

CAPÍTULO 5

BATERÍA DE FILTROS DE TASA DECLINANTE Y LAVADO MUTUO

1. INTRODUCCIÓN

Los filtros son las unidades más complejas de una planta de tratamiento de agua. Su correcta concepción depende de la interrelación que exista entre las características de la suspensión afluente y los rasgos del medio filtrante, para que predominen los mecanismos de filtración apropiados que darán como resultado la máxima eficiencia posible. El trabajo experimental mediante un filtro piloto es la forma más segura de seleccionar las características de la unidad y los parámetros de diseño para una suspensión determinada.

El segundo punto en importancia para optimizar el diseño del filtro es un buen conocimiento de la hidráulica de la unidad. Las evaluaciones efectuadas de estas unidades en toda América Latina indican que es en este terreno que se suelen inscribir las deficiencias más notables en la concepción de los proyectos.

La concepción de estas unidades varía dependiendo de las características de la suspensión por filtrar, por lo que podemos diferenciar las unidades que filtran agua decantada de las que reciben agua coagulada o brevemente floculada. En el primer caso, se tratará de las baterías de filtros que integran una planta de filtración rápida completa y, en el segundo, de una planta de filtración directa. Como se ha visto en la sección “Plantas de filtración rápida” del capítulo 3, *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo I, estos últimos sistemas son los más restringidos en cuanto al rango de calidad de agua que pueden tratar.

En este documento se han reunido y sintetizado los criterios más importantes para efectuar el correcto dimensionamiento de las baterías de filtros de tasa declinante y lavado mutuo.

2. VENTAJAS DE LAS BATERÍAS DE FILTROS DE TASA DECLINANTE Y LAVADO MUTUO

Las baterías de filtros de tasa declinante y lavado mutuo se consideran como tecnología apropiada debido a que reúnen las siguientes ventajas sobre otros sistemas de filtración en uso:

- No requieren una carga hidráulica muy grande para operar. Los filtros de tasa constante operan con una carga hidráulica de 1,80 a 2 metros para completar una carrera de operación de 40 a 50 horas en promedio. En estas mismas condiciones, normalmente una batería de filtros operando con tasa declinante requiere una carga similar a la que necesitaría si estuviera operando con tasa constante, dividida por el número de filtros que componen la batería.



Figura 5-1. Batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo (1)

- No tienen galería de tubos. El transporte del agua decantada, filtrada, el agua para el retrolavado de los filtros y el desagüe del agua de lavado se efectúan mediante canales. En la figura 5-1 se puede observar un sistema pequeño que consta de seis filtros de arena sola.



Figura 5-2. Baterías de filtros de tasa declinante con galería de tubos (1)

La galería de tubos está descubierta al lado derecho de las cajas de los filtros.

Normalmente el agua filtrada también se traslada mediante canales, uno de aislamiento y otro que conecta entre sí la salida de todas las unidades. Estos canales se encuentran inmediatamente después de las cajas de los filtros. Sin embargo, también se proyectan baterías de este tipo con galería de tubos como

- No se requiere tanque elevado ni equipo de bombeo para efectuar el retrolavado de un filtro. A través del canal de interconexión y debido a un especial diseño hidráulico del sistema, el agua producida por lo menos por tres filtros retrolava a una unidad. En la figura 5-3 se puede observar este

proceso cuando el falso fondo actúa como canal de interconexión.

- Debido al especial diseño hidráulico de estos sistemas, el operador solo debe cerrar el ingreso de agua decantada y abrir la salida de agua de lavado para que el lavado se produzca en forma automática y con la expansión correcta (25 a 30%).

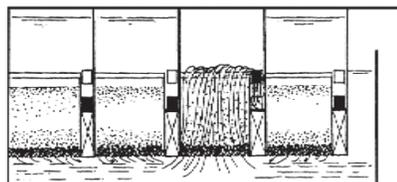


Figura 5-3. Movimiento del agua durante el lavado de un filtro (2)



Figura 5-4. Batería de filtros de 1,0 m³/s de capacidad (1)

- No se requiere instrumental sofisticado ni consolas o pupitres para la operación, aunque en las plantas grandes se los suele incluir.
- En la figura 5-4 se muestra una batería de este tipo de 1,0 m³/s de capacidad, la cual hace parte de una planta de 6,3 m³/s, con accionamiento automático de válvulas y pupitres de operación.

- En la figura 5-5 se puede apreciar una batería doble de filtros de tasa declinante y lavado mutuo, de 2,5 m³/s de capacidad de producción, de mayor tamaño que la anterior, con operación manual.
- La batería de filtros opera bajo el principio de vasos comunicantes. Las unidades están intercomunicadas por la entrada a través del



Figura 5-5. Sistema de filtración de tasa declinante y lavado mutuo (1)

canal de entrada y también del canal de interconexión en la salida. Por esta característica, las unidades presentan todas los mismos niveles y es posible controlar el nivel máximo de toda la batería, con un solo vertedero-aliviadero en el canal de entrada.

3. DESCRIPCIÓN DE UNA BATERÍA DE TASA DECLINANTE Y LAVADO MUTUO

Al igual que en el caso de los decantadores laminares, tenemos soluciones para plantas pequeñas y grandes. En la figura 5-6 podemos apreciar el corte de un filtro de una batería de tasa declinante para una planta de mediana a grande.

- 1) **Caja del filtro.** Es la parte más importante de la unidad. Podemos apreciar del fondo hacia arriba: el falso fondo, el drenaje generalmente del tipo de viguetas prefabricadas de concreto, la capa soporte de grava, el lecho filtrante, las canaletas secundarias de lavado y el canal principal de lavado, que recibe el agua del retrolavado colectada por las canaletas secundarias. Por encima de este nivel se ubican las cargas de agua necesarias para el funcionamiento de la batería (carga hidráulica para el lavado y carga hidráulica para el proceso de filtrado), las cuales determinan la profundidad total de la caja del filtro y se limitan mediante vertederos.

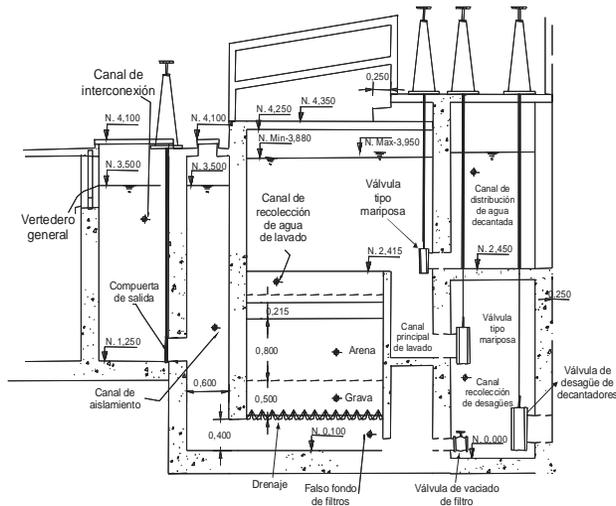


Figura 5-6. Corte de un filtro para plantas de medianas a grandes (1)

- 2) **Canal de distribución de agua decantada.** Alimenta las cajas de los filtros a través de las válvulas de entrada de cada unidad. En la parte superior de este canal se ubica el vertedero que limita la carga hidráulica máxima disponible para la operación con tasa declinante de la batería de filtros.
- 3) **Canal de desagüe de agua de retrolavado.** Ubicado debajo del anterior, recibe el agua del retrolavado de los filtros. En este canal se acostumbra reunir también los desagües de los decantadores (véase la válvula al lado derecho del canal de la figura 5-6) y floculadores, por lo que constituye el canal emisor de la planta.
- 4) **Canal de aislamiento.** Recibe este nombre porque tiene la función de aislar una unidad del resto de la batería, cerrando la válvula de entrada y la compuerta de salida que comunica con el canal de interconexión ubicado a su izquierda. Este canal se localiza contiguo a la caja del filtro y se comuni-

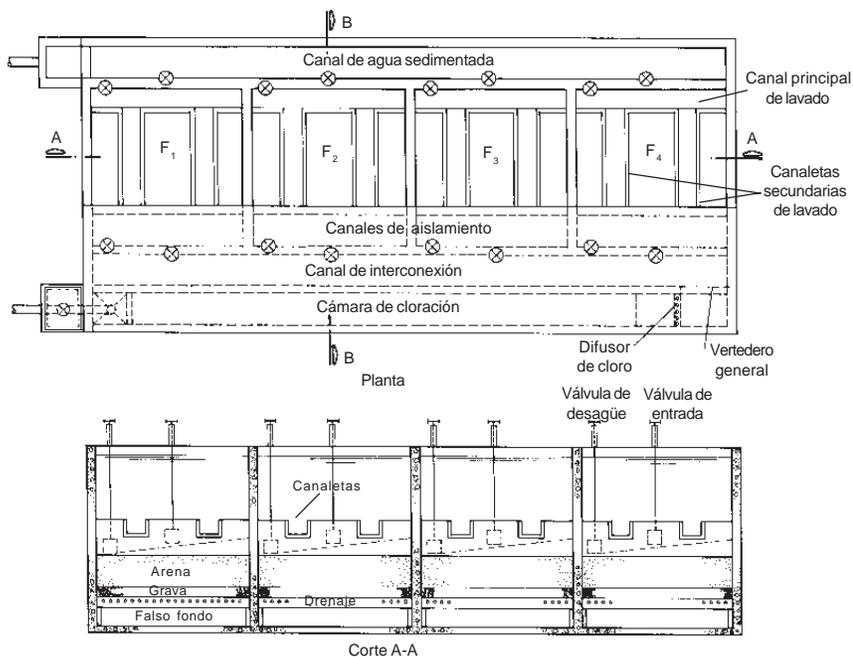


Figura 5-7. Vista en planta de una batería grande de filtros de tasa declinante (1)

ca con ella a través del canal del falso fondo en toda su sección, lo cual permite una distribución pareja del agua de lavado a todo lo ancho del drenaje.

5) Canal de interconexión de la batería. Cumple dos funciones importantes:

- Durante la operación normal de filtración, reunir el efluente de todos los filtros y sacarlo a través del vertedero que controla la carga hidráulica de lavado.
- Durante la operación de lavado de una unidad, al bajar el nivel del agua por debajo del vertedero de salida facilita que se derive automáticamente el agua filtrada producida por las otras unidades en operación (por lo menos tres) hacia el filtro que se encuentra en posición de lavado.

La figura 5-7 muestra la vista en planta de una batería de cuatro filtros y la cámara de cloración a continuación.

4. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

Los criterios expuestos a continuación son comunes a las baterías que filtran agua decantada y coagulada o floculada, con excepción de las recomendaciones relativas a los medios filtrantes, que corresponden a las baterías que reciben agua decantada. Las recomendaciones específicas relativas a los parámetros de dosificación y a las características de lechos filtrantes para sistemas de filtración directa se pueden encontrar en la subsección 6, “Criterios para el diseño de plantas de filtración directa”.

4.1 Geometría de la batería

4.1.1 Área de cada filtro y número de filtros

- El número mínimo de filtros en una batería de tasa declinante y lavado mutuo es de cuatro unidades, de tal manera que tres toman el caudal de toda la batería al momento de lavar una unidad.

- El área de la caja de un filtro debe ser tal que al pasar todo el caudal de la batería por un filtro, se produzca la velocidad ascensional (VL) apropiada para expandir en 30% el lecho filtrante.

$$\text{Área de un filtro } (A_f) = Q / VL \quad (1)$$

- El área total de la batería de filtros se define por la relación del caudal de diseño de la batería sobre la tasa de filtración seleccionada (V_f) de acuerdo con el tipo de lecho filtrante, las características del afluente y el nivel de operación local.

$$\text{Área total de filtración } (A_t) = Q / V_f \quad (2)$$

- El número de filtros de la batería se obtiene por la relación del área total filtrante entre el área de un filtro. Debe ajustarse la velocidad (V_f) hasta que dé un número exacto de filtros.

$$\text{Número de filtros } (N) = A_t / A_f \quad (3)$$

- El ingreso del agua decantada a la caja del filtro debe efectuarse en un nivel más bajo que el nivel mínimo de operación, para que cada filtro tome el caudal que puede filtrar de acuerdo con su estado de colmatación.
- Por la facilidad de operación y mayor duración, deben colocarse válvulas mariposa en la entrada del agua decantada al filtro y la salida del retrolavado al canal de desagüe.

4.1.2 Tasas de filtración

- La tasa de filtración depende de varios factores como el tipo de suspensión afluente (agua decantada, coagulada, prefloculada, con o sin uso de polímero auxiliar, color verdadero, turbiedad, número de microorganismos, etcétera), granulometría y espesor del medio filtrante, método de operación de los filtros, eficiencia del lavado, uso del agua filtrada, etcétera.
- Es usual adoptar un valor conforme muestra el cuadro 5-1. No obstante, cuando fuera posible, es deseable que se realice una investigación experimental a fin de optimizar el diseño y la operación de los filtros.

