

CAPÍTULO 7

INSTRUCTIVO DE PUESTA EN MARCHA Y OPERACIÓN NORMAL

1. INTRODUCCIÓN

Existen varios tipos de soluciones tecnológicas para los sistemas de tratamiento de agua mediante filtración rápida: sistemas convencionales antiguos, plantas mixtas con unidades hidráulicas y mecánicas, innumerables tipos de sistemas de patente extranjera, unos más complejos que otros y con características muy diferentes y que, por lo tanto, funcionan y se operan con criterios distintos.

Esto presupone que cada proyecto debe ser acompañado por un instructivo de operación, en el cual se indique la forma especial en que el proyectista de la planta recomienda que debe operarse su proyecto, cosa que rara vez ocurre.

El presente capítulo contiene una serie de recomendaciones e informaciones útiles para elaborar el instructivo de puesta en marcha y operación normal y especial de una planta de filtración rápida de tecnología apropiada. Este instructivo no debe confundirse con el manual de operación y mantenimiento de la planta, que recién podrá elaborarse —tomando como base el instructivo— cuando la planta se encuentre ya en operación, se disponga de los catálogos de todos los equipos y se hayan levantado las curvas de calibración respectivas, así como los planos de replanteo y la información emanada de la evaluación inicial del sistema.

2. RECOMENDACIONES PARA LA OPERACIÓN DE PUESTA EN MARCHA

Es necesario realizar una serie de operaciones antes de la puesta en marcha de la planta. Para que ello se pueda concretar rápida y exitosamente, es muy importante reunir todos los recursos necesarios y seguir un estricto orden en las actividades que se proponen a continuación:

- Inspección preliminar del sistema.
- Operaciones iniciales: calibración de los dosificadores y del medidor de caudal.

- Llenado de la planta, simultáneamente con la desinfección de las estructuras y el inicio de la dosificación.
- Inicio de la dosificación: preparación de las soluciones de coagulante, cal, polímero e hipoclorito de calcio; medición del caudal; caracterización del agua cruda; selección e implantación de las dosis óptimas de cada sustancia química requerida.
- Lavado de los filtros, simultáneamente con la medición de la expansión de la arena, la calibración del vertedero de salida de la batería y la determinación del tiempo óptimo de lavado.
- Inicio de la poscloración.
- Instalación de la tasa declinante y control de la calidad del agua producida.
- Inicio del abastecimiento al sistema de distribución. La puesta en marcha ha concluido.

A continuación, una breve explicación de cómo orientar cada uno de estos pasos dentro del instructivo de operación.

2.1 Inspección preliminar

Tiene como objetivo evaluar el estado de las obras. Debe ponerse especial atención en los siguientes aspectos:

- Presencia visual de daños.
- Funcionamiento de válvulas, compuertas y equipos.
- Existencia de reactivos, materiales y personal requerido para iniciar la operación del sistema.
- Se realizará una reunión con el personal que va a intervenir en la operación, se revisarán las instrucciones —previamente distribuidas— y durante la reunión se asignarán responsabilidades. Se recomienda que durante la puesta en marcha de la planta estén presentes el ingeniero encargado de la supervisión del sistema, el proyectista, el químico o el auxiliar de laboratorio que controlará la planta y los operadores.

2.2 Operaciones iniciales

Antes del llenado de la planta, deben efectuarse las siguientes labores:

- Limpieza general de la planta, que debe quedar libre de polvo, residuos de construcción y cualquier otra impureza que signifique peligro de contaminación.
- Calibración y revisión detallada de todos los equipos dosificadores.
- Preparación de la solución de coagulante, cal, polímero, hipoclorito de calcio y cualquier otra sustancia química requerida en cada caso específico, de acuerdo con el procedimiento descrito posteriormente.
- Medición de los parámetros básicos para control de procesos: pH, turbiedad y caudal.

2.2.1 Preparación de soluciones y dosificación de productos químicos

Se indicará detalladamente el uso de las sustancias químicas que se van a aplicar. En este capítulo trataremos sobre la preparación de los productos más comúnmente utilizados:

- Sulfato de aluminio (o alumbre, coagulante principal).
- Cal.
- Hipoclorito de calcio.

Sulfato de aluminio. Por lo general, es el principal reactivo usado en las plantas. Su dosificación produce el fenómeno denominado *coagulación*, que es la base del funcionamiento de las plantas de filtración rápida.

a) Preparación de la solución

El proyecto debe considerar dos tanques para preparar la solución de sulfato de aluminio, de tal manera que uno esté operando mientras que el otro está en preparación. Para llenar los tanques de solución, se ha considerado que el llenado se efectúe a partir de un tanque elevado (o mediante bombeo directo desde el tanque de agua filtrada). La altura de llenado en el tanque

de solución deberá marcarse con pintura de acuerdo con lo calculado en el proyecto. Esto no será necesario si el tanque tiene un tubo de rebose que coincida con la altura útil calculada.

En los casos en que la concentración del coagulante se haya calculado en un monto mayor que el óptimo, previendo diluirla antes del punto de aplicación, debe disponerse de un rotámetro para ajustar bien el caudal de agua de dilución que debe inyectarse en la tubería de conducción de la solución. Finalmente, se debe obtener una solución de 1 a 2% de sulfato de aluminio, antes de la llegada al punto de aplicación en la unidad de mezcla rápida.

Cada tanque debe llenarse hasta la altura útil marcada y luego se agregará un número entero de bolsas de sulfato de aluminio, de tal manera que se obtenga la concentración seleccionada.

