

## CAPÍTULO VII - 15. CONTROL DE PLANTAS DE POTABILIZACIÓN

### ÍNDICE

---

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 1  |
| 2. ASPECTOS GENERALES DE LA OPERACIÓN DE PLANTAS DE AGUA .....        | 3  |
| 3. REQUERIMIENTOS DE PERSONAL .....                                   | 5  |
| 3.1. PLANTAS PARA POBLACIONES HASTA 10.000 HABITANTES .....           | 5  |
| 3.2. PLANTAS PARA POBLACIONES ENTRE 10.000 Y 50.000 HABITANTES .....  | 5  |
| 3.3. PLANTAS PARA POBLACIONES ENTRE 50.000 Y 100.000 HABITANTES ..... | 6  |
| 4. CAPACITACIÓN DEL PERSONAL .....                                    | 7  |
| 4.1. NIVEL DE CAPACITACIÓN .....                                      | 7  |
| 5. PUESTA EN MARCHA .....   | 8  |
| 6. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS .....                        | 10 |
| 6.1. OBJETIVOS DEL CONTROL DE PROCESOS.....                           | 10 |
| 6.2. CONTROL DE PROCESOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.....   | 11 |
| 6.3. FUNDAMENTOS DEL CONTROL AUTOMÁTICO .....                         | 12 |
| 6.3.1. <i>Principios de Funcionamiento</i> .....                      | 13 |
| 6.3.2. <i>Elementos de los Sistemas de Control</i> .....              | 13 |
| 6.4. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL.....     | 14 |
| 6.4.1. <i>Detectores o Sensores</i> .....                             | 14 |
| 6.4.2. <i>Sensores de Presión</i> .....                               | 14 |
| 6.4.3. <i>Sensores de Caudal</i> .....                                | 15 |
| 6.4.4. <i>Elementos Primarios de Presión Diferencial</i> .....        | 16 |
| 6.4.5. <i>Placas de Orificio</i> .....                                | 17 |
| 6.4.6. <i>Tubo de Pitot</i> .....                                     | 18 |
| 6.4.7. <i>Criterios de Selección del Elemento Primario</i> .....      | 19 |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.4.8. Medidores de Régimen Crítico .....                                      | 20        |
| 6.4.9. Sensores de Nivel .....   | 20        |
| <b>7. CONTROL DE OPERACIÓN DE PROCESOS UNITARIOS .....</b>                     | <b>21</b> |
| <b>7.1. PROCESO DE COAGULACIÓN .....</b>                                       | <b>21</b> |
| 7.1.1. Simulación del Proceso Mediante el Ensayo de Jarras .....               | 21        |
| 7.1.2. Columna Piloto de Filtración .....                                      | 26        |
| 7.1.3. Sistemas de Medida de las Cargas de las Partículas .....                | 27        |
| <b>7.2. PROCESO DE FLOCULACIÓN .....</b>                                       | <b>28</b> |
| 7.2.1. Determinación de Gradientes y Tiempos Optimos Para la Floculación ..... | 28        |
| <b>7.3. PROCESO DE SEDIMENTACIÓN .....</b>                                     | <b>30</b> |
| <b>7.4. PROCESO DE FILTRACIÓN .....</b>  | <b>31</b> |
| 7.4.1. Filtración Rápida .....   | 31        |
| 7.4.1.1. Control de la Calidad del Agua Filtrada .....                         | 32        |
| 7.4.1.2. Manto Filtrante .....   | 35        |
| 7.4.1.3. Lavado de los Filtros .....   | 37        |
| 7.4.2. Filtración Lenta .....  | 39        |
| <b>7.5. DESINFECCIÓN .....</b>   | <b>41</b> |
| <b>7.6. TRATAMIENTOS ESPECIALES .....</b>                                      | <b>42</b> |
| 7.6.1. Flotación .....   | 42        |
| 7.6.2. Intercambio Iónico .....  | 43        |
| 7.6.3. Adsorción .....   | 43        |
| 7.6.3.1. Carbón Activado en Polvo .....  | 43        |
| 7.6.3.2. Carbón Activado Granular .....  | 43        |
| <b>8. SISTEMAS DE INFORMACION Y REGISTROS .....</b>                            | <b>44</b> |
| <b>9. SEGURIDAD EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO .....</b>                        | <b>46</b> |
| <b>9.1. PLAN DE CONTINGENCIAS .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>9.2. PROGRAMA DE SEGURIDAD EN LAS PLANTAS .....</b>                         | <b>47</b> |
| <b>9.3. POLÍTICA ESCRITA DE HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO .....</b>        | <b>47</b> |
| <b>9.4. COMITÉ DE HIGIENE Y SEGURIDAD .....</b>                                | <b>48</b> |
| <b>9.5. ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL .....</b>                                   | <b>48</b> |
| <b>9.6. ASISTENCIA MÉDICA Y PRIMEROS AUXILIOS .....</b>                        | <b>49</b> |
| <b>9.7. MANUAL DE HIGIENE Y SEGURIDAD LABORAL .....</b>                        | <b>49</b> |
| <b>9.8. RIESGOS Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN .....</b>                              | <b>50</b> |
| <b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>11. ANEXO .....</b>   | <b>52</b> |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

### TABLAS

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabla 1.</b> Planilla para registrar los resultados de un ensayo de jarras .....                                  | <b>23</b> |
| <b>Tabla 2.</b> Determinación de la dosis óptima de coagulante .....   | <b>24</b> |
| <b>Tabla 3.</b> Determinación del pH óptimo.....   | <b>25</b> |
| <b>Tabla 4.</b> Determinación de la dosis de sulfato de aluminio a pH óptimo .....                                   | <b>26</b> |
| <b>Tabla 5.</b> Resultados obtenidos en el filtro experimental .....   | <b>34</b> |
| <b>Tabla 6.</b> Resultados de un análisis granulométrico .....   | <b>36</b> |
| <b>Tabla 7.</b> Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de lodos.....                              | <b>38</b> |
| <b>Tabla 8.</b> Calendario de actividades del operador en un sistema de tratamiento con filtros lentos de arena..... | <b>40</b> |
| <b>Tabla 9.</b> Operaciones para el lavado de arena.....   | <b>41</b> |

## FIGURAS

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 1.</b> Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio sin modificar el pH.....           | <b>25</b> |
| <b>Figura 2.</b> Determinación del pH óptimo.....   | <b>25</b> |
| <b>Figura 3.</b> Determinación de la dosis de sulfato de aluminio a pH óptimo.....                          | <b>26</b> |
| <b>Figura 4.</b> Resultados del ensayo para determinación de gradientes y tiempos de floculación .....      | <b>29</b> |
| <b>Figura 5.</b> Relación entre turbiedad de agua cruda y agua decantada en distintas plantas del Brasil .. | <b>30</b> |
| <b>Figura 6.</b> Curva granulométrica.....  | <b>37</b> |
| <b>Figura 7.</b> Dispositivo para medir la expansión del lecho filtrante durante el lavado .....            | <b>38</b> |

## **1. INTRODUCCIÓN**

El tratamiento de agua puede consistir en una o varias operaciones las cuales pueden ser en algunos casos muy sencillas y en otros muy complejas. De igual forma el volumen de agua tratado puede ser pequeño o muy grande.

Sin embargo, independientemente de la magnitud y complejidad del sistema de tratamiento, el factor común a tener en cuenta es la intervención humana en la realización de estas operaciones. A pesar de que la automatización se emplea cada vez más en las tareas de rutina, en ningún caso pueden delegarse en la automatización la seguridad y la calidad del agua producida.

El control de las plantas de tratamiento de agua incluye tanto la operación y gerenciamiento de las instalaciones como de su personal. El conocimiento de los diferentes factores y elementos que constituyen la planta contribuyen a su control:

- Competencia y grado de entrenamiento del personal.
- Conocimiento de las normas de calidad de agua.
- Mantenimiento y limpieza de las plantas.
- Controles analíticos de laboratorio.
- Mediciones de los caudales de agua.
- Control de la aplicación de productos químicos.
- Operación y mantenimiento de dosificadores de productos y de otros equipos de la planta.
- Almacenamiento adecuado y calidad de los productos químicos utilizados.
- Registros eficientes.
- Prácticas de operación seguras.

En esta sección se proponen los elementos esenciales a considerar en la operación de la planta. Es importante tener en cuenta que aquí no se pretende desarrollar un manual de operación de la planta sino hacer hincapié en los temas mínimos indispensables que no deberían faltar en él.

Se indican los factores principales que deben considerarse en la operación de unidades esenciales de la planta tales como: medidores de caudal y dosificación de reactivos, floculadores, sedimentadores y filtros.

Se incluyen medidas de control que contribuyen al manejo de residuos de la planta y al establecimiento de un plan de mantenimiento preventivo de la misma.

Finalmente se proponen prácticas tendientes a conformar un programa de seguridad de la planta, el cual debe incluir aspectos tales como:

- Divulgación de los conocimientos sobre los riesgos y manipulación adecuada de los productos químicos utilizados en la planta.
- Estricto cumplimiento de los reglamentos y adiestramiento en el empleo del equipamiento de seguridad.
- Evaluación de posibilidades y causas de accidentes en la planta.
- Empleo adecuado de herramientas y equipos de generación de energía.
- Técnicas de primeros auxilios.
- Uso adecuado de escaleras.

## 2. ASPECTOS GENERALES DE LA OPERACIÓN DE PLANTAS DE AGUA

Cuando se diseña una planta de tratamiento de agua se debe prestar atención a los siguientes aspectos:

- Confiabilidad.
- Flexibilidad.
- Requerimientos de personal para la operación.
- Grado de automatización y control de los procesos de tratamiento.

La confiabilidad es el factor más importante ya que una planta debe ser diseñada de manera que si es correctamente operada, pueda producir en todo momento agua en las cantidades previstas y con la calidad exigida por las normas vigentes. Algunos de los aspectos generales a tener en cuenta son los siguientes:

- Todos los equipos deben funcionar correctamente en los rangos de caudal previstos, desde el mínimo al máximo.
- Deben proveerse instrumentos adecuados para medir caudales, de tal modo que el operador pueda ajustar la dosificación de los productos químicos.
- En las plantas en las que se han previsto futuras ampliaciones debe modularse el equipamiento para medición de caudales, de modo que las mediciones se realicen dentro de límites de precisión aceptables.
- Deben contemplarse sistemas de control que alerten al operador sobre los cambios en la calidad del agua cruda y tratada y la necesidad de aplicar medidas correctivas. Esto puede llevarse a cabo a través de:
  - Proveer suficiente capacidad en los laboratorios para que el operador pueda realizar los análisis de rutina y los ensayos más necesarios.
  - Proveer equipos que registren en forma continua algún parámetro significativo con un sistema de alertas.
  - Prever la realización de análisis completos en forma periódica por parte de un laboratorio externo.

Por otra parte, la planta debe tener la suficiente flexibilidad como para asegurar un buen funcionamiento cualesquiera sean las condiciones que se presenten y para incorporar nuevos desarrollos tecnológicos, si se requirieran. Para ello es conveniente prever las suficientes válvulas y conductos de bypass de cada una de las instalaciones, que faciliten el mantenimiento y posibiliten la realización de ensayos.

Asimismo, debe preverse la posibilidad de cambiar los puntos de aplicación de los productos químicos en función de la variación en la calidad del agua cruda o la posibilidad de incorporar nuevos productos que se desarrollen en el futuro.

Es indispensable que existan equipos duplicados en muchos casos o suficientes piezas de repuesto. En el caso de bombas, dosificadores y motores, debe existir siempre un equipo de reserva.

Los requerimientos de personal dependen del tamaño de la planta y de la complejidad de los procesos de tratamiento. Los procedimientos para operar la planta pueden quedar condicionados por la posibilidad de conseguir mano de obra calificada local, así como la posibilidad de realizar las reparaciones de los equipos en el lugar.

En una instalación situada en un lugar alejado de centros poblados, el personal debe incluir técnicos mecánicos y electricistas mientras que en plantas ubicadas en ciudades o que forman parte de una organización mayor, las reparaciones pueden ser efectuadas en talleres centrales o por terceros.

El grado de automatización y control que se incluya depende del tamaño de la planta y de las disponibilidades de personal. Cuando exista mano de obra calificada debe hacerse un estudio económico para comparar costos de instalación de sistemas automáticos versus equipamiento de control manual. Si se decide introducir la automatización debe asegurarse el buen funcionamiento de los equipos y su confiabilidad.