Cuadro 5-1. Tasas usuales de filtración en función del nivel de operación (3)

Discriminación		Tasa de filtración (m ³ /m ² /día)
Filtración rápida descendente con tasa declinante		
a)	De agua decantada, en medio filtrante único de arena con tamaño efectivo (T. E.) de 0,50 a 0,60 mm y espesor alrededor de 0,80 metros.	120 - 150
b)	De agua floculada o prefloculada, en medio filtrante grueso y único, con espesor superior a un metro y uso de polímero como auxiliar (filtración directa)	240 - 360
c)	De agua decantada en medio filtrante doble, con espesor total inferior a 0,80 metros y buen nivel de operación y mantenimiento.	240 - 360

4.1.3 Drenaje, capa soporte de grava y falso fondo

- El drenaje más durable y factible de ser construido en obra, sin requerir importaciones, es el constituido por viguetas prefabricadas de concreto de forma triangular (ver figura 5-8).

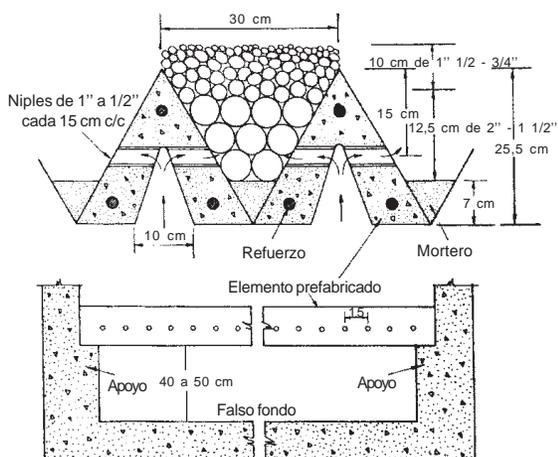


Figura 5-8. Drenaje de viguetas prefabricadas de concreto

- En filtros grandes las viguetas se construyen de 0,30 metros de ancho; y en los pequeños, de 0,15 metros de ancho. Los orificios se ubican a ambos lados de la vigueta espaciados entre 0,10 y 0,15 metros centro a centro. Los orificios se establecen con niples de PVC de ½ a 1” de diámetro.

- Las viguetas no deben tener una longitud mayor de 4 metros para evitar el pandeo. Con longitudes mayores, deberán proyectarse apoyos intermedios.
- Se debe proyectar un número entero de viguetas, para lo cual se tendrá en cuenta que la dimensión del filtro transversal a la posición de las viguetas debe ser un múltiplo de 0,15 metros si el filtro es pequeño o de 0,30 metros si el área del filtro es grande.
- Se denomina *falso fondo* al canal ubicado debajo del drenaje, por donde sale el agua filtrada o asciende el agua para el retrolavado. En las baterías de filtros pequeñas el falso fondo también tiene la función de canal de interconexión (figura 5-9).

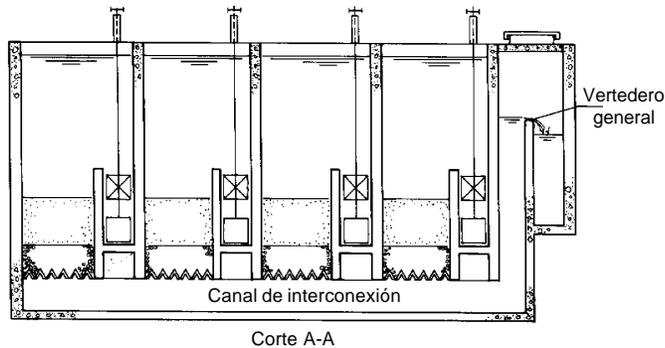


Figura 5-9. Batería de filtros pequeña. El falso fondo es el canal de interconexión (1)

La velocidad de la sección de paso por el falso fondo (V_{ffo}) debe guardar relación con la velocidad de paso por los orificios (V_o), de tal modo que el caudal se distribuya de manera uniforme en todo el lecho filtrante:

$$V_{ffo}/V_o \leq 0,46$$

- Se consigue una buena distribución (desviación de caudal (δ) < 5%) y baja pérdida de carga en los orificios —otro detalle que se debe buscar— con una altura mínima del falso fondo de 0,40 metros y orificios de $\frac{3}{4}$ " de diámetro.
- El soporte de grava está conformado por grava graduada de acuerdo con las especificaciones del cuadro 5-2.

Cuadro 5-2. Capa soporte de grava para viguetas prefabricadas (2)

Capa	Espesor (cm)	Tamaño
1	7,5	1/8" - 1/4"
2	7,5	1/4" - 1/2"
3	7,5	1/2" - 3/4"
4	10,0	3/4" - 1 1/2"
Fondo	12,5	1 1/2" - 2"
Total	45,0	

- La pérdida de carga en los orificios puede ser determinada por la siguiente fórmula:

$$h_o = q^2 / (2 Cd^2 \cdot A_o^2 \cdot g) \quad (4)$$

Donde:

- q = caudal en un orificio (m^3/s)
- Cd = coeficiente de descarga (0,60 – 0,65)
- A_o = área de un orificio
- g = aceleración de la gravedad (m/s^2)
- h_o = pérdida de carga en el orificio (m)

4.1.4 Lecho filtrante

- El lecho filtrante es la parte más importante de esta unidad, donde se realiza el proceso. Todos los demás componentes son accesorios para poder operar y mantener adecuadamente la unidad.
- El lecho filtrante puede ser simple o doble; esto es, de arena sola o de antracita y arena. Con el primero, la inversión es menor, pero al tener un lecho de arena sola se requiere una velocidad de lavado mayor para obtener la misma expansión que cuando el lecho es doble, por lo que resulta un número de filtros mayor.
- Las tasas de filtración, en el caso de lechos de arena sola, varían en promedio entre 120 y 150 $m^3/m^2/d$. Solo con arena gruesa, muy buena calidad de

agua y nivel de operación y empleo de polímeros, es posible aplicar tasas mayores.

- El cuadro 5-3 indica las características del lecho de arena que se recomiendan cuando los filtros van a operar con las dos alternativas, filtración rápida completa y filtración directa.

Cuadro 5-3. Lecho filtrante simple de arena sola (4)

Características	Símbolo	Criterio
Espesor (cm)	L_1	60 – 80
Tamaño efectivo (mm)	D_{10}	0,50 – 0,80
Coefficiente de uniformidad	CU	$\leq 1,5$
Tamaño más fino (mm)		0,42
Tamaño más grueso (mm)	D_{90}	2,0

- Cuando se seleccionan lechos dobles de antracita y arena, se puede usar una tasa promedio de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, lo cual reduce mucho el área filtrante total necesaria para el mismo caudal, en comparación con un lecho de arena sola, y el número de filtros de la batería resulta menor.

Cuadro 5-4. Lecho filtrante doble de arena y antracita (4)

Características	Símbolo	Arena	Antracita
Espesor (cm)	L	15 – 30	45 – 60
Tamaño efectivo (mm)	D_{10}	0,50 – 0,60	0,80 – 1,10
Coefficiente de uniformidad	CU	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$
Tamaño más fino (mm)		0,42	0,59
Tamaño más grueso (mm)	D_{90}	1,41	2,0

- La antracita debe seleccionarse en función de las características de la arena, por lo que esta actividad debe iniciarse con la búsqueda y caracterización de la arena más conveniente, tanto por sus características como por el costo del material y del flete. Será necesaria una muestra de la arena y el análisis granulométrico correspondiente.
- Una vez conocidas las características de la arena, se definirán las de la antracita de acuerdo con los criterios indicados en el cuadro 5-5. Estos

criterios han sido formulados con la finalidad de que la intermezcla entre la antracita y la arena, en el nivel en que se unen la arena más fina y la antracita más gruesa, no sea mayor de 3.

- Conocido el tamaño efectivo de la arena (D_{10}), a través de la curva granulométrica levantada, el tamaño correspondiente al D'_{90} de la antracita será igual a tres veces el tamaño efectivo de la arena (D_{10}). El tamaño efectivo de la antracita (D'_{10}) será igual a la mitad del tamaño correspondiente al D'_{90} de la antracita.

Cuadro 5-5. Criterios para seleccionar la antracita en función de las características de la arena (2)

Características	Símbolo	Criterio
Tamaño correspondiente al 90% que pasa la malla	D'_{90}	$D'_{90} = 3 D_{10}$
Tamaño efectivo (mm)	D'_{10}	$D'_{10} = D_{90} / 2$
Espesor de la arena (cm)	L_1	$L_2 = 2 L_1$
Tamaño correspondiente al 60% que pasa la malla	D'_{60}	$D'_{60} = 1,5 D'_{10}$

- La altura que corresponde a la arena en un lecho doble es 1/3 de la altura total, y la altura correspondiente a la antracita, 2/3 de la altura total del lecho filtrante.

4.1.5 Canal de distribución de agua decantada, coagulada o prefloculada

- Este canal se dimensiona en función del canal de desagüe de agua de retrolavado ubicado en la parte inferior. Se debe tener acceso a este canal para dar mantenimiento a las válvulas de lodos de los decantadores, a las válvulas de descarga de agua de retrolavado de filtros, a las válvulas de desagüe de fondo de los filtros y a las válvulas de desagüe de los floculadores.
- En las plantas pequeñas se le da a este canal un ancho mínimo de 0,80 metros a un metro, dependiendo del diámetro de las válvulas indicadas. En uno de los extremos del canal se coloca un ingreso con escalines para acceder al canal de desagüe, poder dar mantenimiento a las válvulas y accionar la válvula de desagüe del fondo de los filtros. En las plantas grandes el ancho aumenta proporcionalmente al incremento del diámetro de las válvulas.

- En uno de los extremos del canal superior se coloca el aliviadero que controla el nivel máximo de operación de la batería, de tal manera que al rebalsar, el agua cae al canal de desagüe de la parte baja. Este aliviadero tiene, además, la función de indicar al operador el momento de lavar el filtro que tiene más horas de carrera.

4.1.6 Canal de aislamiento

- Este canal recibe un ancho mínimo de 0,60 metros debido a que no hay ninguna válvula o compuerta que deba operarse o recibir mantenimiento en esta sección del filtro.

4.1.7 Canal de interconexión

- Este canal recibe un ancho mínimo de 0,80 metros a un metro. En su interior se encuentra la compuerta de aislamiento de cada filtro. Deben proyectarse un ingreso y unos escalines para ingresar y dar mantenimiento a las compuertas.

4.1.8 Válvula de entrada de agua decantada

- Esta válvula es de operación constante, debe accionarse cada vez que se efectúa el retrolavado de la unidad, por lo que se recomienda el uso de válvulas tipo mariposa, porque la duración, estanqueidad y facilidad de accionamiento son muy importantes.
- El caudal de diseño de esta válvula (Q_c) debe ser igual al caudal de la batería (Q_d) dividido por el número de filtros (N) y multiplicado por 1,5, que es el mayor caudal con el que puede operar un filtro recién lavado.

$$Q_c = 1,5 [Q_d / N] \quad (5)$$

- Se debe diseñar con una velocidad (V_c) de alrededor de un m/s, buscando redondear a un diámetro comercial. La pérdida de carga en esta válvula debe ser compensada con la carga hidráulica disponible en la unidad. El impacto de una pérdida de carga demasiado alta en este punto acortaría la carrera del filtro o bien incrementaría la altura total de la unidad. Tampoco se recomiendan velocidades muy bajas, porque resultarían áreas (A) y diámetros muy grandes de válvulas.

$$A = Q_c / V_c \quad (6)$$

4.1.9 Válvula de salida de agua de retrolavado

- Esta válvula también debe ser de tipo mariposa, por las mismas razones que en el caso anterior. Se puede diseñar con velocidades (V_c) menores de 2 m/s.
- El caudal de diseño de esta válvula (Q_c) es el caudal de diseño de la batería (Q_d).

$$A_1 = Q_d / V_c \quad (7)$$

4.1.10 Válvula de desagüe de fondos

- Esta válvula permite vaciar íntegramente el filtro en el caso de que sea necesario inspeccionar el lecho filtrante, la capa soporte o el drenaje, o bien cambiarlos.
- Esta válvula es de accionamiento muy esporádico, por lo que normalmente se coloca una válvula de tipo compuerta, de 8 a 10 pulgadas. En este caso, la diferencia entre un diámetro y otro solo impactará en el tiempo que demorará en vaciarse el filtro.
- En las baterías en que se proyecten canal de aislamiento y canal de interconexión deberá colocarse una válvula por filtro. En los sistemas pequeños en que el falso fondo opere como canal de interconexión, será suficiente una para toda la batería.