La solución se obtiene encendiendo el agitador de turbina por un lapso de una a dos horas, dependiendo de la dificultad para disolver el producto disponible. Se debe determinar el tiempo en el que se diluye totalmente el sulfato para indicarlo en el manual de operación.

Mientras un tanque está en operación, el tanque alternativo debe estar preparándose, de tal manera que el paso del uno al otro sea instantáneo y la coagulación no se interrumpa.

b) Selección de la dosis óptima de coagulante

La dosis óptima que se va a aplicar al agua se debe seleccionar a partir de la turbiedad de agua cruda en una curva de correlación de turbiedad del agua versus dosis óptima de sulfato de aluminio, realizada por medio de la prueba de jarras modificada. Cuando no se dispone de dicha correlación, se debe ir levantando esta información en el laboratorio.

El procedimiento para iniciar la dosificación es el siguiente:

1. Leer la turbiedad del agua cruda (el proyecto debe incluir la adquisición de un turbidímetro).
2. Con el dato sobre la turbiedad del agua cruda, buscar la dosis en la curva de correlación de turbiedad del agua cruda versus dosis óptima

de sulfato de aluminio en mg/L. En el caso de que esta curva no se haya elaborado durante el estudio de la fuente y la determinación de los parámetros óptimos para el proyecto, se debe determinar la dosis óptima en el equipo de prueba de jarras. Véase la figura 7-1.

3. Con la dosis seleccionada, entrar al cuadro 7-1 y determinar el caudal q por aplicar en L/h. En el medidor de caudal determinar el caudal de operación de la planta. Leer la altura del agua en el medidor y comprobar el caudal en la curva de calibración (figura 7-2). Si el caudal es diferente del caudal de proyecto, instalar este último.

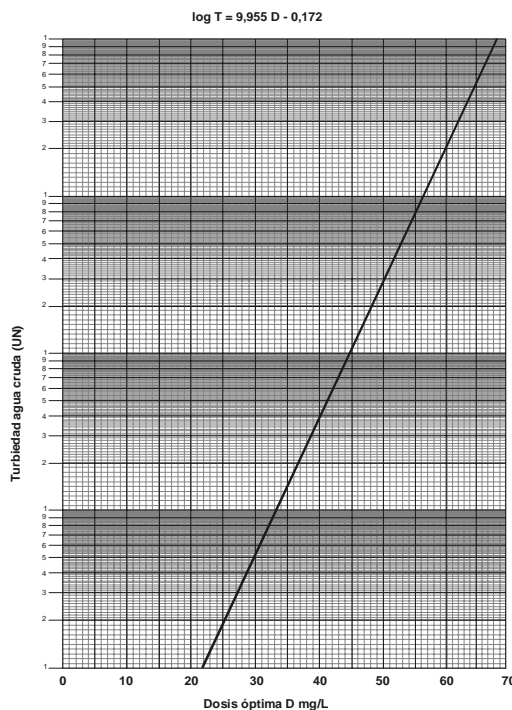


Figura 7-1. Curva de dosificación (2)

Cuadro 7-1. Dosificación de sulfato de aluminio
Concentración al 2% (20.000 mg/L)
Caudal de operación = 100 L/s

Dosis (mg/L)	Caudal de solución q (L/h)
5	90
10	180
15	270
20	360
25	450
30	540

Nota: El caudal de solución q puede calcularse para otras condiciones de concentración, caudal o dosis con la siguiente ecuación:

$$q = Q \cdot D/C$$

- Q = caudal de la planta (L/s)
 D = dosis (mg/L)
 C = concentración de la solución (mg/L)
 q = caudal de solución L/h.

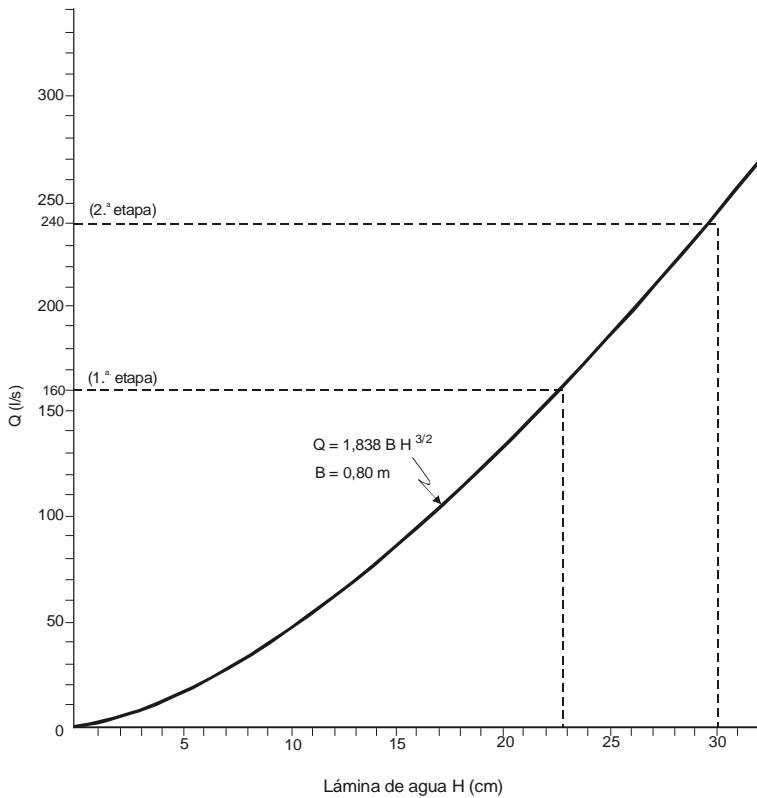


Figura 7-2. Curva de calibración del medidor de caudal (2)

4. Con el caudal q , ir a la curva de calibración del dosificador y determinar la abertura para ajustarlo, de tal modo que proporcione el caudal deseado (figura 7-3). El cuadro 7-1 debe elaborarse de acuerdo con el caudal de operación de la planta (el ejemplo corresponde a un caudal de 100 L/s).