El diseño, la construcción y puesta en marcha de una planta requiere la coordinación entre los ingenieros proyectistas, los constructores, los operadores y el comitente (empresa privada o estatal). Las responsabilidades de cada una de las partes deben ser establecidas claramente antes de comenzar el diseño.

El proyectista tiene la responsabilidad de diseñar una planta que produzca agua en la calidad y cantidad deseada y debe controlar que durante su construcción se respeten las especificaciones del proyecto.

Se debe establecer en el contrato que la empresa constructora debe disponer de personal calificado para la puesta en marcha de la planta y para operarla por un período no menor de 6 meses durante el cual debe capacitar al personal que se hará cargo de la operación.

### 3. REQUERIMIENTOS DE PERSONAL

Los requerimientos se refieren al personal dedicado exclusivamente a tareas de operación ya que el personal necesario para el laboratorio se especifica en el punto Laboratorio Tipo.

Para determinar los requerimientos de recursos humanos los siguientes factores son importantes:

- Tipo de fuente: si es superficial o subterránea.
- Ubicación de la obra de toma con respecto a la planta.
- Variabilidad de la calidad del agua cruda.
- Tipo y complejidad del equipo.
- Complejidad del tratamiento.
- Tamaño de la planta.
- Ubicación de la planta: en medio rural o en centro poblado.

La cantidad de personal que se requiere no se puede determinar con precisión porque además de los factores ya mencionados, la existencia o no de servicios centrales de apoyo influye en el número de personas necesarias.

En los sistemas que tratan agua subterránea que sólo requieren un proceso de desinfección, el requerimiento de personal de operación es mínimo y generalmente los operadores se ocupan también de la atención de la red de distribución.

A continuación se dan recomendaciones acerca del número mínimo de personal de operación y su nivel de capacitación en función de la población a servir y cuando se trata de plantas que incluyen varios procesos de tratamientos además de la desinfección.

#### 3.1. PLANTAS PARA POBLACIONES HASTA 10.000 HABITANTES

Si la planta funciona las 24 horas se requieren cuatro operadores (de manera de cubrir tres turnos y quedar uno disponible para reemplazos) y un supervisor, que podría tener a su cargo también el control de otras plantas.

Si la planta no funciona durante las 24 horas debe preverse un operador por turno y uno para cubrir los reemplazos.

#### 3.2. PLANTAS PARA POBLACIONES ENTRE 10.000 Y 50.000 HABITANTES

El personal necesario depende de la complejidad de la planta y de su grado de automatización pero como mínimo se requieren cuatro operadores y un encargado o

supervisor que debe estar en forma permanente, pudiendo estar también a cargo de las tareas de mantenimiento en las plantas menos complejas. En algunos casos puede ser necesario contar con un técnico para las tareas de mantenimiento.

Dependiendo del tamaño de la planta, puede convenir contar con servicios de ingeniería externos, prestados por empresas especializadas en potabilización de aguas.

### **3.3. PLANTAS PARA POBLACIONES ENTRE 50.000 Y 100.000 HABITANTES**

Los requerimientos dependen de la complejidad de la planta y del grado de automatización al igual que en caso anterior.

Los requerimientos mínimos son: dos operadores por turno, un supervisor o jefe de planta y un encargado de mantenimiento.

## 4. CAPACITACIÓN DEL PERSONAL

La operación satisfactoria de una planta de tratamiento depende no sólo de un buen diseño sino también de la capacidad del personal que la opera. La calidad de la planta mejor diseñada puede no ser la adecuada si las personas que la operan no comprenden los fundamentos de los distintos procesos y no tienen la capacitación adecuada. Por ello es esencial diseñar un programa especial de capacitación y entrenamiento de los operadores y supervisores antes y durante la etapa de puesta en marcha de la planta.

La capacitación de los operadores y supervisores de una planta nueva puede darse a través de su entrenamiento en alguna planta que ya esté en funcionamiento y que presente características similares o a través de cursos programados en forma especial y realizados in situ.

El personal de supervisión debiera ser designado durante la última etapa de construcción de la planta. Cuando es posible, es conveniente que algunas personas integrantes del plantel de futuros encargados, pudieran desempeñarse como inspectores de las obras, y así interiorizarse de los detalles de las instalaciones y equipamientos. Es indispensable que los operadores estén presentes, cuando se instalan y se ensayan los equipos para que aprendan su manejo.

### 4.1. NIVEL DE CAPACITACIÓN

#### ***Operador***

Preferentemente nivel secundario completo (como mínimo nivel primario completo) y haber realizado un curso de capacitación en potabilización de agua y operación de plantas de 3 meses de duración como mínimo.

#### ***Supervisor***

Título de técnico químico, mecánico, ambiental, en saneamiento, etc. con un curso de especialización de 6 meses de duración como mínimo. En plantas grandes o complejas se requerirá título de ingeniero sanitario, civil, mecánico, químico o industrial con experiencia comprobada en operación de plantas similares y/o que haya realizado un Curso de Potabilización de Aguas o de Ingeniería Sanitaria de por lo menos 8 meses de duración.

#### ***Encargado de mantenimiento***

Título de técnico mecánico, electricista o electromecánico con experiencia previa en mantenimiento o que haya recibido una capacitación especial para la operación de cada planta en particular.

## 5. PUESTA EN MARCHA

La puesta en marcha debe estar a cargo de la empresa constructora y es conveniente que participen los ingenieros proyectistas y el personal que tendrá a su cargo la operación de la planta ya que será parte del período de capacitación del mismo.

Durante esta etapa debe asimismo, elaborarse el Manual de Operación en que es importante que participe el personal que tendrá a su cargo la operación de la planta. Si el personal de la planta participa de la elaboración del manual se logra una mejor capacitación y que el contenido esté claro para ellos. Si el operador es capaz de escribir un procedimiento, quiere decir que lo ha entendido.

Los procedimientos, luego podrán modificarse a raíz de problemas surgidos o mejoras que se realicen con posterioridad, por lo que deberá actualizarse periódicamente.

El Manual de Operación deberá contener los procedimientos de operación para la operación normal de la planta, los que serán variables de acuerdo al tipo de procesos incluidos y a la tecnología utilizada. La operación normal puede definirse como aquella en la cual la planta funciona a la capacidad de consumo y las únicas variaciones en la cantidad de agua tratada se deben a la variación de la demanda.

Los procedimientos deberán incluir, cómo calibrar los equipos dosificadores, cómo calcular las dosis, cómo controlar el proceso, etc. Se presenta un ejemplo de un procedimiento de calibración de una bomba dosificadora.

### **Procedimiento para calibrar una bomba dosificadora**

**Objetivo:** Calibrar las bombas dosificadoras de sulfato de aluminio.

- 1). Abrir la válvula que permite que la solución de sulfato de aluminio pueda bombearse desde el tanque en el que está contenida.
- 2). Cerrar la válvula que inyecta el coagulante en el punto de aplicación.
- 3). Colocar el dial de la bomba en el valor máximo que indique la escala.
- 4). Poner en marcha la bomba.
- 5). Usando una probeta graduada de 1000 mil y un cronómetro, medir el tiempo que tarda en llenarse la probeta, por ejemplo, hasta la marca de 300 ml. Repetir la medida y anotar los valores.
- 6). Repetir el paso cinco para otros cuatro puntos de la escala.
- 7). Calcular el caudal en mililitros por minuto dividiendo el volumen por el número de minutos. Realizar el cálculo para cada una de las medidas realizadas.
- 8). Graficar el caudal versus el número de la escala. Deberá obtenerse una recta (en algunos casos convendrá buscar la recta de mejor ajuste).

El Manual deberá incluir asimismo los procedimientos para la operación eventual y para la operación de emergencia. Operación eventual es la que se presenta con alguna frecuencia, y para la que las medidas que deben tomarse pueden programarse con anterioridad.

Operación de emergencia es aquella en la cual la capacidad de la planta se suspende o modifica por daños imprevistos en las instalaciones, estructuras o equipos, por falta de energía eléctrica y o por desastres naturales. Estas circunstancias se dan por razones de fuerza mayor y se presentan en forma imprevista; algunos de los casos pueden ser:

- Fallas de energía.
- Catástrofes naturales: terremotos, incendios, inundaciones.
- Fallas de estructuras y equipos esenciales.
- Escapes de cloro.
- Deterioro notable en la calidad del agua cruda.

## 6. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS

El desarrollo tecnológico verificado en el campo de la instrumentación y el control de procesos en los últimos años ha permitido al operador de planta incrementar su capacidad para manejar un número creciente de operaciones con relativa complejidad. Asimismo, para que los procesos de la planta produzcan resultados satisfactorios, se requieren seguimiento y control adecuados por parte del operador.

El enfoque tradicional para el control de la operación de la planta, estaba basado en la extracción de muestras puntuales o compuestas con el posterior análisis para la determinación de parámetros tales como por ejemplo: pH, turbidez o cloro residual.

La instrumentación disponible en el mercado hoy en día permite realizar la medición de estos y otros parámetros en forma continua y a tiempo real. De este modo se puede optimizar la eficiencia del sistema de tratamiento consiguiendo a la vez ahorros significativos en el consumo de productos químicos.

### 6.1. OBJETIVOS DEL CONTROL DE PROCESOS

En términos generales, el control automático de procesos persigue las siguientes ventajas:

- Mejoría en la calidad del producto, mediante la eliminación del error humano producido por el cansancio, la distracción o la falta de coordinación. Un sistema de control garantiza la homogeneidad del producto pues los dispositivos reaccionan en forma siempre igual.
- Aumento en la cantidad de la producción, debido a la reducción en las pérdidas por fallas humanas. De esta manera se consigue economía en materias prima y energía.
- Operación más segura.
- Economía en el requerimiento de personal.
- Control exacto de las especificaciones del producto (control de calidad).
- Control de los costos de producción y del consumo de componentes.
- Se facilita el ordenamiento espacial de la instalación del proceso pues las unidades pueden ser más compactas.
- Se facilita todas las rutinas de operación.

Al mismo tiempo, se requiere personal más capacitado y por otra parte el aumento en la productividad genera más empleo secundario y obliga a que el operario se capacite.

## 6.2. CONTROL DE PROCESOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

A través del tiempo, las instalaciones de tratamiento de agua han tenido una gran expansión en cuanto al número de plantas, su capacidad productiva, y también respecto a las exigencias sobre la calidad del producto. Este crecimiento ha creado una mayor necesidad de instrumentación y control.

El término instrumentación se refiere al uso de un equipo para la medida de una variable de proceso tal como, por ejemplo, caudal, nivel o concentración. Por su parte, el control del proceso supone la ejecución de una acción en respuesta a la medición realizada por el instrumento. Esta acción puede ser llevada a cabo por un operador humano o por un equipo controlador automático. En este último caso, el control del proceso es automático.

La instrumentación en plantas de agua ofrece las siguientes ventajas:

- Medición exacta de las variables de los procesos, lo que facilita la operación y la utilización óptima de las instalaciones.
- Facilita el análisis de las condiciones de operación y la planificación de las operaciones futuras.
- Medición continua y control de los aspectos de calidad de agua.
- Permite el diseño y operación de plantas con una capacidad productiva muy superior a los valores tradicionales.

Ventajas del control automático:

- Operación centralizada e integrada de las unidades de tratamiento.
- Reducción de fallas humanas y accidentes.
- Respuesta rápida a los cambios en los procesos.
- Reducción de rutinas manuales de operación.
- Mayor eficiencia en el tratamiento.

A pesar de las virtudes que presentan la instrumentación y el control automático en plantas de agua, deben tenerse en cuenta las siguientes desventajas:

- La instrumentación puede ser costosa.
- La necesidad de mantenimiento aumenta.
- Muchos instrumentos son complejos.
- Muchas veces la selección y el reemplazo de los equipos se ve dificultada por la falta de normalización
- Este sector tecnológico es muy dinámico y por lo tanto los tipos de instrumentos y modos de transmisión cambian rápidamente.
- El diseño adecuado de la instrumentación es un costo que rara vez se toma en cuenta.

Desventajas del control automático:

- Los sistemas de alto grado de automatización pueden dificultar la comprensión de los operadores sobre su funcionamiento.
- No permite mucha flexibilidad para situaciones críticas.
- El personal de operación puede rechazar el sistema cuando no ha tomado parte en su planificación y diseño.
- La puesta en marcha de los sistemas puede ser muy dificultosa y desanimadora.
- Las fallas del sistema de control automático pueden crear problemas de operación.