4.1.11 Compuerta de aislamiento o de salida de agua filtrada

- Esta compuerta se diseña con velocidades (V_c) de 1 a 1,5 m/s. La pérdida de carga producida influye tanto en la altura del vertedero que da la carga para la operación de lavado como en la carga hidráulica durante el proceso normal de operación, por lo que impacta doblemente en la altura total del filtro.
- El caudal de diseño (Q_c) de esta compuerta es el caudal de diseño de toda la batería (Q_d), que pasa a través de esta compuerta durante la operación de retrolavado, salvo el caso de filtros grandes lavados con aire y agua, en

que solo se utilice parcialmente el caudal producido. En este último caso, el lecho solo necesita expandir 10% durante el retrolavado, por lo que no se requiere la totalidad del caudal producido.

$$A_2 = Qd / Vc \quad (8)$$

4.2 Hidráulica del lavado

- De la operación de lavado depende el mantenimiento del lecho filtrante, por lo que el diseño de este sistema es determinante para el buen funcionamiento y eficiencia de la unidad.
- Para que la batería pueda autolavarse, es necesario que cumpla con dos condiciones:
 - 1) Al pasar el caudal de operación de la batería a través de un filtro, debe producirse la velocidad de lavado necesaria para expandir entre 25 y 30% el material filtrante.
 - 2) El vertedero de salida debe proporcionar la carga hidráulica necesaria para compensar las pérdidas de carga que se producen durante esta operación.

4.2.1 Canaletas de recolección de agua de lavado

- La recolección de agua de lavado se hace a través de un canal principal (frontal, lateral o central), en el cual descargan las canaletas recolectoras secundarias (ver figura 5-13). El caso de la figura 5-11 es apropiado para un filtro pequeño. Las canaletas secundarias se han adosado a las paredes del filtro para no obstaculizar el acceso al lecho filtrante.

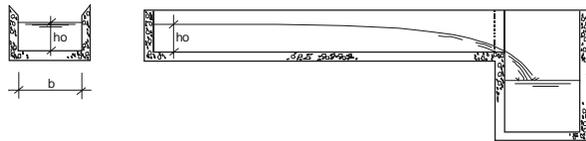


Figura 5-10. Canaletas secundarias de recolección (2)

- Las canaletas secundarias pueden ser de concreto o de materiales especiales (resinas) y presentan diferentes cortes transversales. En general, en las canaletas ejecutadas in situ se da una pendiente del orden de 1% en dirección longitudinal. La capacidad de las canaletas de recolección se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Q_c = 82,5 b \cdot h^{1,5} \quad (9)$$

Donde:

- Q_c = caudal escurrido por una canaleta (m^3/min)
 b = ancho de la canaleta (m)
 h = altura útil de la canaleta (m)

La ecuación (9) solo es válida cuando la descarga es libre (véase la figura 5-10).



Figura 5-11. Canal principal frontal y canaletas secundarias (1)

- Para canaletas con sección transversal no rectangular, se puede admitir la misma altura h y hacer la equivalencia de la sección de escurrimiento. La figura 5-12 presenta las secciones comúnmente usadas en la práctica.
- La mejor sección es la que tiene el fondo inclinado hacia el centro. Esta modificación evita que el lodo se apelmace contra el fondo plano de la canaleta.
- La distancia entre las canaletas y la posición de ellas en relación con el medio filtrante puede determinarse sobre la base del esquema de la figura 5-14 y a partir de las siguientes ecuaciones propuestas por Kawamura (5).

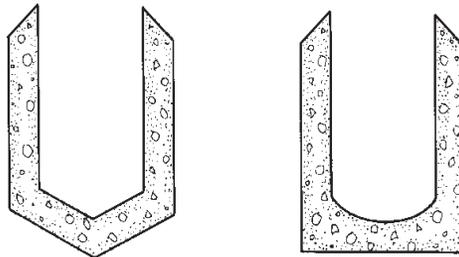


Figura 5-12. Secciones de canaletas más comunes (2)

$$0,75 (L + P) < H_o < (L + P) \quad (10)$$

$$1,5 H_o < S < 2 H_o \quad (11)$$



Figura 5-13. Canal principal central y canaletas secundarias laterales (1)

4.2.2 Ubicación del vertedero de salida

Para determinar la posición del vertedero de salida, es necesario conocer la velocidad con la cual el lecho filtrante seleccionado produce la expansión adecuada. Luego, con esta velocidad, se calculan las pérdidas de carga que se producirán durante la operación de lavado y, con la suma total de estas pérdidas, que viene a ser la totalidad de la carga disipada a lo largo del proceso, se ubica el vertedero.

- Como las pérdidas de carga se calculan matemáticamente y los modelos matemáticos no son exactos, este vertedero debe poder ser regulado mientras el filtro permanece en operación. Debe calibrarse durante la puesta en marcha de la planta, incrementando o bajando su nivel hasta que la expansión del lecho filtrante sea de 30%. Véase un vertedero calibrable en la figura 5-15.

4.2.3 Expansión del medio filtrante durante la operación de lavado

- Los ábacos de las figuras 5-16 y 5-17 corresponden a la solución gráfica del modelo de Cleasby y Fan (3) para granos no esféricos y lecho uniforme. Los ábacos presentan las curvas que relacionan el número de Reynolds en función del número de Galileo para diferentes coeficientes de esfericidad (C_e) y porosidad del medio filtrante expandido. Generalmente, se fija una velocidad ascendente entre 0,7 y 1,0 m/min para filtros de flujo descendente y de entre 0,9 y 1,3 m/min para filtros de flujo ascendente. Con la velocidad ascendente seleccionada, las curvas granulométricas que componen el medio filtrante, la temperatura del agua y el coeficiente de esfericidad, se determina la expansión total del medio filtrante, que deberá resultar entre 25 y 30%.

El número de Galileo y el número de Reynolds son dados, respectivamente, por las siguientes ecuaciones (12, 13):

$$G_{ai} = [D^3 e_i \cdot \rho_a (\rho_s - \rho_a) g] / \mu^2 \quad (12)$$

$$Re_i = V_a \cdot D e_i \rho_a / \mu \quad (13)$$

Donde:

- G_{ai} = número de Galileo para subcapa i
 Re_i = número de Reynolds para subcapa i
 $D e_i$ = tamaño promedio de los granos de la subcapa i (m)
 ρ_s = peso específico del material filtrante (kg/m^3)
 ρ_a = peso específico del agua (kg/m^3)
 μ = viscosidad absoluta del agua ($\text{kg} / \text{s} \times \text{m}$)
 g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

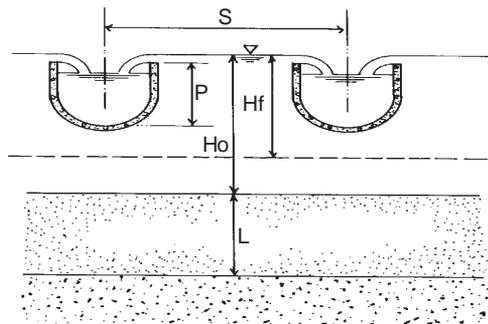


Figura 5-14. Distancia entre las canaletas y su posición respecto al medio filtrante



Figura 5-15. Vertedero calibrable de salida de la batería (1)

Cuadro 5-6. Propiedades típicas de medios filtrantes comunes para filtros de lecho granular (6)

Características	Arena sílice	Carbón de antracita	Carbón activado granular	Granate Idaho
Densidad del material (ρ_s) (g/cm ³)	2,65	1,45 – 1,73	1,3 – 1,5*	4,0 – 4,2
Porosidad perdida del lecho (ϵ_0)	0,42 – 0,47	0,56 – 0,60	0,50	0,45 – 0,65
Esfericidad (C_p)	0,7 – 0,8	0,46 – 0,60	0,75	0,60

* En el caso del carbón virgen, con poros llenos de agua, la porosidad aumenta cuando absorbe la materia orgánica.

Una vez determinado el valor de α para cada subcapa considerada, la porosidad expandida de la arena o de la antracita podrá determinarse por la siguiente ecuación:

$$\epsilon_e = 1 - 1 / \sum_{i=1}^n [X_i / (1 - \epsilon_i)] \quad (14)$$

Donde:

- ϵ_e = porosidad del medio filtrante expandido
- ϵ_i = porosidad de la subcapa expandida (i)
- X_i = fracción, en peso, entre dos tamices consecutivos de la serie granulométrica

El porcentaje de expansión del lecho expandido se calcula por la siguiente ecuación:

$$E = (\epsilon_e - \epsilon_0) / (1 - \epsilon_0) \quad (15)$$

Donde:

- ϵ_0 = porosidad inicial del lecho estático

4.2.4 Pérdida de carga en el lecho filtrante expandido

- La pérdida de carga en el medio filtrante expandido (hL_e) resulta igual al peso de los granos de cada material que compone el medio filtrante.

$$hL_1 = (1 - \varepsilon_o) \cdot l_o \cdot (\rho_s - \rho_a) / \rho_a \quad (16)$$

Donde:

- l_o = espesor del material filtrante no expandido (m)
- ε_o = porosidad del material filtrante no expandido
- ρ_a = peso específico del agua
- ρ_s = peso específico del material filtrante

- La pérdida de carga total en el medio filtrante expandido será la suma de la pérdida de carga en cada material que lo compone.

4.2.5 Pérdida de carga en las canaletas

- Será igual a la altura que alcance el agua de lavado sobre las canaletas secundarias para salir del filtro. Se calcula mediante la fórmula del vertedero rectangular:

$$hL_2 = [Qd / 1,84 (2nLc)]^{2/3} \quad (17)$$

- n = número de canaletas
- Lc = longitud de cada canaleta
- Qd = caudal de diseño de la batería

4.2.6 Pérdida de carga en el drenaje de viguetas prefabricadas

- Una vez diseñado el drenaje y conociendo el numero de viguetas y de orificios, definir el caudal por orificio.

$$qo = Qd / \# \text{ total orificios}$$

$$hL_3 = qo^2 / 2 Cd^2 Ao^2 g \quad (18)$$

- qo = caudal por cada orificio (m³/s)
- Cd = coeficiente de descarga (0,60 – 0,65)
- Ao = área de cada orificio (m²)
- g = aceleración de gravedad (m/s²)

4.2.7 Pérdida de carga en canales y orificios de compuertas

$$hL_4 = K V^2 / 2g \quad (19)$$

- K = coeficiente de pérdida de carga
 V = velocidad de paso del caudal de lavado (m/s)

4.2.8 Cálculo del nivel del vertedero

- Se suman todas las pérdidas de carga importantes desde que el agua sale del canal de interconexión hasta que bordea la canaleta secundaria de recolección: pérdida en la compuerta de salida o de aislamiento, pérdida en el falso fondo, pérdida en los orificios del drenaje, en el lecho filtrante y altura de agua en el borde de la canaleta de recolección.

Carga necesaria para el lavado = Σhf compuerta de salida (si la hubiere) + hf falso fondo + hf drenaje + hf en el lecho filtrante + hf canaleta de lavado secundaria o principal

- El nivel del vertedero será igual al nivel del borde de las canaletas secundarias de lavado, más la carga necesaria para el lavado. En filtros pequeños en los cuales no se tengan canaletas secundarias, esta carga se sumará al borde del canal principal.

Nivel del vertedero de salida de la batería = Nivel borde de las canaletas de lavado + Σhf durante el lavado

4.3 Hidráulica del proceso de filtración

- En este punto es necesario definir la carga hidráulica a fin de que los filtros estén preparados para operar con tasa declinante. La tasa declinante debe instalarse durante la operación, para lo cual se requiere que el proyectista incluya en su proyecto las instrucciones para la puesta en marcha de la batería.
- La carga hidráulica disponible en el sistema debe calcularse de tal manera que la relación entre la tasa de filtración promedio (V_F) y la máxima (V_F máx), que se produce en el momento en que el filtro limpio o recién lavado comienza la carrera, no sea mayor de 1,5.

$$V_F \text{ máx} \leq 1,5 V_F \quad (20)$$

- Para el cálculo de la carga hidráulica del sistema, se dispone de los modelos matemáticos de Cleasby (7), Arboleda (8), Di Bernardo (9, 10) y del método gráfico de Richter (11). Es necesario un cálculo cuidadoso de las pérdidas de carga en el filtro para definir esta altura, ya que si es insuficiente, se obtendrán carreras de filtración muy cortas, y si se exagera su dimensión, se producirán velocidades iniciales muy altas en el filtro recién lavado, lo que deteriorará la calidad del efluente.
- Para la aplicación de los modelos matemáticos o gráficos, se requiere determinar la ecuación de la pérdida de carga en función de la tasa de filtración, que en este caso es de la siguiente forma:

$$H = A (V_F)^2 + E(V_F) + G \quad (21)$$

Donde:

- H = pérdida de carga total durante la carrera o carga hidráulica necesaria (m)
- V_F = tasa de filtración promedio ($m^3/m^2 \times d$)
- A = igual a la suma de las constantes correspondientes a las pérdidas de carga calculadas para la compuerta de entrada y los orificios del drenaje.
- E = constantes correspondientes al cálculo de la pérdida de carga en la arena y/o antracita.
- G = constante correspondiente a la altura de agua en el vertedero de salida de la batería.