El dosificador debe haber sido calibrado previamente, de manera que se disponga de una curva de abertura de la válvula contra el caudal producido. Normalmente, los dosificadores vienen con una escala de 0% a 100%, por lo que la curva será porcentaje de abertura versus caudal de solución (q) en L/h.

Hidróxido de calcio o cal apagada. En el proyecto se deben haber considerado dos tanques adicionales, para el caso de que sea necesario corregir el pH de coagulación o el pH del efluente de la planta, a fin de reducir la agresividad del agua tratada. Las dosis adecuadas deberán establecerse en cada caso mediante pruebas de laboratorio.

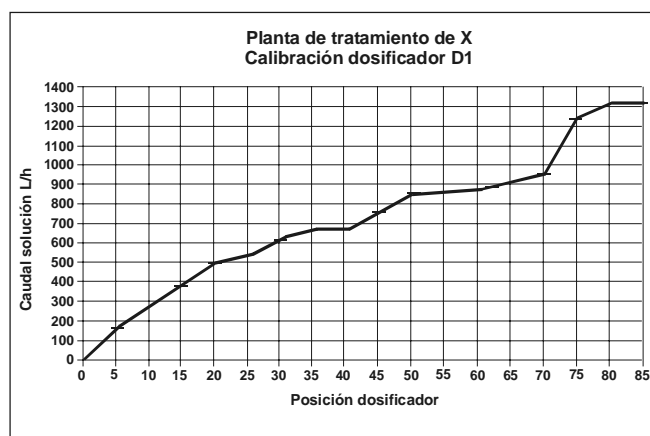


Figura 7-3. Curva de calibración del dosificador (2)

a) Preparación de la suspensión

La solubilidad de la cal en el agua es muy baja. Por esto, es poco práctico tratar de preparar una solución debido al gran volumen de tanque requerido. Es más usual preparar una suspensión con una concentración de hasta 5%. El procedimiento es el siguiente:

1. Llenar el tanque de agua hasta la altura útil calculada.
2. Agregar el número de bolsas calculadas para obtener la suspensión al 5%.
3. Mantener la cal en suspensión mientras se dosifica. Se requiere agitación mecánica para mantener la suspensión homogénea. Si no se agita, la cal se deposita en el fondo del tanque y se estaría aplicando agua sola.
4. Colocar el dosificador en la posición apropiada, de acuerdo con su curva de calibración, para obtener el caudal de solución requerido (ver el ejemplo del cuadro 7-2, elaborado para un caudal de proyecto de 100 L/s).

Cuadro 7-2. Dosificación de cal en suspensión
Concentración al 5% (50.000 mg/L)
(Caudal de operación = 100 L/s)

Dosis (mg/L)	Caudal de solución q (L/h)
3,0	21,6
5,0	36,0
7,0	50,4
9,0	64,8
11,0	79,2
13,0	93,6

b) Operación

La aplicación de cal provoca, en la práctica, gran cantidad de dificultades, por la obstrucción de tuberías y dosificadores. Asimismo, las suspensiones de cal no pueden dejarse mucho tiempo en contacto con el aire, ya que

reaccionan con el dióxido de carbono formando carbonato de calcio, que precipita.

Por lo anterior, se requiere un cuidadoso mantenimiento para conservar el sistema de dosificación en buenas condiciones.

Dosificación de hipoclorito de calcio. El hipoclorito de calcio es bastante más costoso y menos eficiente que el cloro gaseoso, ya que se descompone fácilmente y pierde su capacidad desinfectante. Su uso se justifica cuando no es factible disponer de cloro gaseoso por falta de medios de transporte adecuados. Por lo general, se lo emplea como alternativa en casos de emergencia.

a) Preparación de la solución

1. Llenar el tanque con agua hasta la altura útil indicada en el proyecto y señalar este nivel con pintura.
2. Agregar los kilogramos de hipoclorito de calcio calculados. Pesar previamente el reactivo con una balanza. Tapar bien el recipiente de hipoclorito de calcio para que el producto remanente no se deteriore y guardarlo en un ambiente fresco y de preferencia oscuro.
3. Agitar la solución con una pieza de madera en forma de remo o mediante agitador mecánico hasta que el polvo se disuelva por completo. Operar con el tanque alternativo mientras se prepara la solución.

b) Operación

La solución desinfectante se aplica directamente en la cámara de agua tratada de la planta, aprovechando la turbulencia producida por el vertedero de salida.

También es posible hacer una precloración, que se utiliza para controlar el crecimiento de algas en las unidades de tratamiento y para reducir contaminaciones microbiológicas graves. Normalmente, la precloración no se hace en forma continua sino de acuerdo con las condiciones de la fuente.