### 6.3. FUNDAMENTOS DEL CONTROL AUTOMÁTICO

El control automático de un proceso es el conjunto de elementos destinados a mantener en su valor deseado a las variables físicas o químicas propias del sistema tales como presión, caudal, nivel, etc. Las condiciones óptimas establecidas de un proceso pueden variar en forma inesperada debido a numerosas circunstancias.

Por ello, es necesario introducir en la planta un sistema de control que evite o atenúe las perturbaciones de los valores prefijados para las variables o parámetros del proceso. En algunos procesos de gran estabilidad o autorregulación existe la posibilidad de emplear sistemas de control manual, conocidos también como sistemas semi-automáticos.

A pesar de manejar procesos que son sumamente complejos desde el punto de vista físico-químico y electroquímico, en general los procesos de las plantas de agua son fácilmente regulables mediante sistemas de control simplificados. En ellas se pueden identificar normalmente entre cuatro y seis unidades de tratamiento con flujo continuo que en algunos casos, como por ejemplo los filtros, se subdividen en compartimentos de flujo paralelo cuyo número es determinado por el tamaño de la planta y su capacidad.

Habitualmente se diseña y opera la planta de tratamiento para un caudal relativamente constante, empleándose cisternas de almacenamiento para atender las variaciones de la demanda. Esta práctica permite que el sistema de control no necesite un campo de operación muy amplio, pues de este modo las fluctuaciones son relativamente pequeñas. Por otra parte, en una planta de tratamiento, las distancias para la transmisión de las señales son relativamente cortas, lo cual constituye otra ventaja para la aplicación de un sistema de control.

Los problemas más frecuentes en el funcionamiento de las plantas pueden provenir de las siguientes circunstancias:

- Variaciones en los flujos de entrada y salida y desequilibrios en el funcionamiento hidráulico de las diversas unidades.
- Cambios repentinos en las características de calidad del agua cruda.
- Interrupción del funcionamiento de algunas unidades ya sea por la rutina de operación o debido a sobrecarga de su capacidad.

Frente a estos problemas, la introducción de instrumentación y control consigue:

- Respuesta instantánea a los cambios en los valores básicos de los procesos y precisión y estabilidad en el funcionamiento hidráulico.
- Adaptación automática a las nuevas condiciones creadas por interrupciones del servicio de algunas unidades.

### **6.3.1. Principios de Funcionamiento**

Los sistemas de control actúan transmitiendo la información (señal) de los cambios que registra la variable que se desea controlar a la unidad reguladora. Esta unidad compara la señal con un valor índice prefijado o punto de control y produce la corrección necesaria para restablecer el equilibrio del proceso.

De acuerdo con este concepto, el control supone siempre una medición, es decir la forma de generar la información que el controlador recibe y debe evaluar. Por otra parte, en los sistemas de control la medición no se considera como una operación aislada y autosuficiente sino que se relaciona con la finalidad que esta medición persigue dentro del mismo.

En el caso más sencillo, las mediciones de laboratorio de una planta de tratamiento forman parte de un procedimiento de control no mecanizado, y el operador genera la información mediante las mediciones comparando luego los resultados obtenidos con las normas adoptadas (índice de control) a fin de efectuar las correcciones correspondientes en el proceso.

El sistema de control manual puede ser automatizado mediante el empleo de un instrumento medidor, un dispositivo comparador (regulador) y un elemento de control motorizado, constituyendo así un circuito cerrado o lazo de control.

La acción en circuito cerrado se repite continuamente puesto que luego de la corrección de la variable manipulada del proceso hay una nueva serie de acciones constituidas por medición, comparación y acción correctiva hasta llegar a un valor tan próximo como sea posible al valor deseado o índice de control (en inglés set point).

El dispositivo automático observa en cada iteración el resultado de su trabajo y transmite esta información al circuito de control. Esta característica llamada retroalimentación (en inglés feed-back) es la condición fundamental en un sistema de control automático.

### **6.3.2. Elementos de los Sistemas de Control**

Los principales elementos que constituyen un sistema de control son:

- *Los detectores o sensores*, elementos primarios destinados a la medición de la variable que se desea controlar.
- *Los transmisores*, codifican la medición y la transfieren como información codificada dentro del circuito cerrado.

- *Los receptores*, que son instrumentos de lectura que reciben y traducen la información codificada a términos utilizables para su lectura instantánea, registro y/o acumulación (totalizador).
- *Unidad de control (controlador, regulador)*: mide y compara las señales con un valor prefijado que representa la condición deseada y genera señales correctivas codificadas que se transfieren al circuito.
- *Elementos de control final*, por ejemplo una válvula de control que efectúa la acción correctiva sobre la variable del proceso al recibir la señal del regulador, modificando el flujo de material y/o energía al proceso.

## 6.4. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Las opciones existentes para implementar los sistemas de control que permitan superar los problemas señalados son numerosas y en constante desarrollo. A continuación se presentan las principales características de los componentes de los sistemas de control usualmente empleados en plantas de tratamiento de agua. Al respecto ver el Capítulo XVI Instalaciones Eléctricas - Automatización y Control de las presentes Fundamentaciones.

### 6.4.1. Detectores o Sensores

Estos elementos constituyen la fase inicial del sistema de control midiendo continuamente la variable que se va a regular. Se llaman también dispositivos de toma de impulso y están en contacto directo con la tubería, tanque o equipo donde existe el fluido al cual se le pretende regular la presión, caudal, nivel etc.

El tipo de sensor depende de la variable a regular, en la mayoría de los casos el sensor tiene incorporado algún tipo de amplificador de la magnitud detectada y un transformador del impulso en una señal más apta para su manejo posterior (trasductor). Los dispositivos de fuelle, diafragma y tubo de Bourdon son ejemplo de trasductor para el caso de la variable presión. Los diferentes sensores deben ser calibrados mediante patrones de medida para garantizar la exactitud de la medición.

### 6.4.2. Sensores de Presión

Los medidores de presión se clasifican en tres categorías:

- 1). De presión absoluta
- 2). De presión efectiva
- 3). De presión diferencial

Según su principio de funcionamiento, los detectores de presión pueden clasificarse en:

- Por equilibrio de presiones.
  - Columnas de líquido en tubo en U.

- Campana.
- Celda.
- Por deformación de un material elástico.
  - Tubo de Bourdon.
  - Membrana o diafragma.
  - Fuelle.

El tubo de Bourdon es el más usado en la práctica; en la industria se conocen tres tipos: el de forma de C simple, el de espiral y el de helicoide, cada una de estas variantes resulta apta para cierta gama de presiones. El principio en que se basa es el de la deformación de un tubo elástico con un extremo fijo, cuando la presión interior varía. El tipo C tiene aplicación general hasta  $1000 \text{ Kg/cm}^2$ . El de espiral se utiliza para presiones entre 1 y  $15 \text{ Kg/cm}^2$ . Estos últimos ofrecen movimiento de mayor amplitud, más fuerza (torque), respuesta más rápida y mayor precisión. En los circuitos de control generalmente se emplea la fuerza generada por el movimiento del tubo de Bourdon para accionar el dispositivo de transmisión.

El manómetro en U registra la diferencia de presión entre dos puntos, la cual se conoce como presión diferencial. La presión diferencial es igual al producto de la diferencia en altura del líquido contenido en las ramas del tubo en U, por el peso específico del líquido manométrico. Este tipo de manómetro tiene gran aplicación en otros dispositivos de medición que se basan en el movimiento de la columna líquida para accionar los mecanismos de indicación.

El detector de campana consiste en un vaso invertido flotando en un líquido, que aísla la presión interna del mismo de una cámara externa; al ejercer presión dentro de la campana se produce un desplazamiento que es utilizado para la medición de la presión diferencial entre el interior de la campana y la cámara externa.

La celda de presión diferencial es un dispositivo que incorpora en una sola unidad un sensor y los medios para amplificar las señales detectadas; su campo de aplicación es ilimitado y permite el ajuste de su gama de calibración. El sensor es del tipo de diafragma metálico localizado entre cámaras de medición. Por ser el instrumento más usado en regulación se describe en el punto correspondiente a transmisores.

El diafragma se emplea en la medición de presiones muy bajas; se utiliza una membrana fina de material elástico metálico o de neoprene, teflón, caucho, etc. La membrana está ligada a un resorte y a un brazo que hace parte del mecanismo de medición. El fuelle se utiliza en combinación con un resorte, es fabricado de material liviano y flexible, la presión se aplica al interior del fuelle o a su superficie externa; es muy usado en los instrumentos neumáticos.

#### **6.4.3. Sensores de Caudal**

La medición de caudal es la más importante en el tratamiento de agua y ha sido abordada en forma sistemática por la hidráulica.

Para la práctica del control automático es esencial la comprensión de la teoría de la medición de caudales. Hay tres tipos fundamentales de estos medidores:

1). Indirectos.

- De presión diferencial, con pérdida de carga variable.
- De área variable.
- De régimen crítico.

2). Directos o volumétricos.

- De desplazamiento positivo.
- De velocidad.

3). Especiales.

- Magnético.
- Pitot-magnético.
- Ultra-sónico.

La operación de los medidores usados en la industria se basa en el teorema de Bernoulli el cual expresa que en un conducto la energía en dos puntos es igual si se desprecian las pérdidas por fricción. Considerando una placa de orificio colocada en una tubería, el cambio en la sección transversal entre el tubo y el orificio produce un cambio en la velocidad produciendo al mismo tiempo una depresión en la carga de presión estática; existe entonces una diferencia de presiones entre puntos colocados antes y después de la restricción al flujo; el caudal se calcula en función de esta presión diferencial conectando los dos brazos de un manómetro en U a cada lado del orificio.

$$\text{Caudal (Q)} = K.A (\Delta P)^{1/2}$$

Donde:

$K$  = constante.

$A$  = área de paso.

$\Delta P$  = diferencial de presión.

Según la fórmula anterior, el caudal es función cuadrática del diferencial de presión. Esta circunstancia influye en el diseño de los equipos para control de caudal, tanto en la forma de expresar las escalas como en la necesidad de introducir en el circuito mecanismos de extracción de raíz cuadrada.

#### **6.4.4. Elementos Primarios de Presión Diferencial**

Los elementos primarios usados en medidores de tipo diferencial son modificaciones del tubo Venturi. Consiste en un elemento productor de alto diferencial de presión con baja

pérdida de carga, por estar dotado de un extenso cono de recuperación. Posteriormente se introdujo el tubo Venturi corto, cuyo cono de salida es bastante reducido.

De este modo, presenta un alto diferencial pero mayor pérdida de carga que el anterior; también conserva una característica notable que consiste en que se puede usar cuando el fluido lleva materiales en suspensión. En los últimos años se han perfeccionado numerosos elementos similares al tubo Venturi que presentan alto diferencial y muy baja pérdida de carga. Esta última condición se expresa también como alta recuperación de la carga hidráulica.

#### **6.4.5. Placas de Orificio**

Las placas de orificio empleadas originalmente en la medición de gases ofrecen las mejores opciones como elementos primarios de medición de caudal en plantas de tratamiento de agua. Se conocen principalmente los tipos normalizados por la American Gas Association (AGA) y Deutsche Industrie Normen (DIN). Su campo de aplicación óptimo es el de los fluidos limpios, aunque hay versiones especiales para líquidos con sólidos en suspensión.

Una placa de orificio está constituida normalmente por una platina delgada circular de acero inoxidable que tiene una perforación concéntrica; existen el orificio excéntrico y el segmental usados en líquidos con cantidades limitadas de sólidos. También se conocen combinaciones de orificio y tobera, aptos para manejar fluidos viscosos.

Las especificaciones para orificios de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) establecen el tamaño y posición de un pequeño orificio de ventilación, que se coloca para medición de líquidos con aire en solución; en ciertos casos se practica otra perforación al fondo de la placa.

En la fabricación del orificio, se presta atención a la forma de los bordes de la perforación, que están relacionados con la aplicación que se dará a la placa y al grado de precisión requerido; la tolerancia normal en el diámetro de la perforación es de 0,01 mm para medidas de gran precisión; el borde debe ser exactamente perfilado y se instalan entre dos bridas.