Para obtener esta ecuación, se calculan todas las pérdidas de carga iniciales durante el proceso de filtración mediante los siguientes criterios:

4.3.1 Compuerta de entrada

$$hf_1 = K V^2 / 2g \quad ; \quad V = V_F A_F / AC \quad (22)$$

AC = sección de la compuerta

$$hf_1 = K (V_F A_F / AC)^2 / 2g \quad (23)$$

Ecuación de la forma $hf_1 = A(V_F)^2$

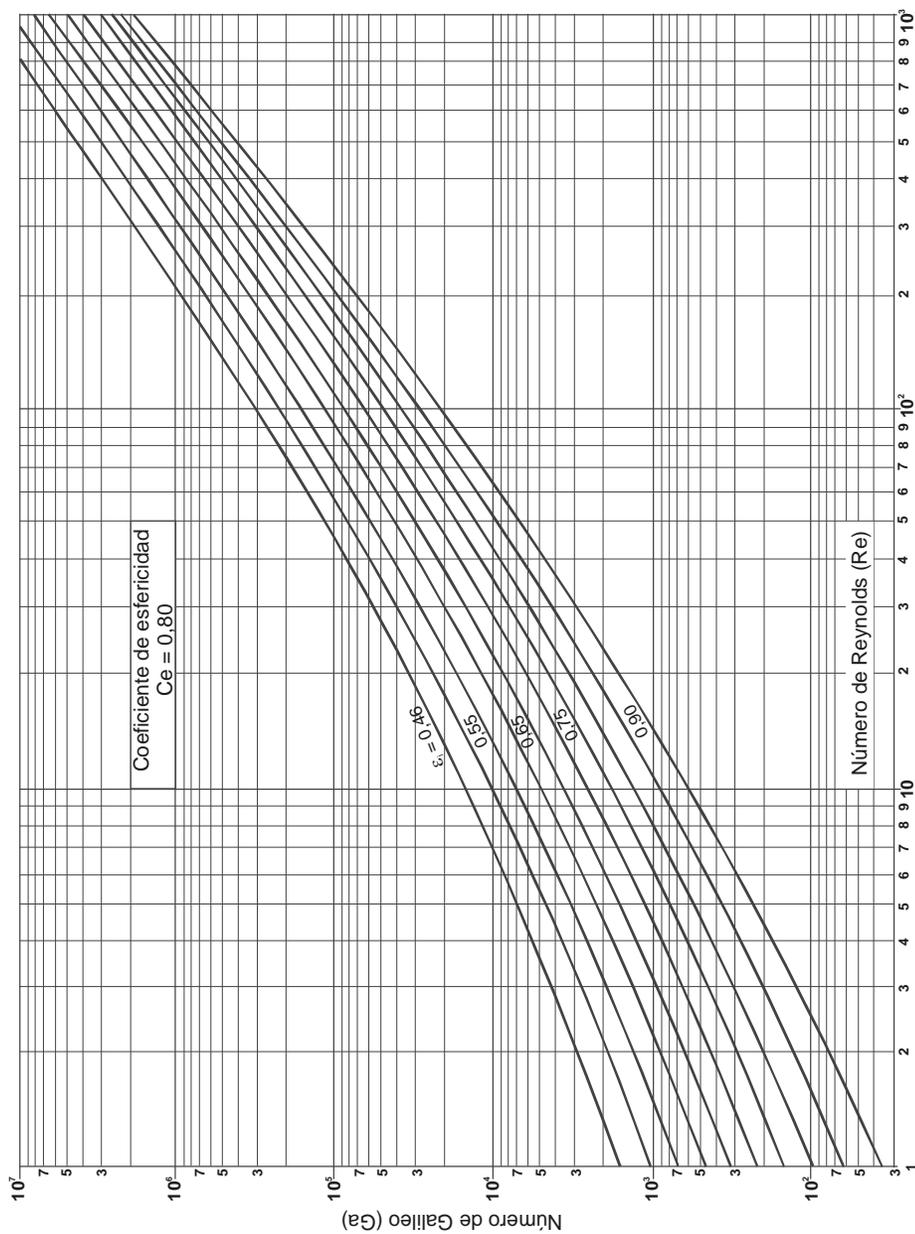


Figura 5-16. Porosidad del lecho expandido (ϵ_i) en función del número de Galileo (Ga) y del número de Reynolds (Re) para $Ce = 0,80$ (β)

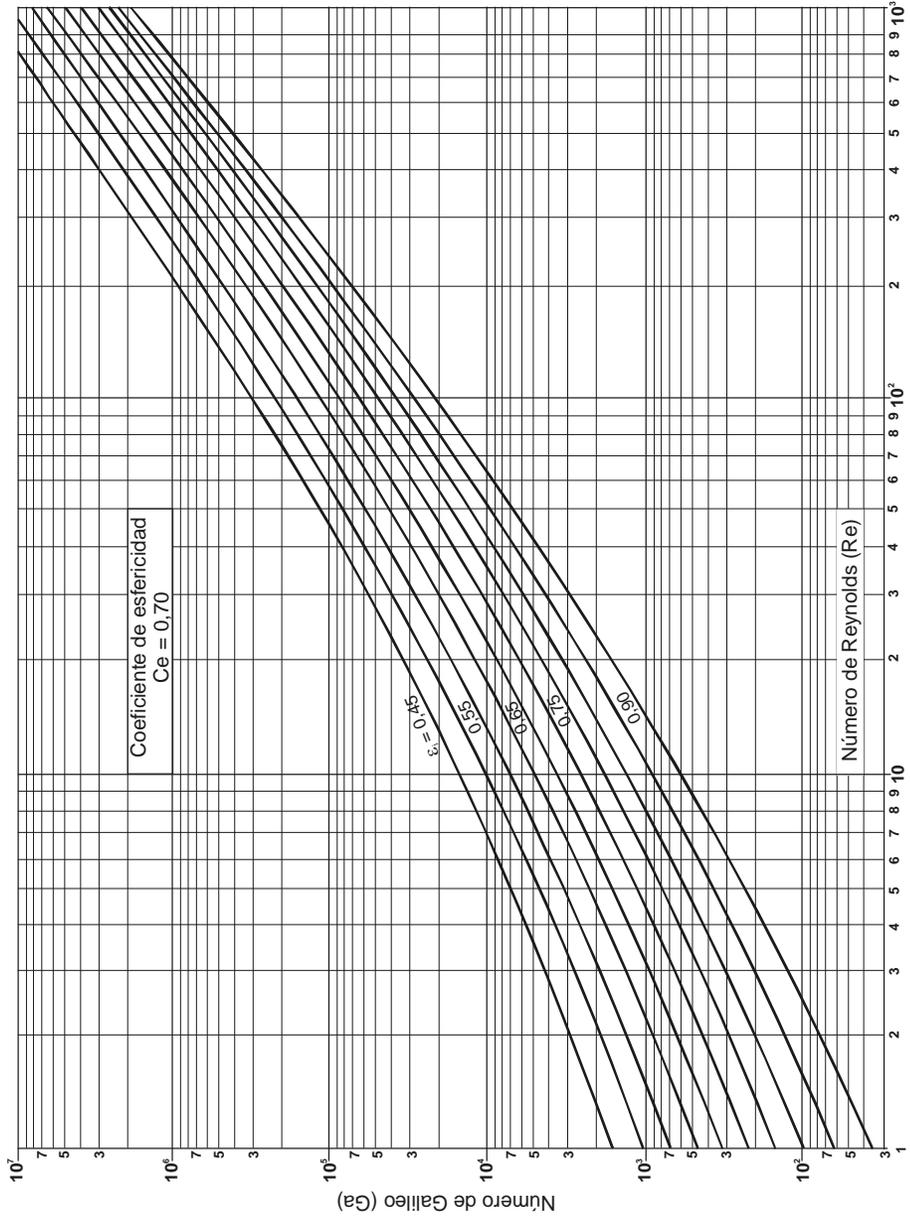


Figura 5-17. Porosidad del lecho expandido (ϵ) en función del número de Galileo (Ga) y del número de Reynolds (Re) para $Ce = 0,70$ (β)

4.3.2 Drenaje

$$hf_2 = q\sigma^2 / (2 C\sigma^2 A\sigma^2 g) \quad (24)$$

Ecuación de la forma $hf_2 = A (V_F)^2$

4.3.3 Medio filtrante: arena y/o antracita

$$hf_3 = 150 \nu / g \cdot [(1 - \epsilon_0)^2 / \epsilon_0^3] \cdot (1 / Ce^2) \cdot \sum Xi / d^2 \cdot L \cdot V_F \quad (25)$$

Donde:

- ν = viscosidad cinemática (m²/s)
- Ce = coeficiente de esfericidad
- L = espesor del medio filtrante (m)

Ecuación de la forma $hf_3 = E (V_F)$

4.3.4 Vertedero de salida

$$hf_4 = (Qd / 1,84 Lr)^{2/3} \quad (26)$$

Donde:

- Qd = Caudal de operación de la batería de filtros
- Lr = longitud de cresta del vertedero general

- Obtenida la ecuación de pérdida de carga del filtro, se puede determinar la carga hidráulica que se debe asignar a la batería de filtros, de modo que, cuando un filtro recién lavado entre en funcionamiento, la velocidad máxima que se dé en estas condiciones, no sea mayor de 1,5 veces la velocidad de filtración promedio. Esta medida de control es para evitar que la calidad del efluente producido en estas condiciones se deteriore.
- Este cálculo se efectúa por interacciones, asumiendo diferentes valores de carga y comprobando cuál es la relación de tasa máxima/tasa promedio que se obtiene para cada caso, hasta obtener la relación recomendada.

- La carga hidráulica calculada se fija en la instalación por encima del vertedero de salida y se limita colocando un aliviadero en el canal de entrada a la batería. El nivel de la cresta del aliviadero debe coincidir con el nivel máximo de operación calculado.

5. APLICACIÓN

El dimensionamiento de la batería de filtros debe empezar por la búsqueda del banco de arena más cercano, capaz de proporcionar el mayor porcentaje de material que se ajuste a las características recomendadas para filtros rápidos.

Para iniciar este estudio de caso, hemos elegido la arena que se especifica en las columnas 1 y 2 del cuadro 5-7. Mediante el procedimiento indicado anteriormente, seleccionaremos la antracita, que proporciona un grado de intermezcla de alrededor de 3.

El tamaño mayor de la antracita deberá ser de $0,56 \times 3 = 1,68$ mm y el tamaño efectivo correspondiente de $1,68/2 = 0,84$ mm. Como el espesor de capa de antracita debe ser $2/3$ de la altura total del lecho filtrante, será de 0,50 m. En las columnas 3 y 4 del cuadro 5-7 se indica la antracita seleccionada para iniciar el estudio.

Como hemos elegido filtros de lecho doble, podemos seleccionar una velocidad de filtración de alrededor de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$. En el cálculo hemos incrementado la velocidad partiendo de $240 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ hasta obtener un número exacto de cuatro filtros y hemos supuesto una velocidad de lavado de 0,70 m/min. Véase el cuadro 5-8.

Cuadro 5-7. Lecho filtrante seleccionado (I)

Características de la arena		Características de la antracita	
Espesor de la capa (<i>m</i>)	0,30	Espesor de la capa (<i>m</i>)	0,50
Tamaño efectivo (<i>mm</i>)	0,56	Tamaño efectivo (<i>mm</i>)	0,84
Coefficiente de uniformidad	1,4	Coefficiente de uniformidad	1,50
Tamaño máximo (<i>mm</i>)	1,41	Tamaño máximo (<i>mm</i>)	1,68
Tamaño mínimo (<i>mm</i>)	0,42	Tamaño mínimo (<i>mm</i>)	0,70

Con las dimensiones de las cajas de los filtros determinadas en el cuadro de cálculo, esquematizamos la batería de filtros de las figuras del 5-18 al 5-20.