La dosis usual de cloro en la cámara de salida de la planta es de 1,0 a 1,5 mg/L. Debe tomarse en cuenta que el hipoclorito de calcio (HTH) tiene un porcentaje de cloro utilizable de 60 a 70%. Por lo tanto:

$$\text{Dosis de HTH usual} = \frac{1,5}{0,60} = 2,5 \text{ mg HTH/L}$$

El cuadro 7-3 contiene los caudales de solución (q) que se deben aplicar por medio del dosificador de orificio de carga constante. Al igual que en los casos anteriores, el dosificador debe haber sido calibrado.

Cuadro 7-3. Dosificación de hipoclorito de calcio al 1% de concentración (10.000 mg/L) (Caudal de operación = 100 L/s)

Dosis (mg/L)	Caudal de solución q (L/h)
0,50	18,00
1,00	36,00
1,50	54,00
2,00	72,00
2,50	90,00
3,00	108,00
3,50	126,00

2.3 Llenado de la planta

Al iniciar el llenado de la planta y para evitar empujes indeseables contra las pantallas de los floculadores cuando estos se encuentran vacíos, es recomendable llenarla con un caudal inferior al caudal de diseño, digamos en 50%. Sería ideal poder llenar la unidad simultáneamente por ambos extremos, para lo cual sería necesario disponer de una electrobomba. La situación más crítica sucede cuando las placas son de asbesto-cemento. En este caso, debe advertirse bien a los operadores sobre la forma correcta de llenado de la unidad y el riesgo existente de romper todas las pantallas si no se siguen las instrucciones fielmente.

2.3.1 Procedimiento

Para iniciar esta operación, deben numerarse consecutivamente todos los filtros de la batería. Guardar un orden estricto es muy importante en la operación de este tipo de filtros. Deben tomarse en cuenta los siguientes pasos:

- Las válvulas de desagüe de los floculadores, sedimentadores y desagües de canales intermedios, si los hubiere, deben estar bien cerradas.
- En los filtros, las válvulas deben estar de la siguiente manera:
 - a) Todos los filtros, menos el primero, deben tener:
 - la válvula de admisión abierta;
 - la válvula de desagüe cerrada.
 - b) El primer filtro o filtro N.º 1 debe tener:
 - válvula de admisión cerrada;
 - válvula de desagüe abierta.

Con la operación anterior, todos los filtros menos uno serán llenados por la parte superior y el primero por la parte inferior. Al llenarse la caja de los filtros, automáticamente el agua que se está filtrando tenderá a salir por el desagüe del primer filtro. Luego se procederá en forma similar con el segundo filtro y así sucesivamente, se efectuará el lavado consecutivo de todas las unidades. Al finalizar este proceso, todas las unidades estarán limpias y se habrá expulsado el aire retenido en los filtros que inicialmente se habían llenado por la parte superior.

Simultáneamente al proceso de llenado, debe aplicarse una dosis inicial alta de hipoclorito de calcio para desinfectar la planta (~ 7 mg/L) por espacio de dos horas (véase la sección “Dosificación” del capítulo 1). De la misma manera, debe aplicarse la dosis estimada de coagulante.

Es muy importante tener en cuenta que el agua inicialmente producida no debe suministrarse a la población hasta que su calidad haya sido revisada. El volumen inicial debe ser evacuado por los canales de lavado de filtros.

Normalmente se requiere suministrar el agua a la población en el menor tiempo posible. Cuando no se pueda esperar resultados de los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos para iniciar el abastecimiento, las siguientes condiciones se consideran suficientes para autorizar el uso del agua tratada:

- turbiedad no mayor de 5 unidades nefelométricas de turbiedad (UNT);
- color aparente no mayor de 15 unidades de color (UC);
- pH entre 7,0 y 8,5;
- cloro residual a la salida de la planta igual o mayor de un mg/L.

2.4 Lavado de filtros

Al entrar en operación la planta, el medio filtrante no se encuentra en condiciones adecuadas para el tratamiento y requiere una buena limpieza para eliminar el polvo y las impurezas presentes. Además, el lecho filtrante es activado por el coagulante (sulfato de aluminio) y demora algunos días para alcanzar su nivel óptimo.

2.4.1 Procedimiento para el lavado

Para poner en condiciones óptimas los lechos filtrantes, se recomiendan las siguientes acciones:

- Lavados sucesivos (tres o cuatro lavados por filtro) para eliminar impurezas. El lavado se efectúa de la siguiente manera:
 1. Se cierra la válvula de admisión al filtro.
 2. Se abre la válvula de salida de agua de lavado.
 3. Se espera un lapso de 7 a 8 minutos aproximadamente.
 4. Se cierra la válvula de salida del agua de lavado.
 5. Se abre *lentamente* la válvula de admisión (en un lapso de 2 a 3 minutos aproximadamente).
- Durante esta operación se debe calibrar el vertedero general de la batería, dándole la altura necesaria para producir una expansión de 25 a 30%. También se debe determinar experimentalmente el tiempo de lavado (véase *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual III: Evaluación de plantas convencionales y de tecnología apropiada*).
- Una vez que todos los filtros están limpios y se ha eliminado el aire retenido por el lecho filtrante, llenándolos por la parte inferior, se ha

calibrado el vertedero de salida, se ha determinado el tiempo de lavado específico y se ha comprobado que la calidad del agua tratada se encuentra dentro de límites aceptables, todas las unidades se ponen en posición de operación (válvulas de entrada abiertas y válvulas de descarga de agua de lavado cerradas).

2.5 Instalación de la tasa declinante

La tasa declinante es una condición de operación que se debe establecer en esta etapa, cuando se está iniciando la operación normal de la planta. Cuando no se instala la tasa declinante y los filtros han sido proyectados para operar de este modo, las carreras de operación que se obtienen son muy cortas, porque la carga hidráulica disponible para operar es muy pequeña.

