, p. 221 - 227.
- 17.- Weber, Jr. Walter J.- Control de calidad del agua, - procesos fisicoquímicos.- Editorial Reverté.- España, 1979.