En el papel granulométrico de la figura 5-21, podemos apreciar el material filtrante seleccionado y cómo se determina el porcentaje de altura de material comprendido ente las mallas. Con los valores de x_i a x_n determinados para cada material, entramos al cuadro 5-9, donde calculamos la expansión del medio filtrante con la velocidad de lavado seleccionada.

Como la expansión se encuentra entre 25% y 30%, tanto en el caso de la arena como en el de la antracita, la velocidad de lavado supuesta es correcta. Entonces, procedemos a calcular y ubicar las canaletas de lavado secundarias y a estimar las pérdidas de carga durante el lavado para ubicar el vertedero de lavado.

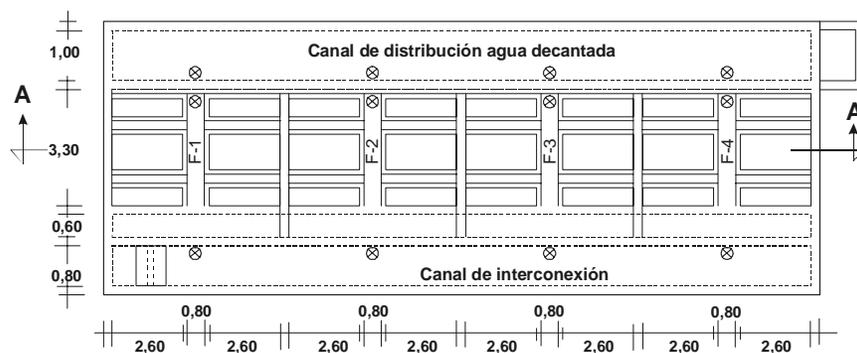


Figura 5-18. Vista en planta de la batería de filtros para 200 L/s materia de la aplicación (I)

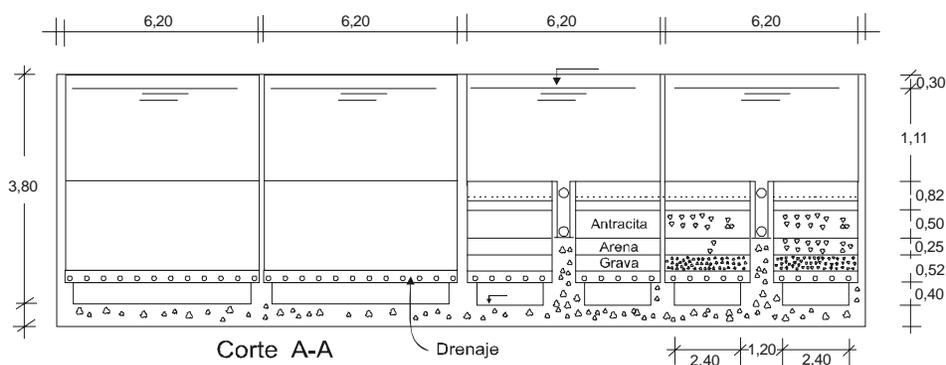


Figura 5-19. Vista en elevación de las cajas de la batería de filtros materia de la aplicación (I)

Cuadro 5-8. Dimensionamiento de la batería de filtros (I)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal	$Q = 0,200$	m^3/s	$AF = Q/Va$	$AF = 0,200 \times 60 / 0,70$ $AF = 17,143$ (3,30 x 5,19)	Área de cada filtro	m^2
	Velocidad ascensional de lavado	$Va = 0,70$	m/min				
2	Velocidad de filtración promedio	$VF = 252$	$m^3/m^2/día$	$AT = Q/VF$	$AT = 0,200 \times 86.400/252$ $AT = 68,572$	Área total de filtros	m^2
				$N = AT/AF$	$N = 68,572 / 17,143$ $N = 4$	Número de filtros	

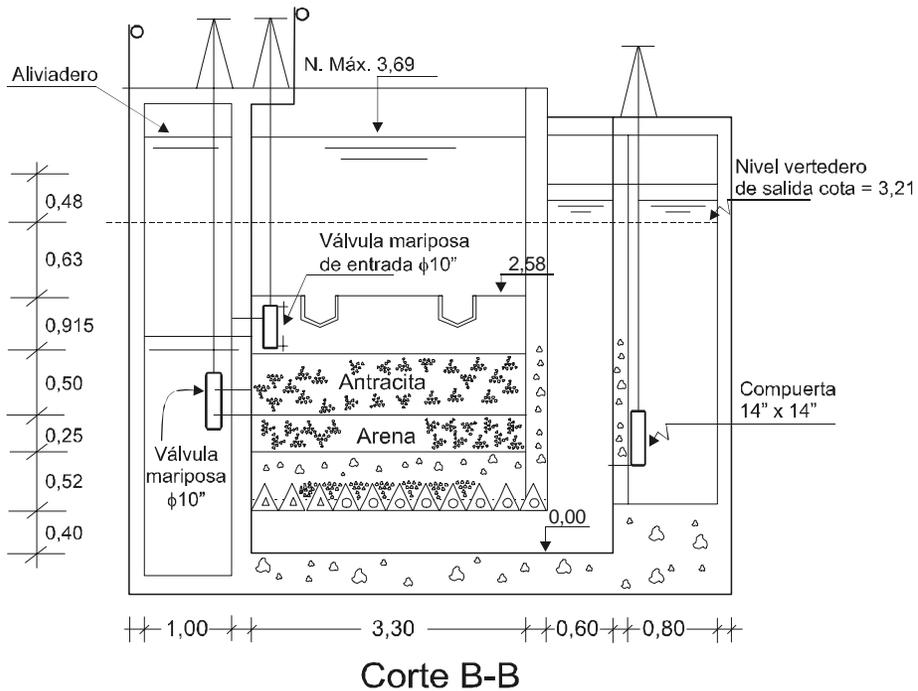


Figura 5-20. Corte transversal de un filtro y canales de la batería de 4 filtros para 200 L/s materia de la aplicación (I)

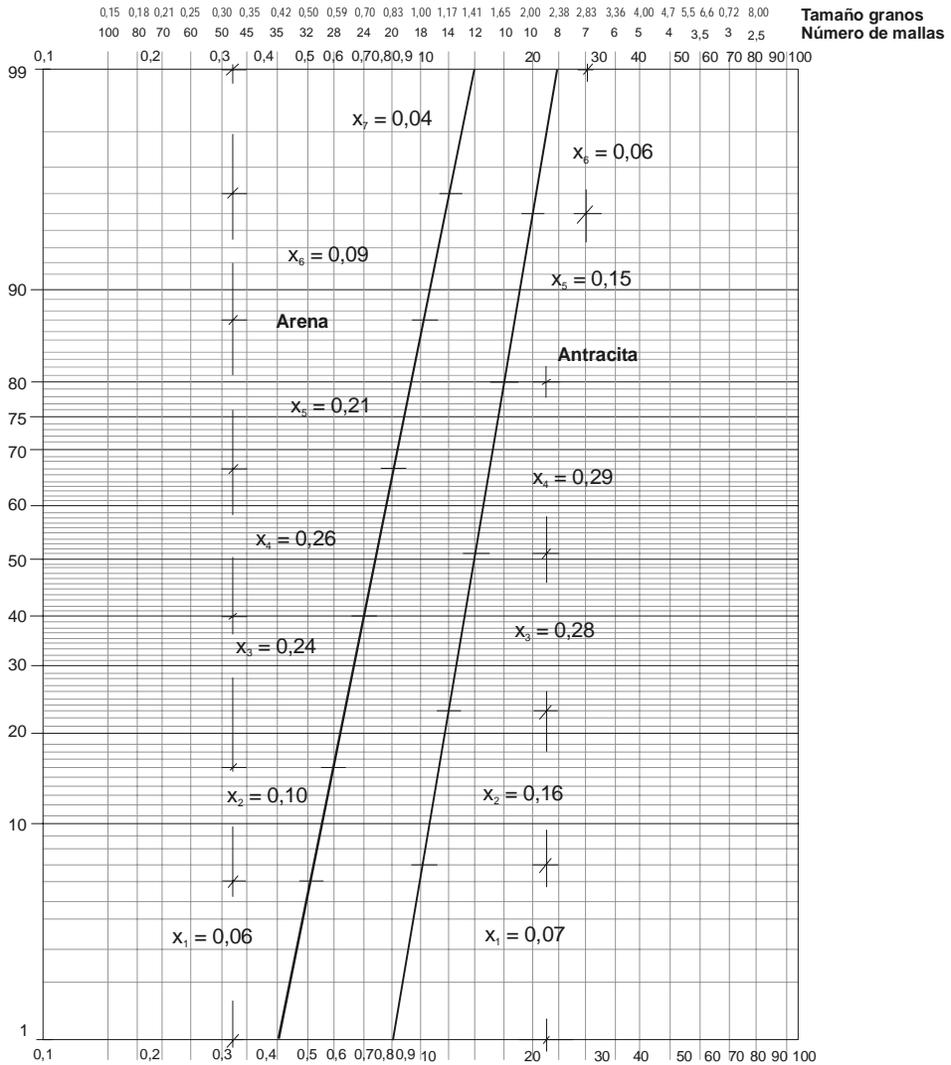


Figura 5-21. Granulometría del medio filtrante seleccionado (1)

Cuadro 5-9. Cálculo de la expansión del lecho filtrante, selección de la velocidad de lavado y ubicación de las canales de lavado (I)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Diámetro más fino de la capa de arena	$d_1 = 0,42$	mm	$De = \sqrt{d_1 \cdot d_2}$	$De = \sqrt{(0,42)(0,50)}$ $De = 0,458$	Diámetro equivalente de la capa más fina	mm
2	Diámetro más grueso de la capa de arena	$d_2 = 0,50$	mm				
3	Peso específico del agua	$\bar{n}a = 1.000$	kg/m ³	$Ga = \frac{De^3 \bar{n}a (\bar{n}s - \bar{n}a)g}{\bar{i}^2}$	$Ga = \frac{10,458(10)^{-3} \times 1.650 \times 10^3 \times 9,8}{[1,1(10)^{-3}]^2}$	Número de Galileo para la capa más fina de la arena	
	Peso específico de la arena	$\bar{n}s = 2.650$	kg/m ³		$Ga = -1,558$		
4	Visc. dinámica 16 °C	$\bar{i} = 0,0011$	kg/s x m				
	Aceleración de la gravedad	$g = 9,81$	m ² /s				
	Coefficiente de esfericidad	$Ce = 0,8$		$Re = Va Dei \bar{n}a / \bar{i}$	$Re = \frac{0,7 (0,000458) (1.000)}{60 \times 0,0011}$ $Re = 4,85$	Número de Reynolds modificado	
5	Del ábaco para $Ce = 0,8$ se obtuvo:	$\bar{a}\bar{i} = 0,68$		$\bar{x}\bar{i} / (1 - \bar{a}\bar{i}) = 0,06 / 1 - 0,68$ $\bar{x}\bar{i} / (1 - \bar{a}\bar{i}) = 0,188$	Repetir pasos del 1 al 4 para cada capa de arena y antracita. Ver cuadros 5-10 y 5-11 y las figuras 5-15, 5-16 y 5-20		
	Fracción del lecho filtrante que ocupa la capa 1 o capa más fina	$\bar{x}\bar{i} = 0,06$					
6	Del cuadro 5-10 se obtiene $\sum \bar{x}\bar{i} / (1 - \bar{a}\bar{i}) =$	2,251		$\bar{a}'_e = 1 - [1 / \sum \bar{x}\bar{i} (1 - \bar{a}\bar{i})]$	$\bar{a}'_e = 1 - [1 / 2,251]$ $\bar{a}'_e = 0,56$	Porosidad expandida promedio de la capa de arena	
7	Del cuadro 5-11 se obtiene $\sum \bar{x}\bar{i} / (1 - \bar{a}\bar{i}) =$	2,338		$\bar{a}'_e = 1 - [1 / \sum \bar{x}\bar{i} (1 - \bar{a}\bar{i})]$	$\bar{a}'_e = 1 - [1 / 2,338]$ $\bar{a}'_e = 0,57$	Porosidad expandida promedio de la capa de antracita	