2.5.1 Procedimiento

Esta operación se realiza en un lapso de 24 horas. Si la batería consta de n filtros, se procede a lavarlos de manera sucesiva (es decir, primero el filtro N.º 1, después el filtro N.º 2, luego el filtro N.º 3, etcétera), cada $24/n$ horas. Esto es, suponiendo que tenemos 4 filtros y empezamos esta operación a las 6.00 de la mañana lavando el filtro 1, a las 12.00 se lavará el filtro 2, a las 18.00 el filtro 3 y, finalmente, a las 24.00, el filtro 4. A partir de este momento, la tasa declinante está instalada y la batería de filtros iniciará la etapa de operación normal.

Después de esto, el filtro 1 solo se volverá a lavar cuando el nivel del agua en el canal de distribución a la batería llegue al máximo y el agua empiece a rebosar por el vertedero de alivio. Para evitar errores en la operación de los filtros, se recomienda emplear el formulario de control de filtros indicado en el cuadro 7-4.

El empleo de este formulario facilita al operador la rápida determinación de cuál es el filtro que le toca lavar.

**Cuadro 7-4. Formulario de control de la operación de los filtros
(ejemplo de batería de cuatro filtros)**

Fecha	Hora	Filtro	Carrera (horas)	Observaciones
01/03/04	06.00	1	0	Inicio de la instalación de la tasa declinante. Se concluyó la instalación.
	12.00	2	0	
	18.00	3	0	
	24.00	4	0	
03/03/04	12.00	1	54	La batería alcanzó el nivel máximo de operación y empezó a caer agua por el aliviadero.
	16.00	2	52	
	23.00	3	53	
05/03/04	04.00	4	52	
		1		

Nota: Los filtros de tasa declinante correctamente proyectados y operados proporcionan carreras de filtración bastante largas. En los lugares cálidos o tropicales no deben admitirse carreras de más de 72 horas, para evitar que el sedimento retenido en el lecho filtrante adquiera condiciones sépticas, porque entonces los filtros, en lugar de remover la contaminación del agua, van a incrementarla.

2.6 Medición de caudal

En la entrada a la planta se ha proyectado una rampa de alta pendiente con la doble función de servir de unidad de aforo y de mezcla rápida de reactivos.

La medición precisa del caudal de operación de la planta reviste gran importancia, ya que sobre la base del caudal se define todo el proceso de dosificación tratado previamente.

El caudal del vertedero rectangular, situado en la coronación de la rampa, se calcula teóricamente con la fórmula de Francis:

$$Q = 1,838 B \times H^{3/2}$$

Donde:

$B = 0,70$ m (ancho de la rampa y del vertedero).

H = lámina vertiente medida en la cresta de la rampa (a una distancia no menor de 1,50 metros aguas arriba de la cresta).

Para obtener el caudal en litros por segundo:

$$Q = 1.470 H^{3/2}$$

En la práctica, normalmente se miden variaciones apreciables de la anterior ecuación. Por esto, es altamente recomendable la calibración de la unidad de medición. Dos técnicas se encuentran disponibles:

- Calibración por trazadores.
- Calibración por pitometría.

Esta operación usualmente se practica durante el proceso de evaluación preliminar de la planta. Para medir la lámina de agua H , se ha dispuesto la instalación de un flotador que señala una regla graduada en centímetros.

2.7 Mezcla rápida

Se proyecta la rampa para que al pie de ella se genere un resalto hidráulico. En el caso de la canaleta Parshall, se selecciona el ancho de garganta apropiado para que se produzca el gradiente de velocidad deseado. El resalto hidráulico se produce en la garganta de la canaleta. Este resalto se utiliza para generar una mezcla homogénea de los reactivos químicos con el agua, operación muy importante para alcanzar un tratamiento eficiente.

Debido a que el mezclador fue diseñado para operar dentro de un rango de caudales, no operará satisfactoriamente con caudales inferiores al caudal de proyecto.

Las soluciones de reactivos se deben aplicar en el punto de mezcla (donde se ubica el resalto), mediante tuberías perforadas de PVC conectadas a los dosificadores.

Si al operar la planta con el caudal de proyecto, el resalto no se produce en el lugar indicado en los planos, la aplicación del coagulante deberá desplazarse al lugar donde se está generando.

3 OPERACIÓN NORMAL

Una vez concluidas las operaciones de puesta en marcha, la planta entra en la etapa denominada *operación normal*.

La operación normal incluye una serie de actividades que se indican a continuación:

- a) Control de los procesos: medición de caudal, medición de parámetros básicos como turbiedad y/o color, pH, alcalinidad y cloro residual. Este control de los procesos debe efectuarse por lo menos cada cuatro horas. En los anexos B y C se presentan ejemplos de formularios de registro diario y resumen mensual de la información sobre el control de los procesos.
- b) Preparación de soluciones:
 - ajuste de dosificación;
 - lavado de filtros;
 - limpieza de la casa de operaciones y mantenimiento de las áreas verdes adyacentes;
 - control de calidad.

En general, la operación normal comprende todas las actividades destinadas a que la planta produzca el caudal para el cual fue diseñada con la calidad estipulada por las normas correspondientes. Esto excluye cualquier actividad que deba desarrollarse en caso de reducción parcial o total del caudal de diseño.