La técnica de medición del caudal con placa de orificio está bastante desarrollada por ser de uso universal en las instalaciones industriales. El cálculo de flujo varía según la posición de las conexiones del orificio al manómetro o transmisor, llamadas en la práctica "tomas"; los tipos de tomas más usados son: a) tomas en las bridas y b) tomas en la tubería, c) en la propia placa de orificio, mediante cámaras anulares; se usa en la técnica europea y son de gran precisión.

Las ventajas de la placa orificio son:

- Fabricación simple y de muy bajo costo.
- Fácil mantenimiento (el cambio es muy sencillo).
- Posibilidad de fabricación para las condiciones particulares de un caso de aplicación.

- Posibilidad de trabajar en una gama de diferenciales muy amplia; especialmente posibilidad de operar en la gama llamada de bajo diferencial de presión, que va normalmente de 5 a 50 cm de columna de agua.

Las desventajas de la placa orificio son:

- Produce una mayor pérdida de carga que otros sensores.
- La precisión es aceptable sólo cuando la relación entre los diámetros mayor y menor del elemento ( $d/D$ ) asume valores entre 0,35 y 0,75.
- El borde se desgasta.

#### 6.4.6. *Tubo de Pitot*

Se ha demostrado que cuando se coloca un tubo en el interior de una cañería, de modo que sus ejes resulten paralelos y con su abertura enfrentada a la dirección del flujo de agua, la presión en esta boquilla es:

$$p_i = p_o + (V_o^2/2g)$$

Donde:

$p_i$  = presión en la boquilla, kg fuerza/m<sup>2</sup>

$p_o$  = presión estática, kg fuerza/m<sup>2</sup>

$V_o$  = velocidad del agua en el punto en que está situada la boquilla

$g$  = aceleración de la gravedad, (9,806 kg masa . m)/(kg fuerza . seg.<sup>2</sup>)

El tubo de Pitot es un dispositivo que mide directamente la diferencia entre la presión dinámica y la presión estática del fluido que circula por una cañería a presión, multiplicada por un factor de calibración. Su medición depende de la velocidad del flujo en el punto donde se coloca el tubo, el cual posee un orificio enfrentado al flujo. Para medir la diferencia se conectan las dos presiones a los dos extremos de un manómetro.

Sin embargo, al utilizar este instrumento es necesario tener en cuenta que el cálculo exacto del caudal requiere de la determinación del perfil de velocidades dentro del tubo y también de la velocidad media. Por ejemplo, la velocidad cerca de las paredes de un tubo, cuando no existen perturbaciones causadas por válvulas y/o accesorios, a una distancia del tubo Pitot inferior a 50 diámetros del tubo, es aproximadamente la mitad de la velocidad en el centro. La velocidad media, que debe emplearse para el cálculo del caudal, se encuentra aproximadamente a una cuarta parte del radio a contar de la pared de la tubería. Paralelamente, la velocidad en el centro de la tubería es aproximadamente 20 % mayor que la media. Sin embargo, no puede suponerse que esto sea exactamente lo que sucede cuando el interior de la tubería es rugoso o contiene elementos perturbadores. En instalaciones permanentes, es necesario explorar la tubería en 10 ó 20 puntos para averiguar a cuál corresponde la velocidad media o para determinar el porcentaje de disminución entre la velocidad en el centro y la media.

Por lo expuesto, el Tubo de Pitot se utiliza como un medidor de tipo de muestreo. Asimismo, por la facilidad con que se obstruye su aplicación en plantas de tratamiento es

escasa, con excepción de la verificación de otros medidores. Sin embargo, su importancia radica en la utilización de sus fundamentos en los medidores modificados de tipo Dall-Pitot y del moderno Pitot-magnético.

#### **6.4.7. Criterios de Selección del Elemento Primario**

Uno de los pasos más importantes en la implementación de sistemas de control de caudal es la selección del elemento primario. La recomendación básica es hacer un cálculo económico de la energía consumida para mover el fluido a través del elemento, venciendo las pérdidas de carga y comparar este valor con el costo inicial y de mantenimiento de cada elemento.

El uso de elementos primarios de caudal en las plantas de tratamiento presenta las siguientes características:

- Generalmente se trata de líquidos limpios con bajo contenido de sólidos.
- No hay requisitos fijos, por depender de la topografía del lugar, en cuanto a pérdida de carga admisible; aunque se prefiere que las pérdidas sean bajas, principalmente en los efluentes de la etapa de filtración y en la alimentación de agua de lavado, si el tanque de lavado es abastecido por bombeo.
- Cuando se introducen en la planta modificaciones de importancia a fin de aumentar la capacidad de diseño de los procesos de tratamiento, la gama de variación de los caudales tiende a ser cada vez mayor.
- Muchos elementos primarios de las plantas van colocados en la galería de conductos, en las líneas de servicio a los filtros. En esta localización, los elementos no disponen de la longitud de tramo recto que es requisito básico para la precisión de la medida. Estos requisitos se encuentran perfectamente especificados en las informaciones técnicas de los fabricantes de equipo. Por otra parte no se requiere gran exactitud en la medición del caudal efluente de los filtros, como criterio general se puede adoptar un valor práctico de la precisión entre el 5% y el 7%. En principio, la medición global de la entrada y la salida de la planta son más exigentes en cuanto a precisión.

Existe una relación conocida en los elementos productores de diferencial de presión que se estima a través de la llamada relación beta, la cual surge del cociente entre los diámetros del elemento ( $d/D$ ), y las pérdidas de carga permanentes. En la práctica se trabaja con valores de beta cercanos a 0,75 o algo inferiores, aunque en teoría podría llegarse a operar con valores tan bajos como 0,35.

El procedimiento para la selección del sensor de caudal consiste en calcular primero el diferencial de presión para el flujo máximo previsto, tomando un valor beta de 0,75 y utilizando dos o más alternativas de elementos primarios. Si el diferencial de presión es admisible para el instrumento secundario, el siguiente en el circuito, entonces se investigan las pérdidas de carga haciendo cálculos hidráulicos completos. De este modo se determina la disipación de carga hidráulica en cada componente del circuito hidráulico, especialmente en las válvulas de control.

#### 6.4.8. Medidores de Régimen Crítico

Este tipo de elementos se conoce también como medidores en canales abiertos. Son de gran importancia en las instalaciones de tratamiento, ya que la mayoría de las plantas utilizan canales abiertos para el transporte de fluidos entre las diferentes unidades. Los tipos principales de esta clase de medidores de caudal son: el vertedero y la canaleta Parshall.

##### **Vertederos**

Básicamente hay dos tipos de vertederos, el rectangular y el triangular, con varias modalidades de cada uno de ellos. En su aplicación se mide la altura estática correspondiente a la lámina que origina el flujo, desde un depósito a través de la abertura que proporciona el vertedero. El principal requisito para la medición consiste en la adecuada ventilación de la lámina de agua, lo que impone una pérdida en la carga hidráulica como mínimo de aproximadamente 10 centímetros.

##### **Canaleta Parshall**

Es un tipo de Venturi abierto, cuyo funcionamiento se basa en la presencia de una restricción al flujo la cual convierte la carga estática en carga de velocidad. La pérdida de carga es menor a la de los vertederos, puesto que no se requiere ventilar la lámina y es apto para líquidos que contienen sólidos en suspensión. El costo de la canaleta Parshall es muy superior al de un vertedero; sus ventajas consisten en el mayor rango de medición, mejor precisión y en la posibilidad de usar la turbulencia en la dispersión y mezcla de algunos productos químicos.

En ambos casos, la correlación entre nivel y caudal tiene un error de base del 3 al 5 por ciento. Cuando se combinan el error básico y el error en el instrumento que mide el nivel, el error total puede llegar a ser del orden de  $\pm 5 \%$ . El valor del caudal se determina por una medición de nivel, aplicando ecuaciones características de cada modalidad de medidor. Los dispositivos comúnmente usados para establecer el nivel son: flotador para instalar en pozo de medición, flotador colocado sobre la corriente, sensor ultrasónico y tubo de burbujeo.

#### 6.4.9. Sensores de Nivel

Estos elementos miden la posición de la superficie del líquido con relación a un punto de referencia, se conocen dos tipos principales:

- De medición directa
  - Flotador
  - Electrodo
  - Visor de nivel.
- De medición indirecta
  - Ultrasónico
  - De burbujeo
  - Manómetro en U
  - Caja de diafragma
  - Celda de diferencial de presión.

## 7. CONTROL DE OPERACIÓN DE PROCESOS UNITARIOS

El control de las distintas etapas de tratamiento en una planta de potabilización se puede realizar a través de una serie de ensayos y mediciones que pueden tener los siguientes objetivos:

- Producir agua de buena calidad al menor costo.
- Proporcionar alertas sobre mal funcionamiento de los procesos.
- Proveer datos para el estudio y análisis del funcionamiento de la planta y para mejorar su funcionamiento.
- Ayudar a comprender el funcionamiento de la planta.
- Proveer información para el diseño de ampliaciones o el diseño de futuras plantas.

### 7.1. PROCESO DE COAGULACIÓN

La coagulación constituye, en general, el primer proceso en las plantas de tratamiento y por lo tanto determina en gran parte las condiciones de operación de los procesos de tratamiento subsiguientes. El cuidadoso control de esta etapa debe constituir una de las principales preocupaciones de los operadores de las plantas de tratamiento y comprende dos puntos esenciales:

- La determinación de la dosis óptima de coagulante.
- Asegurar la aplicación de la dosis correcta.

Los métodos para el control del proceso de coagulación-floculación se pueden dividir en tres grandes grupos que pueden llegar a complementarse entre sí:

#### 7.1.1. Simulación del Proceso Mediante el Ensayo de Jarras

La simulación del proceso de coagulación-floculación se realiza a través del conocido ensayo de la prueba de jarras (Jar Test) que fuera desarrollado en los Estados Unidos en 1920 y que desde entonces constituye una valiosa herramienta utilizada ampliamente en todo el mundo.

El ensayo puede utilizarse con dos objetivos distintos:

- 1). Determinación de dosis óptima en forma rutinaria en la operación de las plantas de tratamiento.
- 2). Determinación de las condiciones óptimas para llevar a cabo el proceso de coagulación en las etapas previas al diseño de una planta de tratamiento.

También puede utilizarse para determinar las condiciones óptimas del proceso de floculación, como se indica más adelante.

### **Descripción del ensayo de Jar Test**

El aparato para la prueba de jarras consta de un agitador múltiple de velocidad variable que permite crear la agitación adecuada en 6 vasos de precipitado al mismo tiempo. Mediante este ensayo se puede determinar:

- Coagulante más apropiado para la remoción de color, sabor y olor, algas, turbiedad o cualquier otro parámetro que interese remover y que dependerá del agua cruda a tratar.
- pH óptimo.
- Dosis óptima de coagulante.
- Gradientes de velocidad y tiempos óptimos para el proceso de mezcla rápida.
- Velocidades de sedimentación.

### **Material de vidrio necesario**

Se necesitan 6 vasos de precipitado, preferentemente de 2000 ml cada uno, aunque pueden usarse vasos de 1000 ml, pipetas de 10 y 25 ml, erlenmeyers de 100 ml para las muestras de sobrenadante.

### **Reactivos**

Los reactivos más usados son soluciones de sulfato de aluminio o cloruro férrico, pero esto dependerá del producto que se requiera en cada caso particular.

Las soluciones se preparan agregando agua destilada a 100 gramos de coagulante hasta completar un volumen de 1000 ml, con lo que se obtiene una solución al 10% que se puede conservar como solución patrón durante 2 a 3 meses.

Para la realización del ensayo se diluyen 10 ml de la solución patrón hasta completar 100 ml con agua destilada de manera de obtener una solución al 1% que no se puede conservar por más de 24 horas, pues puede hidrolizarse y perder parte de su capacidad de coagulación. Una solución al 1% tiene 10 mg por ml por lo que si se trabaja con vasos de 1000 ml, 1 ml de la solución equivale a una dosis de 10 mg/l.

La prueba debe realizarse, en lo posible, a la misma temperatura que la que tiene el agua en la planta de tratamiento por lo que conviene tomar la temperatura del agua antes de iniciar los ensayos. No conviene dejar los vasos sobre el iluminador de la base prendido porque el aumento de temperatura puede provocar resultados inconsistentes

### **Procedimiento del ensayo**

- Determinar la temperatura del agua cruda, turbiedad, color, pH, alcalinidad, hierro y manganeso (si existen en el agua cruda).
- Colocar agua cruda en cada uno de los 6 vasos y añadir el coagulante en dosis crecientes en cada uno de ellos en alguna de las formas siguientes:
  - Se ponen a funcionar los agitadores a 100 r.p.m. y se inyecta el coagulante con una pipeta por debajo de las paletas para que se logre una buena mezcla.