Cuadro 5-9. Cálculo de la expansión del lecho filtrante, selección de la velocidad de lavado y ubicación de las canaletas de lavado (I) (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
8	Porosidad de la arena limpia	$\hat{a}_o = 0,42$		$E = (\hat{a}_e - \hat{a}_o) / (1 - \hat{a}_o)$	$E = 0,56 - 0,42 / (1 - 0,56)$ $E = 0,31; E = 31\%$	Porcentaje de expansión promedio de la arena	
9	Porosidad de la antracita limpia	$\hat{a}'_o = 0,45$		$E' = (\hat{a}'_e - \hat{a}'_o) / (1 - \hat{a}'_o)$	$E' = 0,57 - 0,45 / (1 - 0,57)$ $E' = 0,28; E = 28\%$	Porcentaje de expansión promedio de la antracita	
				$Le = L(I + E) + L'(I + E')$	$Le = 0,30 (1 + 0,31) + 0,50 (1 + 0,29)$ $Le = 0,393 + 0,645 = 1,038$	Altura del lecho filtrante expandido	m
10	Número de canaletas de recolección del agua de lavado	$N_3 = 2$		$Qc = 1,3 Q / N_3$	$Qc = 1,3 [0,200 \times 60/2]$ $Qc = 7,8$	Caudal que recolecta cada canaleta	m ³ /min
11	Altura útil de las canaletas de lavado	$ho = 0,35$	m	$W = Qc / 82,5 ho^{3/2}$	$W = 7,8 / 82,5 (0,35)^{3/2}$ $W = 0,46$	Ancho de las canaletas de lavado	m
12				$H = 1,5 ho + 0,10$	$H = 0,525 + 0,10$ $H_3 = 0,625$	Altura total de canaletas de lavado más losa de fondo	m
13	Altura del falso fondo	$H_1 = 0,40$	m	$Hc = H_1 + H_2 + Le + H_3$	$Hc = 0,40 + 0,52 + 1,038 + 0,625$ $Hc = 2,583$	Altura del borde de la canaleta de lavado con respecto al fondo del filtro	m
14	Altura del drenaje más la grava	$H_2 = 0,52$	m				
15	Altura del lecho filtrante	$H_3 = 0,80$	m				

Cuadro 5-10. Cálculo de la expansión de la arena para $C_e = 0,80$ (I)

di mín (mm)	di máx (mm)	De (mm)	xi	Ga	Re	εi	xi/(1-εi)
1,17	1,41	1,284	0,04	34.297	15,0	0,40	0,067
1,00	1,17	1,082	0,09	20.485	12,6	0,45	0,164
0,83	1,00	0,911	0,21	12.240	10,6	0,50	0,420
0,70	0,83	0,762	0,26	7.168	8,9	0,55	0,578
0,59	0,70	0,643	0,24	4.296	7,5	0,58	0,565
0,50	0,59	0,543	0,10	2.593	6,3	0,63	0,270
0,42	0,50	0,458	0,06	1.558	5,3	0,68	0,188
			1,00				2,251

Cuadro 5-11. Cálculo de la expansión de la antracita para $C_e = 0,70$ (I)

di mín (mm)	di máx (mm)	De (mm)	xi	Ga	Re	εi	xi/(1-εi)
2,00	2,38	2,182	0,05	50.939	25,5	0,44	0,089
1,65	2,00	1,817	0,15	29.404	21,2	0,50	0,300
1,41	1,65	1,525	0,29	17.406	17,8	0,55	0,644
1,17	1,41	1,284	0,28	10.393	15,0	0,58	0,659
1,00	1,17	1,082	0,16	6.208	12,6	0,63	0,427
0,83	1,00	0,911	0,07	3.709	10,6	0,68	0,219
			1,00				2,338

Cuadro 5-12. Cálculo de las pérdidas de carga durante el lavado de un filtro y ubicación del vertedero de salida (*L*)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Densidad de la arena	$\bar{n}_s = 2,65$	g/cm ³	$hf = (1 - \epsilon_v) \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \right) L$	$hf = (1 - 0,42) \left(\frac{2,65 - 1}{1} \right) 0,30$ $hf = 0,29$	Pérdida de carga en la arena durante el lavado	m
	Densidad del agua	$\bar{n}_a = 1,00$	g/cm ³				
	Esesor de la capa de arena	$L = 0,30$	m				
	Porosidad de la arena	$\epsilon_v = 0,42$					
2	Densidad de la antracita	$\bar{n}_{ant} = 1,5$	g/cm ³		$hf = (1 - 0,45) \left(\frac{1,5 - 1}{1} \right) 0,50$ $hf = 0,14$	Pérdida de carga en la antracita durante el lavado	m
	Porosidad de la antracita	$\epsilon'_v = 0,45$					
3	Esesor de la capa de antracita	$L' = 0,50$	m		$hf_1 = 0,29 + 0,14$ $hf_1 = 0,42$	Pérdida de carga total en el lecho filtrante durante el lavado	m
4	Ancho de cada filtro	$B = 3,30$	m	$N_1 = B/b$	$N_1 = 3,30 / 0,30$	Número de vigueta del drenaje	
	Ancho de cada vigueta	$b = 0,30$	m		$N_1 = 11$		
5	Espaciamiento entre orificios	$e = 0,10$	m	$N_2 = 2c/e$	$N_2 = 2(5,20) / 0,10$	Número de orificios en cada vigueta	
	Longitud de cada vigueta	$c = 5,20$	m		$N_2 = 104$		
6				$NT = N_1 N_2$	$NT = 11(104)$	Número total de orificios en el drenaje	
7					$NT = 1.144$		
				$qo = Q/NT$	$qo = 0,200 / 1.143$	Caudal de lavado por orificio	m ³ /s
8					$qo = 1,75(10)^{-4}$		
	Diámetro de los orificios del drenaje	$do = \frac{3}{4}$ " $do = 0,019$	pulgadas m	$Ao = \delta do^2 / 4$	$Ao = 3,1416(0,019)^2 / 4$ $Ao = 2,85(10)^{-4}$	Area de los orificios del drenaje	m ²

Cuadro 5-12. Cálculo de las pérdidas de carga durante el lavado de un filtro y ubicación del vertedero de salida (*I*) (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
9	Coefficiente de descarga de los orificios	$Cd = 0,65$		$hf_2 = \frac{qo^2}{2g(Cd.Ao)^2}$	$hf_2 = \frac{(0,000175)^2}{(9,81)(0,65)^2(0,00019)^2}$	Pérdida de carga en los orificios del drenaje	m
	Aceleración de la gravedad	$g = 9,81$	m/s^2		$hf_2 = 0,05$		
10	Ancho libre del canal del falso fondo	4,80	m	$AFF = H_1 C$	$AFF = 0,40 (4,80)$ $AFF = 1,92$	Sección transversal del falso fondo	m^2
11				$VFF = Q/AFF$	$VFF = 0,200 / 1,92$ $VFF = 0,104$	Velocidad en el falso fondo durante el retrolavado	m/s
12	Coefficiente de pérdida de carga en el falso fondo	$K = 1$		$hf_3 = K VFF^2 / 2g$	$hf_3 = (0,104)^2(1) / 19,6$ $hf_3 = 5,53 (10)^{-4}$	Pérdida de carga en el falso fondo durante el retrolavado	
13	Velocidad en la compuerta de salida	$Vc_2 = 1,50$	m/s	$hf_4 = K Vc^2 / 2g$	$hf_4 = (1) (1,50)^2 / 19,6$ $hf_4 = 0,115$	Pérdida de carga en la compuerta de salida durante el retrolavado	m
14			m	$hf_5 = 1,3 Q^{2.9} / (1,84 (2N_3 C))$	$hf_5 = [1,3(0,2)^{2.9}] / (1,84(2))$ $hf_5 = 0,04$	Altura de agua sobre las canaletas de recolección	m
15				$hf \text{ lavado} = hf_1 + hf_2 + hf_3 + hf_4 + hf_5$	$hf \text{ lavado} = 0,42 + 0,05 + 0,000553 + 0,115 + 0,04$ $hf \text{ lavado} = 0,63$	Pérdida de carga total durante el retrolavado	m
16				$hv = hc + hf \text{ lavado}$	$hv = 2,58 + 0,63$ $hv = 3,21$	Nivel del vertedero que controla la hidráulica del lavado, con respecto al fondo del filtro	m

Cuadro 5-13. Determinación de la ecuación para calcular la carga hidráulica que requiere la batería para operar con tasa declinante (1)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Coefficiente de esfericidad	$CE = 0,8$		$hf_1 = 150v/g \cdot [(1-\epsilon_0)^2 / \epsilon_0^3] \cdot 1 / Ce^2$	$hf_1 = [180(0,001)/981] \cdot [(1-0,42)^2 / (0,42)^3]$	Pérdida de carga inicial en la capa de arena en función de la velocidad de filtración	cm
2	Del cuadro 5-14 se toma el valor $\sum Xi/di^2$	2.007.497,4		$L \cdot VF \cdot \sum Xi / di^2$	$[1/(0,8)^2] \cdot [(2.007.497,4)(30)/86.400]VF$		
3	Viscosidad	$v = 0,001$	cm ² /s		$hf_1 = 7,56(10)^{-4} VF$		
4	Coefficiente de esfericidad	$CE = 0,7$			$hf_2 = [180(0,001)/981] \cdot [(1-0,45)^2 / (0,45)^3]$	Pérdida de carga inicial en la antracita, en función de la velocidad de filtración	m
5	Del cuadro 5-15 se toma el valor $\sum Xi/di^2$	571.426,8			$[1/(0,7)^2] \cdot [(571.426,8)(50)/86.400]VF$		
6	Viscosidad absoluta	0,001	kg/s/m ²		$hf_2 = 3,43(10)^{-4} VF$		
7				$q_0 = Vf \cdot Af / 86.400 Nt$	$q_0 = (17,14 VF) / (86.400 \times 1.143)$ $q_0 = 1,74 (10)^{-7} VF$	Caudal por orificio de drenaje durante el proceso de filtración, en función de la velocidad de filtración	m ³ /s
8				$Hf_3 = q_0^2 / 2cd^2Ao^2g$	$hf_3 = [1,74 (10)^{-7} VF]^2 / [2(9,8)(0,65)^2 [2,85 \times (10)^{-4}]]$ $Hf_3 = 4,48(10)^{-8} VF^2$	Pérdida de carga en drenaje durante el proceso en función de la velocidad de filtración	m
9	Velocidad en la compuerta de entrada	$Vc_1 = 1,28$	m/s	$Ac_1 = 1,3 Q / N Vc$	$Ac = 1,3(0,200)/(4)1,28$ $Ac = 0,05 ; \phi = 10^n$	Sección de la compuerta de entrada	m ²

Cuadro 5-13. Determinación de la ecuación para calcular la carga hidráulica que requiere la batería para operar con tasa declinante (I) (continuación)

Paso	Datos	Cantidad	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
9	Coefficiente de pérdida de carga en la compuerta	$K = I$		$Hf_4 = K Vc^2 / 2g$	$Hf_5 = (I) (17,14)^2 VF^2 / (0,05)^2 (86.400)^2 19,6$ $Hf_4 = 7,78(10)^7 VF^2$	Pérdida de carga en la compuerta de entrada	m
10	Longitud de cresta del vertedero de salida	$L_2 = I$	m	$Hf_7 = Q / (1,84L_2)$	$Hf_7 = 0,200 / (1,84 \times I)^{2/3}$ $Hf_7 = 0,23$	Altura de agua en el vertedero de salida en función de VF	m
11				$HT = \sum Hf$	$Ht = 8,23 (10)^7 VF^2 + 1,10 (10)^3 VF + 0,23$	Carga hidráulica disponible para el proceso	m

Aplicando el programa de cálculo de Di Bernardo (9, 10) a la ecuación $Ht = 8,23 (10)^7 VF^2 + 1,10 (10)^3 VF + 0,23$, se obtiene que la carga hidráulica para la cual $F = 1,5$ es de 0,48 m, siendo $N1 = 0,39$ m (sobre el vertedero de lavado) el nivel de inicio del ciclo de filtración entre el lavado de un filtro y el siguiente, de tal modo que la oscilación de niveles entre $N1$ y $N2$ solamente es de 0,09 m.

Por lo tanto, la altura total del filtro será igual a:

- 3,21 m altura del vertedero de salida,
- 0,48 m de carga hidráulica
- 0,21 m. borde libre
- Σ total: 3,90 m altura total de la caja del filtro.

Cuadro 5-14. Cálculo de $\sum x/di^2$ para la capa de arena (I)

di (mín)	di (máx)	di²	xi	xi/di²
1,17	1,41	1,65	0,04	24.246,8
1,00	1,17	1,17	0,09	76.923,0
0,83	1,00	0,83	0,21	253.012,0
0,70	0,83	0,58	0,26	447.504,3
0,59	0,70	0,413	0,24	581.113,8
0,50	0,59	0,295	0,10	338.983,0
0,42	0,50	0,21	0,06	285.714,3
			1,00	2.007.497,4

Cuadro 5-15. Cálculo de $\sum xi/di^2$ para la capa de antracita (I)

di (mín)	di (máx)	di²	xi	xi/di²
2,00	2,38	4,76	0,05	10.504,2
1,65	2,00	3,30	0,15	45.454,6
1,41	1,65	2,33	0,29	124.650,8
1,17	1,41	1,65	0,28	169.727,8
1,00	1,17	1,17	0,16	136.752,1
0,83	1,00	0,83	0,07	84.337,4
			1,00	571.426,8

6. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE FILTRACIÓN DIRECTA

Este tipo de tratamiento es muy sensible a las variaciones de turbiedad y color, por lo que se recomienda tener un conocimiento muy completo de las características de la fuente y de todas las variaciones de la calidad del agua antes de adoptarlo como solución. El tiempo de retención es de apenas unos pocos minutos, por lo que durante la operación no hay margen para atinar a actuar en casos de emergencia. Se debe prever desde el nivel de diseño la necesidad de un monitoreo constante de los parámetros de calidad de agua.