3.1 Operación normal del sistema de filtración

Los filtros de la planta son del tipo denominado *de tasa declinante*, lo cual significa que la velocidad de filtración declina desde un valor alto cuando el filtro está limpio hasta un valor bajo cuando se encuentra colmatado, que es cuando requiere ser puesto fuera de operación para lavarlo. Durante este lapso, el nivel del agua en los filtros varía desde un nivel inicial hasta el máximo de operación, limitado mediante un vertedero de alivio en el canal de distribución.

Los filtros deben lavarse en secuencia numérica para evitar confusiones. Es necesario anotar en la bitácora de la planta la hora y fecha del lavado. Des-

pués de establecida la tasa declinante (véase la sección 2.5 de este mismo capítulo), se seguirán lavando en orden numérico cada vez que se alcance el nivel máximo de operación en el canal de distribución de agua sedimentada. Cada lavado toma un tiempo aproximado de 8 a 10 minutos (véase el cuadro 7-4).

Agitación adicional (lavado superficial). Para mantener el medio filtrante en buenas condiciones, es recomendable aplicarle, junto con el lavado normal, un proceso de agitación adicional que evita la formación de bolas de barro en el lecho. El proceso puede ser ejecutado manualmente por el operador de la siguiente manera:

1. El filtro se pone a lavar normalmente.
2. Con una escoba larga o rastrillo de jardín, de extremo a extremo del filtro, se rasga la superficie del lecho filtrante con un movimiento de vaivén durante tres o cuatro minutos.
3. Se concluye el lavado normalmente.

3.2 Filtración directa

Cuando el agua presenta buenas condiciones (véase el cuadro 7-5), es posible tratarla solo mediante coagulación y filtración.

El procedimiento por aplicar es el siguiente:

1. Determinar la dosis óptima de coagulante para filtración directa.
2. Ajustar la dosis de sulfato de aluminio obtenida.
3. Abrir la compuerta de paso directo (*by-pass*) al canal de distribución a los filtros cerrando el paso a los floculadores.
4. Aplicar la solución de coagulante en el difusor instalado en la entrada del canal de distribución a los filtros.

Una vez estabilizado el proceso, determinar la concentración de aluminio residual en el agua filtrada. Si esta concentración fuera mayor de 0,10 mg/L, disminuir gradualmente la dosis de sulfato de aluminio hasta encontrar la menor dosis con la cual se consigue mantener la eficiencia del proceso y bajar la concentración de aluminio residual en el efluente.

La filtración directa permite mejorar la calidad del efluente, lograr un gran ahorro de coagulantes debido a la baja dosis utilizada y facilitar las operaciones de mantenimiento en el resto de la planta. Debido al estancamiento del agua en floculadores y sedimentadores, las algas proliferan en estas unidades, lo que da mal aspecto a la planta, por lo que se recomienda renovarla frecuentemente o aplicar una dosis de hipoclorito de calcio para controlar las algas. No se deben dejar los tabiques de madera en seco porque se deterioran. Las lonas de los decantadores pueden retirarse durante la operación de la planta con filtración directa.

Cuadro 7-5. Condiciones de calidad del agua para establecer filtración directa

Parámetros		Valores límite recomendados
Turbiedad		90% del tiempo ≤ 30 UNT 80% del tiempo ≤ 20 UNT Preferentemente < 10 UNT 100% preferentemente ≤ 50 UNT
Color		90% preferentemente ≤ 40 UC 80% preferentemente ≤ 20 UC
Concentración de algas (mg/m^3)		80% ≤ 100 100% ≤ 500
NMP coliformes	Termotolerantes/100 mL	MGM ^a $\leq 100/100$ mL de muestra
	Totales/100 mL	MGM $\leq 500/100$ mL de muestra ^b

^a MGM = Media geométrica mensual.

^b Si no se supera el límite de concentración de coliformes fecales o termotolerantes/100 mL, este valor puede incrementarse.

4. OPERACIÓN ESPECIAL

Cuando por alguna causa, la planta de tratamiento debe suspender la producción, parcial o totalmente, se dice que la operación es *especial*. Esto significa que durante determinado lapso (corto o largo) la producción de agua potable se verá disminuida. Es importante efectuar una adecuada programación de las labores de operación especial.

Las principales actividades que se clasifican dentro del concepto de operación especial son las siguientes:

- a) Limpieza de estructuras mayores: floculadores y sedimentadores.
- b) Operaciones de mantenimiento correctivo en obras civiles y/o equipos:
 - sustitución de válvulas;
 - reparación de fugas;
 - reparación o sustitución de equipos dosificadores y otros equipos;
 - daños anormales como terremotos o huracanes (situación de desastre).
- c) Falta de reactivos químicos.
- d) Cambios extremadamente bruscos en la calidad del agua que obliguen a detener el funcionamiento de la planta.
- e) Otros aspectos relevantes: sequías prolongadas, huelgas, terrorismo, etcétera.

Puede desprenderse de lo anterior que las operaciones especiales por lo general son indeseables, por lo que es necesario reducirlas al mínimo. Con este fin se recomienda lo siguiente:

- Implantar programas de mantenimiento preventivo.
- Ejecutar una adecuada vigilancia del sistema, tanto física como sanitaria.

5. CONTROL DE CALIDAD

El control de la calidad del agua producida se efectúa mediante análisis fisicoquímicos y bacteriológicos que se realizan a partir de muestreos, tanto a la salida de la planta como en diversos puntos de la red de distribución. Véase el anexo A para muestreos en la planta.