- Se colocan las cantidades de coagulantes que se van a agregar en seis vasos de precipitados pequeños y el contenido de cada uno de ellos se aspira con una jeringa. Se hacen girar las paletas y se agrega en cada vaso el contenido de la jeringa.
- Se pone previamente la dosis de coagulante en cada vaso y luego se agrega el agua. Esto produce una buena mezcla.
- Una vez que se ha agregado el coagulante y se ha agitado durante un minuto (o el tiempo que se estime conveniente), se reduce la velocidad de rotación de las paletas a valores entre 30 y 60 r.p.m. para proceder a la floculación. Se deja flocular el agua durante 15-20 minutos, se levantan las paletas, se apaga la luz que ilumina los vasos y se deja sedimentar durante otros 15-20 minutos.

Si el proceso que se utiliza en la planta de tratamiento es una filtración directa, se elimina la etapa de sedimentación. Luego del período de floculación se extrae el sobrenadante y se pasa por papel de filtro N°. 40.

- Se extrae el sobrenadante de cada uno de los vasos para proceder a analizar los parámetros de interés. Para la extracción de las muestras pueden usarse pipetas volumétricas, sifones o pueden utilizarse vasos plásticos cuadrados tipo Hudson que ya tienen un tubo de goma situado a 10 cm por debajo del nivel del agua y que permite extraer las muestras. Existen actualmente equipos comerciales que tienen este diseño.

### Registro de los resultados

Los resultados se anotan en una planilla semejante a la que se presenta en la **Tabla 1**. La dosis óptima será aquella que produzca la mayor remoción de turbiedad, color, hierro, según el caso.

| Fecha y hora de extracción de la muestra:<br>Sitio de extracción:<br>Turbiedad inicial:<br>pH inicial:<br>Color inicial: |                            |            |          |                           |       |               |
|--|----------------------------|------------|----------|---------------------------|-------|---------------|
| <b>1. Mezcla rápida</b><br>Velocidad de rotación de las paletas:<br>Tiempo:  |                            |            |          |                           |       |               |
| <b>2. Mezcla lenta</b><br>Velocidad de rotación de las paletas:<br>Tiempo:   |                            |            |          |                           |       |               |
| <b>3. Sedimentación</b><br>Tiempo:   |                            |            |          |                           |       |               |
| Vaso   | Dosis de coagulante (mg/l) | pH inicial | pH final | Turbiedad en sobrenadante | Color | Observaciones |
| 1  |                            |            |          |                           |       |               |
| 2  |                            |            |          |                           |       |               |
| 3  |                            |            |          |                           |       |               |
| 4  |                            |            |          |                           |       |               |
| 5  |                            |            |          |                           |       |               |
| 6  |                            |            |          |                           |       |               |

**Tabla 1.** Planilla para registrar los resultados de un ensayo de jarras

El Ensayo de Jarras debe tratar de reproducir las condiciones de la planta y en función de las mismas deberán elegirse los tiempos de agitación rápida, agitación lenta y sedimentación, así como el orden en que se agregan los productos químicos. Por ejemplo, si se utiliza sulfato de aluminio y un polielectrolito que se agrega 30 segundos después del primero, la misma secuencia debe realizarse en el Ensayo de Jarras.

### **Determinación de la influencia del pH en la coagulación**

El Ensayo de Jarras como ya se dijo, se utiliza también para determinar el pH óptimo para la coagulación. Se procede de la siguiente forma:

- Se realiza el ensayo como se explicó en el punto anterior y se determina la dosis óptima.
- Se realiza un nuevo ensayo agregando la dosis óptima en todos los vasos y a cada una de ellas se le agrega ácido sulfúrico diluido 0,1 N o hidróxido de sodio 0,1 N para bajar o subir el pH de manera de que éste varíe por ejemplo entre 4 y 10. El cálculo de la cantidad de ácido o álcali para llegar a un determinado pH puede hacerse con el agua cruda o con el agua cruda más la dosis de coagulante determinada en punto 1.
- Un vez determinadas las cantidades de ácido o álcali necesarias, se agregan y se espera unos minutos para que se estabilice el pH y luego se agrega el coagulante.
- Se continua con el procedimiento habitual y se extrae el sobrenadante para realizar las determinaciones físico-químicas necesarias.
- Una vez determinado el pH óptimo, se realiza un nuevo ensayo en el que se ajusta el valor de pH al valor encontrado en todos los vasos y se agregan distintas dosis de coagulante en cada uno de los vasos.

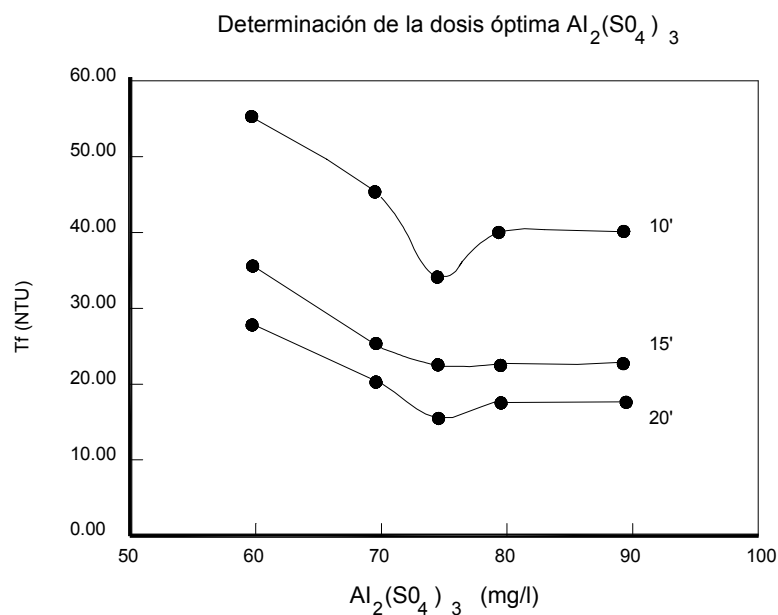
A manera de ejemplo se incluyen los resultados obtenidos con esta metodología, en ensayos de coagulación con agua proveniente de una represa en la localidad de Tarata, Bolivia.

### **Ejemplo:**

El agua tratar, proveniente de una represa poseía elevada turbiedad, bajo pH, y contenidos variables de hierro. Primeramente, se determinó la dosis óptima de sulfato de aluminio, utilizando distintos tiempos de sedimentación. Luego se determinó el pH óptimo mediante el agregado de cal en distintas dosis. Se determinó un pH óptimo de 9,5 - 10. Finalmente se determinó nuevamente la dosis óptima con el pH óptimo.

| Jarra | Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub><br>mg/L | Turbiedad (NTU) |       |       | pH <sub>f</sub> |
|-------|---|-----------------|-------|-------|-----------------|
|       |   | 10'             | 15'   | 20'   |                 |
| 1     | 60  | 54,50           | 35,00 | 27,50 | 7,60            |
| 2     | 70  | 44,50           | 25,00 | 20,00 | 7,65            |
| 3     | 75  | 33,50           | 22,00 | 15,00 | 7,60            |
| 4     | 80  | 39,00           | 22,00 | 17,00 | 7,65            |
| 5     | 90  | 39,00           | 22,00 | 17,00 | 7,65            |

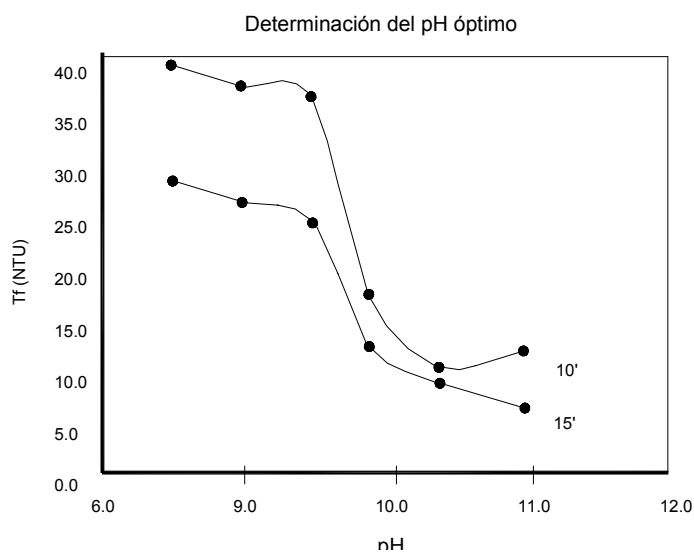
**Tabla 2.** Determinación de la dosis óptima de coagulante



**Figura 1.** Determinación de la dosis óptima de sulfato de aluminio sin modificar el pH

| Jarra | Sol. Sat. Cal (mL) | pH   | Turbiedad (NTU) |      | pH <sub>f</sub> |
|-------|--------------------|------|-----------------|------|-----------------|
|       |                    |      | 10'             | 15'  |                 |
| 1     | 5,8                | 8,5  | 39,0            | 28,0 | 7,2             |
| 2     | 6,0                | 9,0  | 37,0            | 26,0 | 7,2             |
| 3     | 13,0               | 9,5  | 36,0            | 24,0 | 7,4             |
| 4     | 26,5               | 9,9  | 17,0            | 12,0 | 7,6             |
| 5     | 41,0               | 10,4 | 10,0            | 8,5  | 7,8             |
| 6     | 44,0               | 11,0 | 11,5            | 6,0  | 8,3             |

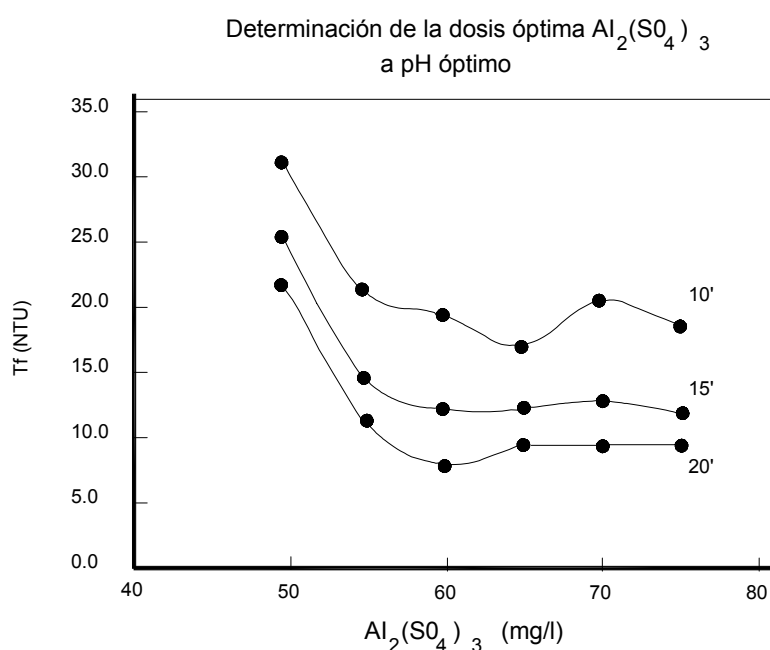
**Tabla 3.** Determinación del pH óptimo



**Figura 2.** Determinación del pH óptimo

| Jarra | Sol. Sat. Cal (ml) | pH   | $Al_2(SO_4)_3$ mg/L. | Turbiedad (NTU) |      |      | pH <sub>f</sub> |
|-------|--------------------|------|----------------------|-----------------|------|------|-----------------|
|       |                    |      |                      | 10'             | 15'  | 20'  |                 |
| 1     | 29                 | 9,85 | 50                   | 32,0            | 26,0 | 22,5 | 7,35            |
| 2     | 29                 | 9,90 | 55                   | 22,0            | 15,0 | 11,5 | 7,30            |
| 3     | 29                 | 9,90 | 60                   | 20,0            | 12,5 | 8,0  | 7,25            |
| 4     | 29                 | 9,95 | 65                   | 17,5            | 12,5 | 9,5  | 7,25            |
| 5     | 29                 | 9,95 | 70                   | 21,0            | 13,0 | 9,5  | 7,15            |
| 6     | 29                 | 9,50 | 75                   | 19,0            | 12,0 | 9,5  | 7,05            |

**Tabla 4.** Determinación de la dosis de sulfato de aluminio a pH óptimo



**Figura 3.** Determinación de la dosis de sulfato de aluminio a pH óptimo

### 7.1.2. Columna Piloto de Filtración

En esta técnica se desvía una porción del agua que sale de la unidad de mezcla rápida a una columna de filtración que posee un turbidímetro en línea en el conducto de salida de agua filtrada. Cualquier deterioro en la calidad del efluente del filtro piloto, le indica al operador que es necesario cambiar la dosis de coagulante.