Su aplicación más ventajosa y generalizada es como alternativa para épocas de aguas claras, en fuentes con fuertes variaciones estacionales. En estos casos, las plantas se diseñan de tal modo que en la época lluviosa se opera con filtración rápida completa, y en la época seca, con filtración directa (figura 5-22).

6.1 Parámetros de diseño

Esta alternativa de tratamiento está constituida básicamente por dos procesos: mezcla rápida y filtración de flujo descendente. Con aguas de calidad variable, puede ser necesaria una floculación corta de 8 a 10 minutos, para mejorar la remoción de turbiedad y color, y reducir el periodo de duración del traspase inicial del filtro.

- Se recomiendan para el pretratamiento gradientes de velocidad (G) de 1.000 s^{-1} y tiempos de retención mayores de 5 segundos para la mezcla rápida. Para la floculación, gradientes de velocidad de 50 s^{-1} a 100 s^{-1} y tiempos de retención de 5 a 10 minutos.
- Investigaciones realizadas por Hutchison, Dharmarajah y Treweek muestran que la prefloculación previa a la filtración mejora la remoción de turbiedad y el filtrado inicial, aunque también tiene sus desventajas, como la reducción de las carreras de filtración y el mayor costo inicial por la construcción del floculador y por la operación y mantenimiento.
- La prefloculación es necesaria cuando se tienen aguas claras con variaciones horarias, generalmente aguas provenientes directamente de ríos. En el caso de que el agua provenga de un lago o laguna, o se tenga una represa o

embalse intermedio, este servirá para atenuar las variaciones, lo que generará un agua de características más estables.

- Los parámetros de la prefloculación se pueden determinar en el laboratorio, aplicando la metodología indicada en “Determinación de parámetros de filtración directa” (*Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo II, capítulo 11, “Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades”).
- Lo más recomendable, siempre que los recursos disponibles lo permitan, es instalar un filtro piloto de operación continua para determinar la influencia del pretratamiento y la granulometría del medio filtrante en la duración de la carrera de filtración.

6.2 Dosificación

- Se consiguen condiciones de operación adecuadas con dosis óptimas menores de 10 mg/L y conteo de algas menor de 200 mg/m³. Con concentraciones mayores se obtienen carreras de filtración cada vez más cortas.
- Cuanto mayor sea la dosis de coagulante y/o de auxiliar de coagulación, menor será la duración de la carrera de filtración, debido al incremento de la tasa de crecimiento de la pérdida de carga y a un prematuro traspase final, con el consiguiente deterioro del efluente.
- Con sulfato de aluminio, la dosis óptima varía poco para una faja relativamente amplia de valores de turbiedad. Dosis mayores que la óptima no causan deterioro del efluente pero disminuyen la duración de la carrera. Remueve fácilmente el color verdadero en un rango de pH de 5,7 a 6,5 y de 7,5 a 8,5 para turbiedad. Valores mayores producen un aumento del aluminio soluble en el efluente. Las dosis típicas son menores de 10 mg (4).
- El cloruro férrico requiere dosis menores que el sulfato de aluminio para producir un efluente de la misma calidad. Sin embargo, la naturaleza corrosiva del producto puede causar problemas. Con un pH entre 8,0 y 8,3, el residual de hierro se ubica bajo el orden de 0,05 mg/L (4).

- Los polielectrolitos catiónicos producen carreras de filtración más largas sin la ocurrencia del traspase final. La dosis óptima es difícil de seleccionar. El periodo inicial hasta obtener un buen efluente es más largo y no es muy buena la eficiencia de remoción de color verdadero y de turbiedad.
- Muchos trabajos de investigación han demostrado que los polielectrolitos aniónicos y no iónicos, con el sulfato de aluminio o con el cloruro férrico, pueden conducir al éxito en el empleo de la filtración directa. Investigaciones recientes muestran que el uso de polímeros naturales como el almidón de papa, conjuntamente con el sulfato de aluminio, reducen la ocurrencia prematura del traspase final y mejoran la calidad del agua filtrada, aunque disminuyen la duración de la carrera de filtración.
- La dosis óptima de coagulante para filtración directa se puede determinar mediante el procedimiento de laboratorio indicado en “Determinación de parámetros de filtración directa”, *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*, tomo II, cap. 11.
- El método más recomendable para determinar la dosis óptima de coagulante es el uso de un filtro piloto con características idénticas a las de la planta de tratamiento.
- La determinación de la dosis óptima de polielectrolito o polímero natural debe ser investigada a través del análisis de la curva de desarrollo de la pérdida de carga y de la calidad del agua filtrada en la interfaz antracita-arena cuando el lecho es mixto o doble. El rápido desarrollo de la pérdida de carga con producción de agua de buena calidad indica una dosis excesiva de polímero, mientras que la tendencia al traspase (ruptura del flóculo) señala que la dosis utilizada es inferior a la óptima.
- El potencial zeta y el pH del agua coagulada son parámetros importantes en el control del proceso de tratamiento, pues el principal mecanismo de coagulación en este caso es el de adsorción, con el cual se utilizan dosis de coagulante inferiores a las empleadas en una planta convencional, donde lo que se desea es la producción del mecanismo de barrido para optimizar la sedimentación. Véase el “Diagrama de coagulación para filtración directa”, sección 1.8 del capítulo 4 “Coagulación”, *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*.

6.3 Características del medio filtrante

- El medio filtrante recomendado en estos casos es de granos gruesos, para asegurar la obtención de carreras más largas. Pueden utilizarse lechos simples de arena o de arena y antracita, o lechos dobles. Véase el cuadro 5-16.

Cuadro 5-16. Características de lechos simples (4)

Espesor de la capa (m)	1,5 – 2,0
Tamaño efectivo (mm)	1,17 a 1,65
Coefficiente de uniformidad	≤ 1,5
Tamaño máximo (mm)	2,38
Tamaño mínimo (mm)	1,0

Este tipo de lecho se utiliza cuando se necesita operar con tasas de filtración muy elevadas.

Cuadro 5-17. Características de los lechos dobles (4)

Características	Arena	Antracita
Espesor de la capa (m)	0,20 – 0,50	0,40 a 1,0
Tamaño efectivo (mm)	0,50 – 0,83	1,0 – 1,3
Coefficiente de uniformidad	≤ 1,5	≤ 1,5
Tamaño máximo (mm)	1,41	2,38
Tamaño mínimo (mm)	0,42	0,70

6.4 Tasa de filtración

La tasa de filtración debe fijarse en relación con la granulometría del medio filtrante, la calidad del agua cruda y las dosis de sustancias químicas utilizadas. Esta decisión debe tomarse preferentemente a partir de un estudio con filtros piloto, variando las tasas de filtración y el medio filtrante y evaluando la calidad del efluente y duración de la carrera hasta conseguir condiciones de operación apropiadas.

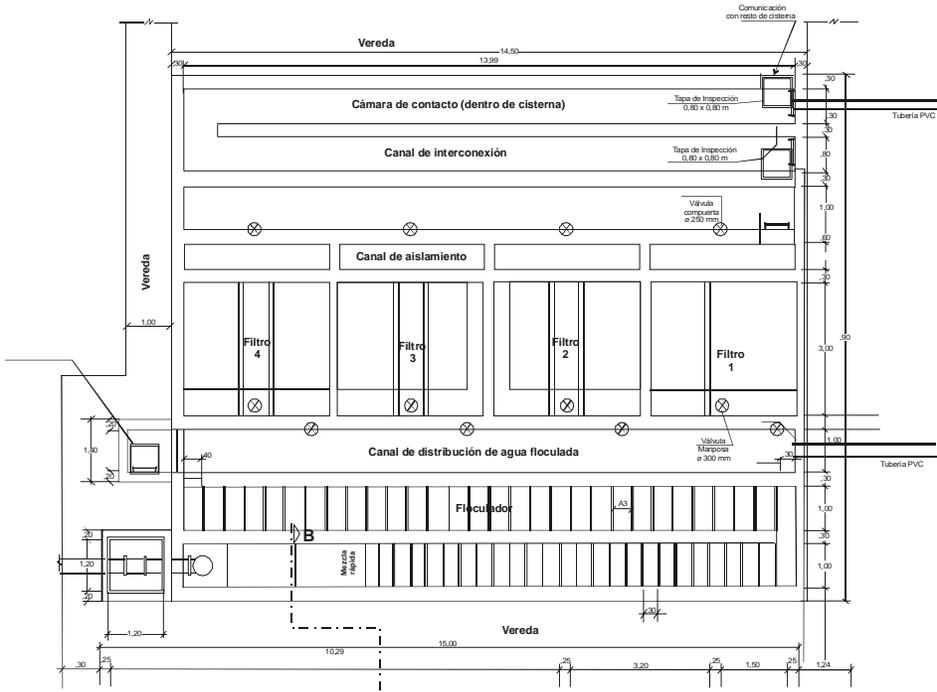


Figura 5-22(a). Modelo de una planta de filtración directa con prefloculación

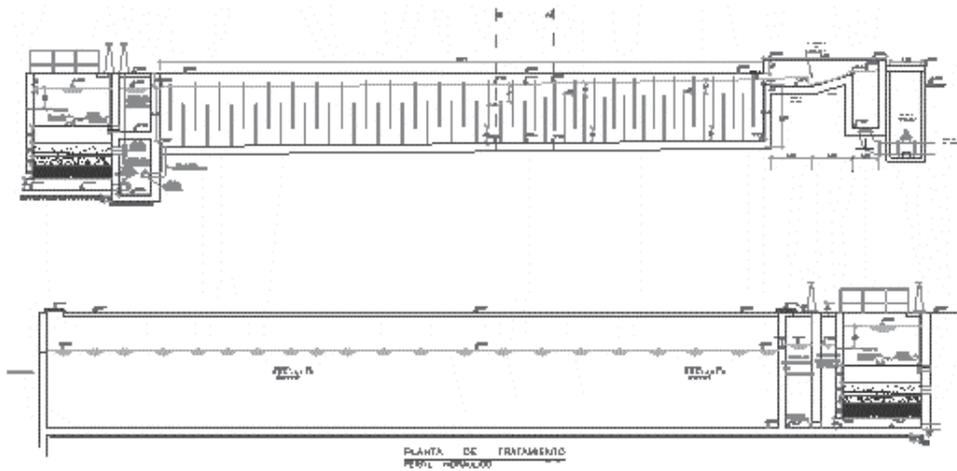


Figura 5-22(b). Perfil hidráulico de la planta de filtración directa

La literatura presenta resultados de investigaciones efectuadas con un rango de tasas de filtración de 120 a 360 m³/m²/d.

Un criterio muy importante que debe tenerse en cuenta al efectuar la selección de la tasa de filtración son los recursos locales existentes para operar y mantener el sistema. Teniendo en cuenta el periodo de retención tan corto de este tipo de planta (solo mezcla y filtración) y lo vulnerables que son los filtros a una operación y mantenimiento deficientes, se recomiendan tasas de operación muy conservadoras, del orden de 120 a 160 m³/m²/d para arena sola y de 180 a 240 m³/m²/d para lechos dobles.

6.5 Control de calidad

Como el tiempo de retención es muy corto, se recomienda, por seguridad, un monitoreo constante del agua filtrada y del agua cruda, de modo que apenas el efluente total presente una turbiedad igual o superior a 0,3 UNT, el filtro que ha estado funcionando por más tiempo sea retrolavado, sin importar cuál sea la pérdida de carga en ese momento. Para que la operación pueda efectuarse de esta manera, durante el diseño deben tenerse en cuenta las instalaciones y equipos necesarios para llevar a cabo un minucioso control de calidad del afluente y del efluente de la planta.

7. FUNCIONAMIENTO DE LA BATERÍA DE FILTROS DE TASA DECLINANTE

La figura 5-23 muestra una batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo para caudales superiores a 100 L/s.