Para efectuar el control de calidad, es necesario:

- a) Contar con normas oficiales de calidad de agua (habitualmente, las de la OMS si no se dispone de normas locales).

- b) Contar con un laboratorio debidamente equipado con el material y personal adecuados para efectuar los análisis requeridos por las normas.

En forma resumida, el control de calidad comprende las siguientes operaciones:

- Tomar al menos una muestra por cada 5.000 habitantes con una frecuencia semanal, para realizar los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos generales.
- Efectuar, al menos una vez al año, muestreos para determinar la presencia de sustancias tóxicas (metales pesados, pesticidas, etcétera).
- Realizar la interpretación de los resultados, de manera que, en el caso de que se sobrepasen las normas, las autoridades competentes sean informadas de manera conveniente y en el menor tiempo posible, con el fin de que tomen las acciones correctivas necesarias.

6. OPERACIÓN ESTACIONAL

El módulo está preparado para operar con filtración rápida completa y filtración directa, cuando las variaciones estacionales de la calidad del agua así lo requieran.

El proceso más sensible a la variación de caudales es la floculación. Los floculadores hidráulicos no admiten sobrecargas y dejan de ser eficientes con caudales inferiores al caudal de diseño.

7. ASPECTOS VARIOS

Las plantas de tratamiento son un aspecto muy importante en el abastecimiento de agua y deben ser ejemplo de limpieza y mantenimiento. Para lograr esto, es necesario:

- Contar con personal adecuado, tanto en número como en capacitación. Usualmente, el personal mínimo por turno de operación y por módulo, consta de:

- un operador capacitado;
- un ayudante.
- Brindar adecuado mantenimiento a los diferentes ambientes del sistema (incluir todo el conjunto):
 - planta de tratamiento;
 - casa de operaciones;
 - las demás obras complementarias.

El mantenimiento debe ser especialmente cuidadoso con las partes metálicas sujetas a corrosión, que requieren protecciones periódicas. Es el caso de válvulas, compuertas y dosificadores.

- Contar con un adecuado suministro de repuestos y materiales.

8. LIMITACIONES DEL SISTEMA

Las plantas de tratamiento tienen límites en cuanto a la calidad del agua que pueden tratar. Algunas veces, cuando ocurre un cambio muy brusco de calidad del agua, si no se dispone de estanque o presedimentador, conviene suspender el tratamiento mientras se diluye la contaminación.

Algunos de los principales compuestos que no podrían ser tratados por la planta son los siguientes:

- a) Valores de color orgánico y turbiedad elevados que superen los límites siguientes:
 - turbiedad > 1.000 UT;
 - color > 600 UC.

Estos límites tendrían que ser comprobados en la práctica, para añadir procesos como la presedimentación o la aplicación de sustancias químicas adicionales (polímeros).

- b) Contenido de cloruros (salinidad) superior a 250 mg/L. Algunas veces se acepta como límite superior 400 mg/L.

- c) Pesticidas y agroquímicos en general. Su presencia obligaría a hacer un estudio especial de la calidad del agua.
- d) Presencia de hidrocarburos.
- e) Sustancias productoras de olor y sabor (fenoles).
- f) Sustancias tóxicas extremadamente peligrosas. Por ejemplo:
 - arsénico;
 - cadmio;
 - mercurio;
 - cianuro;
 - plomo.
- g) Variaciones del caudal de operación

Con caudales menores que el caudal de proyecto, el lecho filtrante no se expandirá adecuadamente, la arena no quedará bien lavada y gradualmente se irá apelmazando y decayendo la eficiencia del filtro. Con caudales mayores, la expansión será demasiado alta y paulatinamente la arena se iría perdiendo.

Nota: en los casos b) a f), se requerirá un estudio de laboratorio específico para determinar los cambios necesarios en la dosificación y los parámetros de los procesos que optimizarían la remoción de estos contaminantes.

REFERENCIAS

- (1) Programa HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (1992). *Manual VI. Operación*. Lima, CEPIS.
- (2) Rodríguez, V. (1987). Planta de tratamiento para Tarija. Recomendaciones para la operación del sistema. Tarija, documento no publicado.
- (3) Canepa de Vargas, Lidia (1978-2004). Estudios y proyectos de los archivos personales. Lima, CEPIS.

Anexo A

Toma de muestras en planta

Se recomienda tomar muestras para análisis fisicoquímicos y bacteriológicos en los siguientes puntos de la planta: agua cruda, agua sedimentada, agua filtrada y agua desinfectada.

Para un muestreo correcto, se requiere conocer los tiempos de retención en la planta, los que deberán determinarse mediante la aplicación de trazadores.

Sitio de muestreo	Tiempo de muestreo (min) ^a
Cámara de entrada	Tiempo cero
Salida de sedimentadores	por determinar
Canal de intercomunicación	por determinar
Después de cloración y tiempo de contacto	por determinar

^a Estos tiempos se determinarán durante la evaluación inicial de la planta.