Esta técnica, aunque no es usada en nuestro país, es un modo sencillo de controlar si la dosificación es correcta. Tiene la ventaja de que el tiempo de retención en el filtro piloto es del orden de 10 minutos, mientras que en los sedimentadores y en los filtros de la planta el tiempo de retención es de 2 a 3 horas. Por tal motivo, se pueden detectar las alteraciones en la calidad del agua cruda en forma rápida.

### 7.1.3. Sistemas de Medida de las Cargas de las Partículas

#### **Potencial Zeta**

La técnica de medición de Potencial Zeta se relaciona con la medición de la movilidad electroforética de las partículas. Esto se puede hacer midiendo en un microscopio, en una cámara especial denominada cámara de Briggs, la velocidad de las partículas en una suspensión que se somete a un campo eléctrico. Existen además equipos comerciales que permiten medir el Potencial Zeta (PZ). Es un método de medición discontinuo.

Se debe seleccionar mediante Ensayos de Jarras y mediante mediciones de PZ, cuál es el rango de PZ óptimo para obtener una buena turbiedad en el proceso de sedimentación y luego se controla la adición de coagulantes mediante su medición en muestras de agua extraídas inmediatamente luego de agregado los coagulantes. La dosis de coagulante se modifica cuando el valor del PZ se desvía del intervalo que produce la menor turbiedad.

Debido a que la técnica incluye sólo los aspectos de las cargas eléctricas, puede llevar a conclusiones erróneas cuando es usada para estudiar coagulantes que no siguen la teoría electroquímica. Esta técnica ha sido utilizada con éxito en los Estados Unidos pero no ha tenido difusión en nuestro país.

#### **Monitoreo de la Corriente Circulante (Streaming Current Monitor)**

Esta técnica permite controlar el proceso de coagulación en forma continua. La "corriente circulante" es una corriente eléctrica que se genera cuando las partículas presentes en el agua son inmovilizadas temporalmente y la totalidad del líquido es forzada a circular alrededor de las mismas.

La cantidad de corriente generada es proporcional a la carga que queda después de haber agregado el coagulante. La corriente circulante puede medirse continuamente por medio de un equipo comercial y puede conectarse al equipo dosificador de coagulante, de modo de ajustar a la dosis en forma automática para obtener un valor de referencia prefijado.

El valor de referencia corresponde a la dosis mínima que permite obtener un agua de buena calidad. La corriente circulante se relaciona con el potencial zeta por la siguiente expresión:

$$i = (PZ \cdot D) / N$$

donde:

$i$  : corriente circulante

$PZ$  : potencial zeta

$D$  : constante dieléctrica

$N$  : viscosidad del fluido

## 7.2. PROCESO DE FLOCULACIÓN

### 7.2.1. Determinación de Gradientes y Tiempos Óptimos Para la Floculación

El Ensayo de Jarras se puede utilizar también para determinar gradientes y tiempos óptimos para el proceso de floculación. Esta prueba puede llevarse a cabo como parte de los ensayos que permiten definir parámetros de diseño, ya sea en la etapa previa al proyecto definitivo o bien para determinar las condiciones operativas óptimas ante características cambiantes del agua cruda, una vez que la planta está en funcionamiento. La variación del gradiente de velocidad puede realizarse cuando se dispone de floculadores mecánicos, variando la velocidad de rotación de las paletas o bien variando el número de ellas.

#### **Procedimiento de los ensayos**

- Los ensayos deben realizarse una vez que se ha determinado el pH y la dosis de coagulante óptimos según la metodología que se describió en el punto anterior.
- Se procede a realizar un Ensayo de Jarras con las mismas condiciones de pH y dosis en todos los vasos. Al finalizar el período de mezcla rápida se procede de la siguiente forma:

Se flocula durante 5 minutos, se retira la paleta del primer vaso y se deja sedimentar por 15 minutos, los siguientes vasos se retiran en los tiempos que se indican:

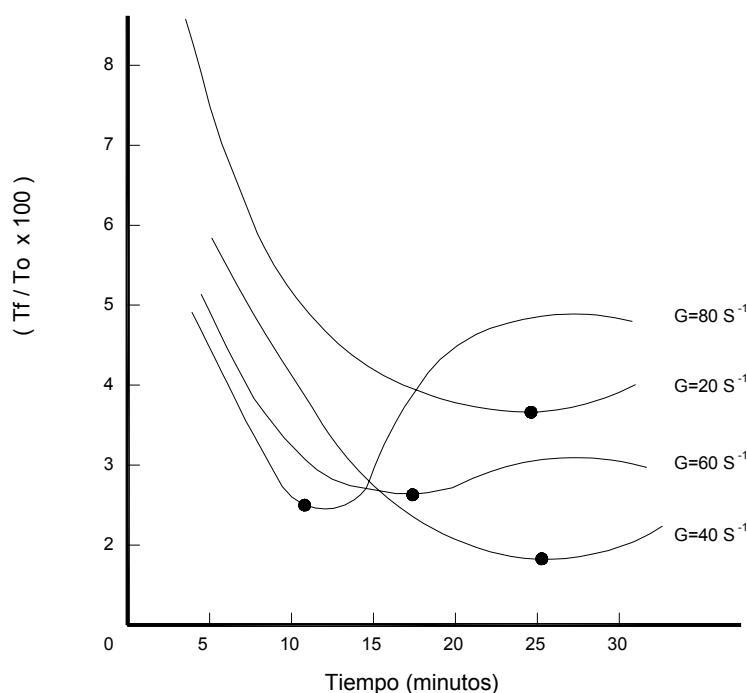
- Vaso 2 a los 10 minutos.
- Vaso 3 a los 15 minutos.
- Vaso 4 a los 20 minutos.
- Vaso 5 a los 25 minutos.
- Vaso 6 a los 30 minutos.

En todos los vasos, luego de retirar la paleta se deja sedimentar por 15 minutos.

- Se toman las turbiedades en el sobrenadante de cada uno de los vasos y se calcula el porcentaje de remoción como  $Tf/To$  donde Tf: turbiedad final y To: Turbiedad inicial
- El mismo ensayo se repite para distintas velocidades de rotación de las paletas o sea para distintos gradientes.

Como ejemplo, se presentan en la **Figura 4** los resultados obtenidos en una planta de tratamiento de San José, Costa Rica. Como se puede ver, para un gradiente de 40 1/seg y 24 minutos de tiempo de floculación se obtienen los mejores resultados en remoción de turbiedad.

En el caso de floculadores hidráulicos, es necesario extraer muestras del final de las cámaras, para observar si se ha producido un floc sedimentable. Se extrae una muestra en una probeta de un litro, se deja sedimentar durante 20 minutos (o el mismo tiempo que se utiliza en el ensayo de jarras) se mide la turbiedad del sobrenadante y se compara con la obtenida en el Ensayo de Jarras.

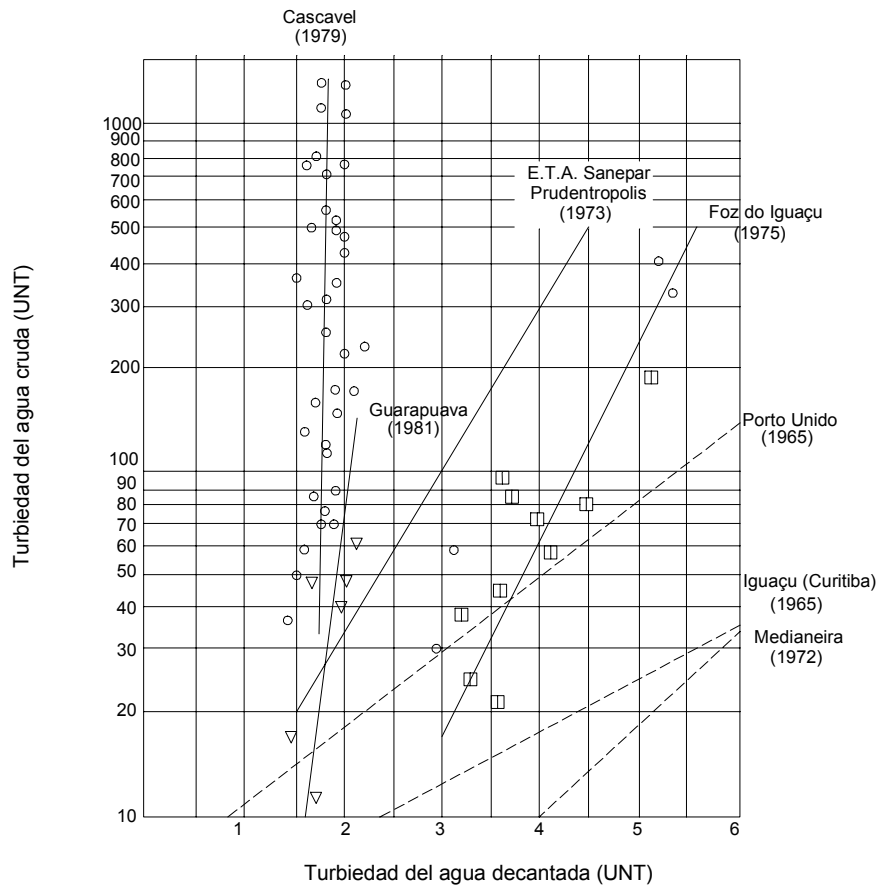


**Figura 4.** Resultados del ensayo para determinación de gradientes y tiempos de floculación

Si la turbiedad es mucho mayor hay que determinar si el problema es una dosis incorrecta de coagulante o existen problemas en el proceso de floculación (gradientes inadecuados, tiempos de retención reales muy inferiores a los teóricos debido a cortocircuitos, rotura del floc en algún punto, etc.).

#### ***Turbiedad de agua decantada versus turbiedad de agua cruda***

La eficiencia de las etapas de coagulación y floculación puede ser evaluada elaborando gráficos con los valores de turbiedad del agua cruda versus los valores de turbiedad del agua decantada a lo largo de un año, por ejemplo. Para ello se pueden tomar promedios mensuales, calculados a partir de los promedios diarios. El período se elegirá de acuerdo con las variaciones que presenta el agua cruda. Si se producen variaciones dentro de un mismo día, puede interesar hacer el gráfico para un día con los valores horarios. Si el proceso de coagulación –floculación se lleva a cabo en la forma correcta, el gráfico debe dar por resultado una recta vertical. Esto quiere decir que independientemente de la turbiedad del agua cruda, se obtiene una turbiedad constante en el agua decantada. En la **Figura 5** se puede ver un gráfico proporcionado por Azevedo Netto y Carlos Richter que muestra la relación entre la turbiedad del agua cruda y la del agua decantada para distintas plantas de tratamiento del Brasil con tratamientos convencionales y con nuevas tecnologías.



**Figura 5.** Relación entre turbiedad de agua cruda y agua decantada en distintas plantas del Brasil

### 7.3. PROCESO DE SEDIMENTACIÓN

Los sedimentadores horizontales convencionales, si han sido correctamente diseñados, requieren poca supervisión por parte de los operadores, salvo la remoción regular de los sólidos acumulados y el control de la turbiedad del agua decantada.

En los sedimentadores que contienen sistemas mecánicos de extracción de barros ya sea por barredores o sistemas de vacío, no deben dejarse acumular los lodos para evitar sobrecargas en los equipos y para evitar el arrastre de flóculos en el agua tratada.

En los sedimentadores con limpieza manual, la frecuencia de limpieza se debe programar de acuerdo al diseño del reactor, el tipo y volumen de los lodos producidos y la calidad del agua sedimentada que va a los filtros, siendo éste último punto el factor crítico.

Si los sólidos tienen gran cantidad de materia orgánica, la frecuencia de muestreo deberá hacerse más frecuentemente que lo necesario desde el punto de vista del volumen

acumulado, para minimizar la posibilidad del desarrollo de olores y sabores en el agua sedimentada.

La determinación más sencilla para evaluar la eficiencia del proceso de sedimentación es la medición de las turbiedades a la entrada y a la salida de cada una de las unidades. Estas determinaciones deben realizarse a distintas horas del día porque los caudales generalmente son variables.