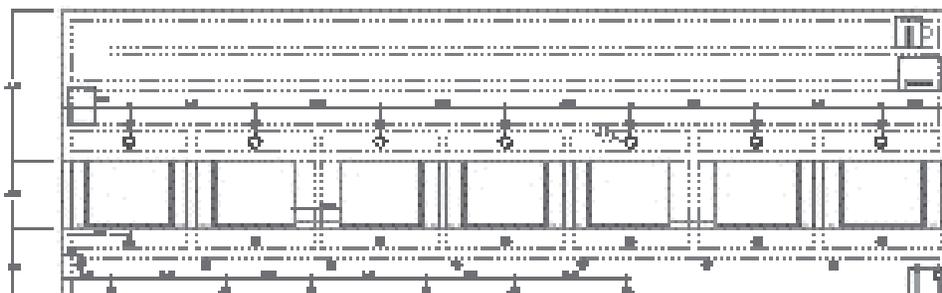


Figura 5-23. Diseño en planta de batería de filtros de tasa declinante para plantas de medianas a grandes

En esta batería se puede observar que la canaleta principal de recolección de agua de retrolavado se ha colocado en medio del lecho filtrante. Con esta distribución, si el ancho de lecho a ambos lados de la canaleta es menor de 2 metros, se evita colocar canaletas secundarias y la altura del filtro es menor.

Como se puede observar, la vehiculación del agua se efectúa mediante canales. Se omiten las galerías de tubos y todo el instrumental que estas incluyen y que normalmente representa 60% del costo del sistema. El canal de distribución de agua decantada es común a todos los filtros y es requisito, para operar con tasa declinante, que las compuertas de ingreso de agua decantada a cada una de las unidades se ubiquen por debajo del nivel mínimo de operación.

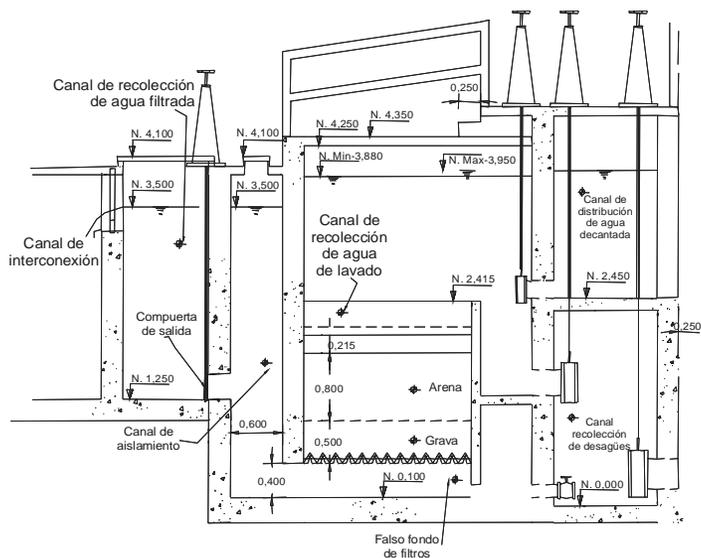


Figura 5-24. Corte transversal de una batería grande de filtros que incluye canaletas secundarias para recolectar el agua de retrolavado

El canal inmediato a la salida de los filtros sirve para aislar una unidad durante el mantenimiento, cerrando la compuerta que lo comunica con el canal de interconexión y la válvula de ingreso de agua decantada.

El canal de interconexión es el que comunica a todos los filtros a través de las compuertas de salida. Mediante este canal se establece el lavado con el flujo de toda la batería. Al cerrar el ingreso de agua decantada y abrir la salida de agua

de retrolavado en el filtro más sucio de la batería, el nivel del agua en este empieza a bajar, y cuando la altura de agua es menor que la posición del vertedero de control de salida de la batería (ver el tercer canal de la figura 5-24), el flujo deja de pasar por el vertedero, se invierte e ingresa al filtro que está en posición de lavado a través de la compuerta de salida.

La velocidad de lavado se establece gradualmente a medida que el agua se desplaza en los canales, lo cual impide que se produzcan cambios bruscos que pudieran ocasionar pérdida del lecho filtrante. La velocidad de lavado se establece al pasar el caudal de proyecto de la batería a través de la sección del filtro, lo que produce una expansión promedio de 25 a 30%. En la caída del vertedero de salida (figura 5-24) se aplica la dosis de cloro y, mediante la cámara de contacto considerada después, se le da un tiempo de retención complementario al que está disponible en el sistema, antes de la primera conexión domiciliaria.

En el canal de desagüe del agua de retrolavado, se ubica una válvula de compuerta para vaciar totalmente la unidad (figura 5-24).

En las plantas pequeñas el diseño de la batería se simplifica reduciendo el número de canales (figura 5-25). Se omite el canal de aislamiento y de vaciado total; el canal de interconexión se ubica en el falso fondo de las unidades (corte A-A).

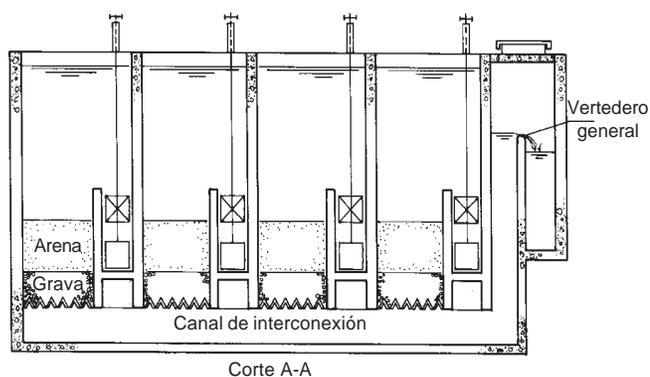


Figura 5-25. Batería de filtros de pequeña capacidad de producción

Al diseñar los filtros alargados de tal modo que la distancia perpendicular a la canaleta no sea mayor de 2 metros (figura 5-25), se pueden omitir las canaletas secundarias de recolección de agua de lavado y, por consiguiente, disminuir en aproximadamente un metro la altura del filtro. Con anchos del lecho mayores de 2 metros, se dificulta el transporte del sedimento y es necesario considerar canaletas secundarias, como se aprecia en la figura 5-13.

En esta solución no es posible sacar una unidad de operación para darle mantenimiento sino que debe parar toda la batería. Para estas situaciones, se debe prever una capacidad de almacenamiento que permita abastecer a la población mientras dura el mantenimiento preventivo. Para vaciar toda la batería, se abre la compuerta que comunica el canal de interconexión con la cámara de cloración.

8. DEFECTOS DE DISEÑO MÁS COMUNES

- Uno de los defectos más comunes es el resultante de proyectar la batería de filtros sin tener en cuenta la granulometría del material filtrante que se va a colocar. Al elegir una velocidad de lavado al azar, sin relacionarla con las características de la arena o de la antracita, es muy difícil que luego la arena se expanda adecuadamente. Con el tiempo, este problema llega a anular totalmente la eficiencia de la batería de filtros, porque si la velocidad de lavado es muy baja y la arena gruesa, a medida que pasa el tiempo, se va colmatando y apelmazando con el sedimento, hasta llegar a la situación de que el material pierde porosidad y el agua se abre paso a través de grietas. Si la velocidad es muy alta y el material filtrante fino, este se va perdiendo en los lavados sucesivos, hasta que solo queda un poco de material que no llega a salir por su profundidad.



Figura 5-26. Vertedero de salida fijo, no calibrable

- Cuando el lecho filtrante es doble, de antracita y arena, es frecuente encontrar que no se seleccionó correctamente la antracita en función de la arena sino que esto se hizo al azar. Cuando la antracita es muy fina, se pierde toda en los primeros lavados y cuando es muy gruesa, se encuentra totalmente revuelta con la arena.

- Hay casos en que el proyectista, en lugar de utilizar los canales para vehiculizar el agua, coloca tuberías dentro de los canales para transportar el agua decantada que ingresa, el agua filtrada y el agua de retro-lavado. Además del gasto inútil en que se está incurriendo en este caso, sucede que al sacar el agua de retrolavado mediante una tubería instalada en el mismo nivel del orificio de salida del filtro, el agua de lavado se represa dentro de la caja del filtro, lo que resta eficiencia a esta operación.



Figura 5-27. Vertedero de salida del tipo plancha emperrada (1)

- En innumerables casos, el vertedero de salida no se encuentra en el nivel apropiado, la carga de lavado es muy poca o demasiado grande y ello no se puede corregir, porque el vertedero no es calibrable (figura 5-26) o es del tipo en que la plancha metálica del vertedero está emperrada al muro y para poder ajustar la carga, hay que parar la planta para mover la plancha. En la mayoría de casos, los tornillos están muy oxidados y al moverlos, se parten (figura 5-27).



Figura 5-28. Pesadas tapas de concreto (1)

- No se deben proyectar pesadas tapas de concreto para los ingresos a los canales, porque:

a) Por su peso, los operadores no las colocan en su sitio y el agua filtrada queda expuesta a la contaminación (figura 5-28).

b) Como las tapas son pesadas, las dejan caer desde lo alto y terminan rotas y los canales quedan permanentemente destapados.

- En la batería de filtros de la figura 5-29 se puede apreciar cómo, al cabo de unos años, las tapas se rompieron y el agua filtrada se encuentra expuesta a la contaminación.

- Es muy frecuente también que la planta en su totalidad se proyecte para el caudal de final de la segunda etapa, para un futuro de 20 a 25 años, pero que empiece a operar con el caudal actual. Al modificarse el caudal del proyecto, automáticamente estamos modificando la velocidad de lavado. La batería de filtros de la figura 5-30 fue proyectada para un caudal de 250 litros por segundo y, por problemas de captación, el caudal de operación variaba entre 40 y 120 litros por segundo.

Cuando se evaluó esta planta, la expansión de la arena era nula y se encontraba apelmazada con sedimento de varios años (figuras 5-30 y 5-31).



Figura 5-29. Canales de agua filtrada destapados



Figura 5-30. Batería de filtros de tasa declinante para un caudal de 250 L/s



Figura 5-31. La operación de lavado era muy pobre

- Otro problema que se afronta en la operación de la batería de filtros es el causado por un proyecto en el que se consideraron compuertas para accionar la entrada de agua decantada y la salida de agua de lavado en lugar de válvulas tipo mariposa. Las compuertas de fabricación local aún no han alcanzado buenos niveles de calidad, tienen poca durabilidad y no son estancas. Demandan mucho esfuerzo al operador cada vez que deben ser accionadas y son precisamente las de operación más frecuente.



Figura 5-32. Batería de filtros de tasa declinante y lavado mutuo

REFERENCIAS

- (1) Canepa de Vargas, L. *Proyectos y fotos de archivo*. Lima, CEPIS/OPS, 2004.
- (2) Programa HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *Manual V, Tomo III, Criterios de diseño para filtros*. Lima, CEPIS, 1992.
- (3) Di Bernardo, L. *Proyecto de sistemas de filtración para tratamiento de aguas de abastecimiento*. São Paulo, Escuela de San Carlos de la Universidad de São Paulo, 1987.
- (4) Di Bernardo, L. *Filtración directa descendente*. São Paulo, Escuela de San Carlos de la Universidad de São Paulo, 1985.
- (5) Cleasby, J. L. "Direct Filtration of Surface Waters". Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnologías Simplificadas para Potabilización de Aguas. Cali, 1987.
- (6) Di Bernardo, L. *Métodos y técnicas de tratamiento de agua. Volumen II*. Río de Janeiro, ABES, 1993.
- (7) Cleasby, J. L. "Declining Rate Filtration". Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua. Cali, 1987.
- (8) Arboleda V., J. "Diseños de filtros de control hidráulico". Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua. Cali, 1987.
- (9) Di Bernardo, L. "Proyecto y operación de sistemas de filtración con tasa declinante". Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua. Cali, 1987.
- (10) Material electrónico entregado por el Ing. L. di Bernardo en el módulo de Tratamiento de Agua y Residuos de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1988.

-
- (11) Richter, C. "Filtros rápidos modificados". Manual del Curso sobre Tecnología de Tratamiento de Agua para Países en Desarrollo. Lima, OPS/CEPIS/CIFCA, 1977.
 - (12) Cleasby, J. L. *Avances en retrolavado*. Ames, Iowa State University, 1987.
 - (13) Letterman, R. "An Overview of Filtration". *Journal of the American Water Works Association*, diciembre, 1987.
 - (14) CEPIS. *Plantas modulares de tratamiento de agua*. Documento Técnico 8. Lima, CEPIS, 1982.
 - (15) Amirtharajah, A. "Optimum Expansion of Sand Filters during Backwash". Tesis de doctorado. Iowa, Iowa State University, 1971.
 - (16) Camp, T. T. "Theory of Water Filtration". *Journal of the Environmental Engineering Division*, Proceedings ASCE, 1964.