Anexo B

Consumo anual de reactivos

El consumo de reactivos (W) se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = Q \times D \times 86,4 \text{ kg/d}$$

Q = caudal promedio de la planta (m^3/s)

D = dosis promedio anual de reactivo (mg/L)

Anexo C
Anotaciones diarias de la planta de tratamiento (continuación)

Filtro 3	En servicio (Sí/No)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Turbiedad (UNT)	20,6	23,7	12,1	11	10,97	10,87	10,99	10,97	10,87	10,87
	Retrolavado (máx UNT)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Filtro 4	En servicio (Sí/No)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Turbiedad (UNT)	24,5	22,8	10,2	11,2	10,98	10,99	10,99	10,98	10,99	10,99
	Retrolavado (máx UNT)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Filtro 5	En servicio (Sí/No)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Turbiedad (UNT)	19,7	22,3	12,1	10,2	10	22,8	22,8	10	22,8	22,8
	Retrolavado (máx UNT)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Filtro 6	En servicio (Sí/No)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	Turbiedad (UNT)	21,5	20,9	11	9,03	9	9,2	9,2	9	9,2	9,2
	Retrolavado (máx UNT)	No	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Agua tratada											
	Temperatura (°C)	21	20	19	20	20	19	19	20	20	19
	pH	6,1	6,19	6,09	6,02	6	7,07	7,07	6	7,07	7,07
	Turbiedad (UNT)	2,85	3,24	1,1	1,07	1,7	1,1	1,1	1,7	1,1	1,1
	Cloro residual (mg/L)	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm	1,0 ppm
	Sitio de muestreo	Cisterna									

Notas:

Anexo D
Formulario resumen mensual de control de procesos en la planta X (3)
Registro de operación del mes de enero de 2000

Fecha	Agua cruda						Agua tratada						
	Turb. UNT	Color UC	pH	Conduc.	Alcalin. mg/L	Dureza mg/L	Turb. UNT	Color UC	pH	Conduc.	Alcalin. mg/L	Dureza mg/L	Cl res. mg/L
02/01	40,0	125,0	6,5	97,0	38,3	70	2,0	7,5	6,7	132,5	31,3	60,0	2,5
03/01	38,0	112,5	6,6	87,5	36,0	60	2,2	7,5	6,7	123,0	24,2	80,0	2,5
04/01	38,5	112,5	6,7	92,0	32,0	60	2,9	10,0	6,4	130,0	39,9	90,0	2,5
05/01	38,0	107,5	6,4	95,5	33,6	110	1,8	5,0	6,8	140,0	33,3	150,0	2,5
06/01	35,0	116,5	6,5	106,0	36,0	70	1,3	5,0	6,5	137,5	23,5	140,0	2,5
07/01	35,5	116,5	6,4	108,0	43,0	80	1,9	7,5	7,0	152,5	40,6	110,0	2,9
08/01	34,0	112,5	6,4	98,5	46,9	120	2,0	6,3	6,5	123,0	35,2	110,0	1,7
09/01	32,0	97,5	6,2	100,0	50,0	80	2,1	7,5	6,1	130,0	36,0	70,0	2,5
10/01	33,0	105,0	6,5	104,0	43,8	80	8,5	40,0	6,4	120,0	32,0	90,0	3,0
11/01	32,0	97,5	6,9	113,0	46,2	60	0,9	2,5	6,8	160,0	29,7	70,0	2,9
12/01	30,5	88,8	6,9	115,0	43,0	70	1,4	6,3	6,8	157,5	33,6	90,0	3,3
13/01	29,0	82,5	7,0	107,0	46,1	60	2,5	8,8	6,7	130,0	28,1	90,0	2,9
14/01	29,0	81,3	7,0	103,5	50,1	70	2,0	10,0	6,8	124,0	35,2	80,0	3,3
15/01	26,5	75,0	7,1	127,5	49,2	70	0,8	5,0	7,0	152,5	33,6	80,0	3,0
17/01	27,5	85,0	7,1	113,5	43,8	100	0,7	5,0	6,8	142,5	29,7	80,0	2,8

Anexo D
Formulario resumen mensual de control de procesos en la planta X (3)
Registro de operación del mes de enero de 2000 (continuación)

Fecha	Agua cruda						Agua tratada						
	Turb. UNT	Color UC	pH	Conduc.	Alcalin. mg/L	Dureza mg/L	Turb. UNT	Color UC	pH	Conduc.	Alcalin. mg/L	Dureza mg/L	Cl res. mg/L
18/01	27,0	93,8	7,2	110,0	45,3	100	1,3	5,0	6,7	130,0	31,3	90,0	2,6
19/01	27,5	90,0	7,1	100,5	53,9	110	1,8	5,0	7,0	125,0	35,2	100,0	2,5
20/01	27,0	90,0	7,1	112,0	57,1	80	1,8	8,8	6,7	135,0	37,5	150,0	2,8
21/01	27,5	90,0	7,1	99,0	53,9	60	1,6	7,5	7,3	139,0	44,5	120,0	2,5
22/01	26,5	90,0	7,0	101,0	44,6	120	1,8	5,0	7,1	138,0	39,1	170,0	2,5
24/01	27,5	90,0	7,1	105,5	53,9	60	3,0	10,0	7,1	131,5	34,4	70,0	2,5
25/01	29,0	93,8	7,0	106,0	52,4	53	0,9	3,8	6,9	142,5	39,9	77,5	2,5
26/01	29,5	90,0	7,0	118,5	53,2	59	1,3	5,0	7,1	145,5	42,1	79,6	2,5
27/01	27,5	90,0	7,0	123,0	52,4	61	2,6	8,8	7,4	142,0	32,8	91,8	3,0
28/01	28,0	90,0	7,0	113,5	46,9	116	0,7	3,8	7,3	155,0	45,3	102,5	2,5
29/01	28,5	90,0	7,0	120,0	48,5	102	0,8	6,3	7,5	151,5	37,5	129,2	2,5
31/01	29,0	90,0	7,0	120,0	54,6	98	0,6	7,5	7,2	152,5	45,3	102,5	2,7