La misma prueba que se describió en el punto anterior, permite comprobar si los sedimentadores están funcionando adecuadamente. Una vez que se demostró que el proceso de floculación es adecuado, se deja extraer una muestra tomada a la entrada de los sedimentadores en una probeta de un litro, se deja sedimentar por un período igual al tiempo de retención teórico en los sedimentadores y se determina la turbiedad residual.

En los sedimentadores con mantos de lodos la floculación y la sedimentación se realizan en el mismo reactor. El agua a tratar ingresa por el centro de la unidad la cual se encuentra agitada por la acción de sistemas mecánicos que permiten la coagulación/floculación de los sólidos presentes en el agua cruda. Generalmente, se puede realizar un ajuste en la velocidad de los rotores de la zona donde se produce la floculación, de modo de trabajar con el gradiente óptimo. Otra de las herramientas de que dispone el operador para controlar el proceso es la variación del caudal de recirculación de lodos. Para determinar los gradientes óptimos y la dosis de coagulante en este tipo de unidades es conveniente contar con una planta piloto que simule el proceso. En la planta La Atarjea que abastece a la ciudad de Lima, en Perú, se trabaja de esta forma.

En la zona de sedimentación de este tipo de unidades, lo único que se puede controlar es el nivel del manto de lodos. Este nivel se podrá mantener con extracciones periódicas de lodos tomando como criterio de control la pérdida de carga de la unidad o bien el nivel de turbiedad del efluente. Es importante tener en cuenta que este nivel es muy difícil de controlar y el operador debe ser consciente del efecto que causa sobre el mismo cualquier variación en las condiciones de operación, como por ejemplo los caudales, las dosis, etc. En especial este tipo de unidades presentan problemas cuando hay interrupciones en el servicio o cuando se operan sólo durante una parte del día. En esos casos, se requiere un cierto tiempo para que el sistema entre en régimen.

## **7.4. PROCESO DE FILTRACIÓN**

### **7.4.1. Filtración Rápida**

El control del proceso de filtración es muy importante por varias razones:

- En general, en las plantas de tratamiento de nuestro país, es la última barrera para eliminar los microorganismos que no elimina la desinfección.
- La dificultad en la detección de virus y parásitos que deben ser eliminados durante la filtración implica la búsqueda de parámetros subrogantes que permitan un control efectivo del proceso.
- En muchos casos, un adecuado control del proceso, constituye una herramienta valiosa para la optimización del proceso.

En el proceso de filtración interesa fundamentalmente controlar:

- La calidad del agua filtrada durante todo el proceso de filtración.
- El estado del manto filtrante
- El proceso de lavado

#### **7.4.1.1. Control de la Calidad del Agua Filtrada**

##### ***Turbiedad***

La medida de la turbiedad se ha usado tradicionalmente para controlar el proceso de filtración. Los valores de turbiedad establecidos en las normas han disminuido progresivamente en función de los estudios que han relacionado niveles de turbiedad con la calidad microbiológica del agua tratada, de modo tal que actualmente se considera como un parámetro sanitario.

El Departamento de Protección Ambiental del Estado de Pennsylvania de los Estados Unidos en 1996, llegó a la conclusión de que existía una relación entre los picos de turbiedad y la aparición de *Giardia* en el efluente de los filtros y que la concentración de los quistes podía incrementarse en 50 veces con sólo un aumento de 0,1 UNT en la turbiedad. Sobre la base de la experiencia recogida en la evaluación de las 300 plantas existentes en el mencionado Estado y en estudios anteriores, el Departamento recomendó que todas las plantas debían tener como objetivo el mantener una turbiedad de 0,1 UNT en el efluente de cada uno de los filtros.

Actualmente, existe un programa de participación voluntaria (Safe Water Program) en el que están involucrados la U.S.EPA y la AWWA (American Water Works Association) en el que se recomienda lograr los siguientes objetivos a las Plantas de Tratamiento que participan del mismo: un valor máximo de turbiedad de 0.1 UNT en el efluente combinado de los filtros trabajando en condiciones de régimen, que el período de recuperación luego del lavado de cada filtro sea sólo de 15 minutos y que durante esos 15 minutos la turbiedad no exceda un valor de 0.3 UNT. El período de recuperación se refiere al deterioro inicial que se produce en la turbiedad del agua, luego del período de lavado.

Tal como lo señalan Burlingame et al., la fijación de tales valores de turbiedad que son considerados como muy bajos por los fabricantes de equipos trae aparejado una serie de cuestiones como son la realización de programas de aseguramiento de la calidad de las mediciones y el correcto mantenimiento y calibración de los equipos de medición.

##### ***Contaje electrónico de partículas***

El contaje electrónico de partículas ha sido utilizado en numerosos trabajos de investigación y es usado en plantas de los Estados Unidos para el control del proceso de filtración mediante la instalación de medidores en línea a la salida de cada una de las unidades. En la última edición de los Standard Methods aparece como "método propuesto" con la descripción de los principios en que se basan distintos equipos y con las metodologías para el procesamiento de los datos.

En la mayoría de los instrumentos de contaje de partículas, las mismas pasan a través de una zona sensible donde son medidas individualmente. Los instrumentos crean un pulso

electrónico (voltaje, corriente o resistencia) que es proporcional a una determinada dimensión de la partícula.

Chevalier y Norton realizaron un estudio en cuatro plantas de tratamiento de los Estados Unidos con distintas características en el agua cruda y con distintas condiciones de contaminación de las fuentes. Las principales conclusiones de dicho estudio fueron:

- La remoción de partículas mayores de 5 micras y la remoción de turbiedad son herramientas útiles para evaluar la remoción de *Giardia* y *Cryptosporidium*. Para las cuatro plantas estudiadas, una reducción de 1 orden logarítmico en el conteo de partículas y de turbiedad correlacionó con 0,66 y 0,89 reducciones logarítmicas de *Giardia* y *Cryptosporidium*, respectivamente.
- El conteo de partículas es sensible a pequeños cambios en la performance de las plantas.
- La ocurrencia de quistes de parásitos en las aguas tratadas en las cuatro plantas estuvo relacionada al mal funcionamiento individual de alguno de los filtros.
- La instalación de contadores de partículas en línea con un sistema de alarmas cuando se llega a un cierto nivel de partículas, puede permitir ajustar las dosis de coagulantes o indicar el momento en que debe lavarse un filtro. Aunque lo mismo puede conseguirse con un turbidímetro en línea, éste no es tan sensible para detectar pequeños cambios en la eficiencia de cada uno de los filtros.
- El análisis de los datos del conteo de partículas en las plantas estudiadas varió entre 17 a 1260 partículas/ml y fue < 100 part/ml para los dos casos en que no se detectaron parásitos en el agua tratada. La ocurrencia de parásitos puede ser correlacionada con conteos de partículas (> 5 micras) superiores a 50 part/ml.

En el estudio realizado en Pennsylvania, ya mencionado, se llegó a una conclusión similar ya que en plantas de potabilización de performance aceptable los conteos de partículas variaron entre 0.11 y 456 part/ml con un promedio de 33 part/ml. Las plantas cuyo funcionamiento no era aceptable arrojaron valores entre 152 y 1536 part/ml.

### ***Análisis microscópico de partículas***

El análisis microscópico de partículas tiene sus antecedentes en los exámenes protistológicos de las aguas filtradas que cuantifican los microorganismos del zoo y fitoplancton pero con la diferencia que incluye también el conteo de partículas no vivas.

Se está utilizando en los Estados Unidos para evaluar la performance de las plantas de tratamiento. El evaluador de una planta usa una gran cantidad de información para establecer finalmente una "clasificación" de la planta de tratamiento que incluye:

- El control operacional de todas las etapas del proceso.
- Los datos de calidad de agua, que incluye en la mayoría de los casos un perfil de las turbiedades de por lo menos uno de los filtros.
- Los resultados del Análisis Microscópico de Partículas.

Muchas veces esta herramienta permite identificar problemas que no son fácilmente observables y pueden revelar un pasaje importante de partículas aún en aguas con

turbiedades menores a 0.5 UNT. Tiene la ventaja, además, frente al conteo electrónico, de que identifica de qué tipo de partículas se trata.

En un trabajo reciente realizado por el ENRESS (Ente Regulador de Servicios Sanitarios de la Pcia. de Santa Fe) y el Centro de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Nacional de Rosario, se utilizó el conteo electrónico de partículas juntamente con la turbiedad y el conteo de plancton. El objetivo del trabajo fue evaluar la influencia de distintas velocidades de filtración en la eliminación de plancton, pero interesa aquí analizar los resultados desde el punto de vista del control del proceso de filtración.

Las mediciones de turbiedad se realizaron con un turbidímetro HACH 2100 AN. El conteo de partículas se realizó con un equipo marca Malvern ALPS 100 L que se basa en el principio de bloqueo de un haz de luz y que mide tamaños de partículas en un rango entre 2 y 150 micrones.

El conteo de plancton se realizó filtrando 2 litros de agua cruda y 5 litros de agua filtrada por una malla de nylon de 20 micras y por tanto no puede equipararse al análisis microscópico de partículas antes descrito. Un resumen de los resultados se presenta en la **Tabla 5**.

| VF<br>(m/h) | Turbiedad<br>(UNT) |        |               | Plancton<br>(organismos/10 litros) |        |               | Partículas totales<br>(número por ml) |        |               | Partículas 3-18 $\mu$<br>(número por ml) |        |               |
|-------------|--------------------|--------|---------------|------------------------------------|--------|---------------|---------------------------------------|--------|---------------|--|--------|---------------|
|             | Entrada            | Salida | Remoc.<br>Log | Entrada                            | Salida | Remoc.<br>Log | Entrada                               | Salida | Remoc.<br>Log | Entrada                                  | Salida | Remoc.<br>Log |
| 5           | 4,45               | 0,45   | 0,995         | 540                                | 1      | 2,732         | 5066                                  | 374    | 1,132         | 3303                                     | 123    | 1,429         |
|             | 2,90               | 0,40   | 0,860         | 640                                | 15     | 1,630         | 4171                                  | 440    | 0,977         | 2740                                     | 177    | 1,190         |
|             | 3,15               | 0,30   | 1,021         | 330                                | 9      | 1,564         | 3981                                  | 365    | 1,038         | 2597                                     | 132    | 1,293         |
| 10          | 3,25               | 0,95   | 0,534         | 144                                | 3      | 1,681         | 5344                                  | 1266   | 0,626         | 3000                                     | 362    | 0,918         |
|             | 3,15               | 0,65   | 0,677         | 118                                | 5      | 1,373         | 5256                                  | 1489   | 0,548         | 3234                                     | 470    | 0,838         |
|             | 2,85               | 0,45   | 0,802         | 64                                 | 3      | 1,329         | 4546                                  | 1030   | 0,645         | 2698                                     | 324    | 0,920         |
| 15          | 2,00               | 0,60   | 0,523         | 1290                               | 60     | 1,333         | 3755                                  | 1627   | 0,364         | 2274                                     | 491    | 0,666         |
|             | 2,60               | 0,55   | 0,675         | 1480                               | 110    | 1,129         | 3372                                  | 1685   | 0,301         | 1978                                     | 551    | 0,555         |
|             | 4,55               | 1,45   | 0,497         | 1810                               | 100    | 1,258         | 5035                                  | 1706   | 0,470         | 2862                                     | 541    | 0,724         |

**Tabla 5.** Resultados obtenidos en el filtro experimental

El análisis de los datos de turbiedad y conteo de partículas demuestra que a pesar de que existe correlación entre las variaciones en la remoción de turbiedad y de partículas para las distintas velocidades, el conteo de partículas es el indicador más sensible de las variaciones de calidad. Puede observarse además que se pueden tener valores muy similares de turbiedad con conteos de partículas totales que difieren en un factor igual a 3.

Los equipos para el conteo de partículas en línea que miden sólo los tamaños que tienen interés sanitario (entre 5 y 15 micras) tienen actualmente un costo accesible y su inclusión en las plantas de tratamiento debiera promoverse. En una primera etapa, se podría incluir en forma experimental en una de las unidades y como parte de un programa de evaluación y optimización del proceso de filtración. De esta forma podrán establecerse las correlaciones con otros parámetros como turbiedad, calidad bacteriológica, calidad protistológica y parasitológica y adoptar niveles de concentraciones de partículas que permitan asegurar un suministro de agua seguro.

#### 7.4.1.2. Manto Filtrante

La integridad del manto filtrante y del manto del sostén de grava (en caso de que exista) debe evaluarse periódicamente. Para ello se requiere que se vacíen los filtros y que el operador inspeccione si la superficie de la arena es pareja, si se observaran cráteres, ya que ello significa que el manto sostén no está en condiciones o que se han roto toberas. El operador debe verificar la altura del manto de arena y extraer una muestra para realizar un análisis granulométrico como el que se describe a continuación.

##### **Análisis granulométrico de las arenas**

El análisis granulométrico de las arenas puede realizarse con dos objetivos distintos:

- Determinar la granulometría de una determinada partida de arena antes de ser colocada en los filtros para comprobar si cumple con las especificaciones establecidas en el proyecto.
- Determinar la granulometría de los lechos de filtros en funcionamiento. En este caso se debe extraer una muestra inalterada mediante un aparato muestreador semejante al que se utiliza para extraer muestras de suelo.

##### *Procedimiento del ensayo:*

- a) Una vez que se ha obtenido la muestra de arena, se procede a su secado en estufa a 100°C durante 12 o 24 hs.
- b) Se pesa una alícuota de 500 o 1000 g y se coloca en una serie de tamices.
- c) Una vez colocada la muestra, la serie de tamices se somete a vibración intensa ya sea manualmente o mecánicamente para que el material se clasifique en ellos según su tamaño.
- d) Una vez realizado el tamizado se pesa lo que ha quedado retenido en cada tamiz y lo que pasó por el último tamiz. Se anota en una planilla, el número de tamiz, el tamaño de la malla y el peso retenido.
- e) A continuación se completa la planilla realizando los siguientes cálculos: el peso retenido en cada tamiz se acumula y se obtiene el peso que pasa, restando al peso de la muestra el peso retenido acumulado. Se calculan los porcentajes correspondientes.

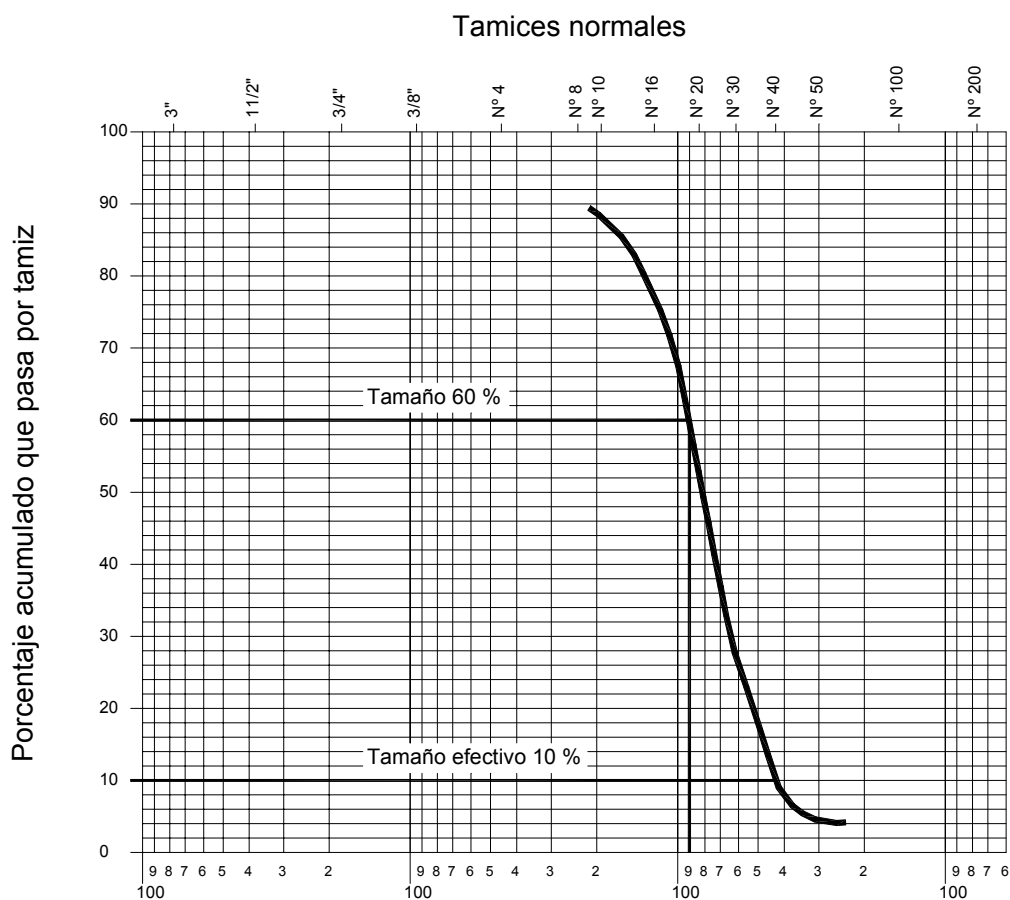
Se gráfica en papel semilogarítmico el tamaño de la abertura de cada tamiz y el porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz. Una vez dibujada la curva granulométrica, se determina el diámetro efectivo ( $D_e$ ) como el tamaño del tamiz que deja pasar un 10% de la muestra y el  $D_{60}$  como el tamaño del tamiz que deja pasar el 60% de la muestra. Con esos dos valores se calcula el coeficiente de uniformidad como:

$$C_u = D_{60}/D_e$$

En la **Tabla 6** se incluye un ejemplo de un análisis granulométrico y en la **Figura 6** se ha dibujado la curva correspondiente.

| 1<br>Tamiz serie<br>US | 2<br>Tamaño de la<br>abertura<br>(mm) | Peso (gr.)               |   |   | 6 %<br>que pasa<br>acumulado<br>por tamiz<br><b>¡Error!<br/>Imposible<br/>crear objetos<br/>modificando<br/>códigos de<br/>campo.</b> |
|------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---|---|---|
|                        |                                       | 3<br>Retenido a<br>(gr.) | 4<br>Retenido<br>acumulado<br>$\Sigma \alpha$ | 5<br>Que pasa<br>acumulado<br>$200 - \Sigma \alpha$ |   |
| 12                     | 1,68                                  | 20                       | 20  | 180   | 90  |
| 16                     | 1,19                                  | 25                       | 45  | 155   | 77,5  |
| 20                     | 0,841                                 | 45                       | 90  | 110   | 55  |
| 30                     | 0,595                                 | 55                       | 145   | 55  | 27,5  |
| 40                     | 0,420                                 | 40                       | 185   | 15  | 7,5   |
| 50                     | 0,297                                 | 14                       | 199   | 1   | 0,5   |
| < 50                   | < 0,297                               | 1                        | 200   | 0   |   |
| Total muestra: 200     |                                       |                          |   |   |   |

**Tabla 6.** Resultados de un análisis granulométrico



**Figura 6.** Curva granulométrica

### 7.4.1.3. Lavado de los Filtros

La mejor forma de evaluar si el proceso de lavado es adecuado es observar el proceso. Si cuando se inicia el lavado el agua o el aire salen primero por algún punto, este hecho es una indicación de que existen caminos preferenciales por defectos en el manto sostén de grava o por rotura de toberas.

Es también interesante seguir las turbiedades durante el proceso de lavado. Si éste dura por ejemplo 10 minutos, se mide la turbiedad cada dos minutos y se dibuja luego la gráfica de la turbiedad en función del tiempo. Si se obtiene una turbiedad más o menos constante en las últimas muestras, esto significa que el tiempo de lavado es el correcto.

#### **Formación de bolas de lodo**

Un aspecto importante es determinar la cantidad de bolas de lodo existentes en el manto. La presencia de bolas de lodo se debe a una operación de lavado deficiente. Como el material retenido no es removido completamente, se va acumulando y forma verdaderas bolas de lodo, que con el tiempo dificultan el proceso de filtración.

Un ensayo que se puede realizar para seguir el contenido de bolas de lodo en el manto filtrante es el siguiente (Arboleda, Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, 1992).

#### *Procedimiento:*

- a) Drenar el agua del filtro hasta 30 cm por debajo del nivel de la arena.
- b) En cuatro puntos del manto introducir un muestreador (semejante al que se usa para extraer muestras de suelo sin alterar su perfil) y extraer un volumen de aproximadamente 1 litro.
- c) Componer una muestra con las cuatro muestras puntuales y pasarlas por un tamiz de abertura el que se sumerge en un balde. El tamiz se mueve suavemente dentro del balde para que se desprenda la arena y queden retenidas las bolas de lodo.
- d) Las bolas de lodo que han quedado retenidas en el tamiz se transfieren a una probeta que tiene una cierta cantidad de agua, por ejemplo, una probeta de 500 mL con 200 mL de agua. Se determina el volumen de las bolas de lodo recuperadas leyendo la elevación del nivel de agua que se registra en la probeta.
- e) Se calcula el porcentaje de volumen de bolas respecto al volumen total de muestra extraída y se puede calificar la condición del filtro según lo especificado en la **Tabla 7**.

| % de volumen de bolas de lodo | Condiciones del medio filtrante |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 0 -0,1                        | Excelente                       |
| 0,1-0,2                       | Muy bueno                       |
| 0,2-0,5                       | Bueno                           |
| 0,5-1,0                       | Regular                         |
| 1,0-2,5                       | De regular a mal                |
| 2,5-5,0                       | Malo                            |

|     |          |
|-----|----------|
| 7,5 | Muy malo |
|-----|----------|

**Tabla 7.** Clasificación de los filtros según el porcentaje de bolas de lodos

### **Control de la expansión del lecho filtrante**

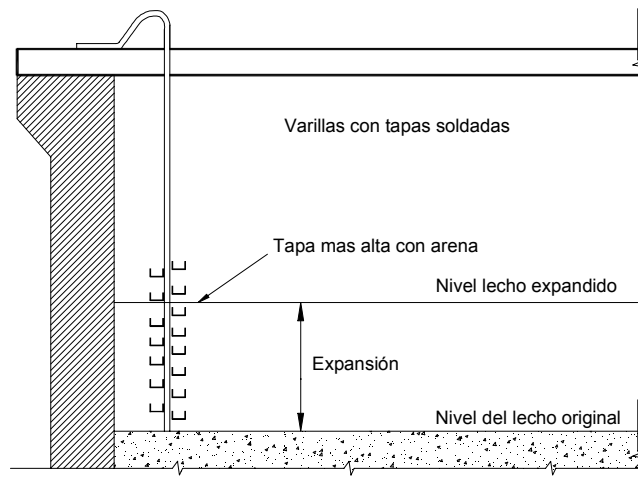
Un aspecto importante a controlar durante el proceso de lavado, es la expansión del lecho filtrante para determinar si corresponde a lo previsto en el proyecto.

Para determinar el porcentaje de expansión, se procede de la siguiente forma:

- Se mide la distancia desde el borde del filtro hasta la superficie de la arena, con las válvulas del afluente y del efluente cerradas.
- Durante el proceso de lavado se mide la distancia desde el borde del filtro y el lecho filtrante expandido. La diferencia entre las dos lecturas será el aumento de espesor y el porcentaje de expansión se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Expansión} = \frac{\text{Diferencia de altura}}{\text{Espesor del lecho}} \cdot 100$$

Como puede resultar difícil medir la distancia desde el borde del filtro al lecho expandido, se puede emplear un dispositivo como el que se muestra en la **Figura 7**. El dispositivo consiste en una varilla a la que se le sueldan tapas metálicas de botella cada 2 cm. Al dejarla fija encima del lecho durante el lavado, las tapas se llenan hasta la altura correspondiente a la que haya subido el lecho. Cuando se suspende el lavado, se mide la distancia entre la tapa más alta que se encuentra llena y la superficie del manto filtrante y esa será la expansión. En este caso, el porcentaje de expansión se calcula dividiendo directamente el valor de la expansión por el espesor total del lecho y multiplicando por cien.



**Figura 7.** Dispositivo para medir la expansión del lecho filtrante durante el lavado

### **Lavado automático de los filtros**

La necesidad de lavar un filtro es determinada por los siguientes factores:

- Se ha llegado a la máxima pérdida de carga disponible.

- La turbiedad ha aumentado por sobre un valor previamente establecido.
- La carrera de filtración ha llegado a un número de horas previamente establecido.

La decisión de lavar un filtro no debe basarse solamente en uno de los tres factores. Si el filtro se lava cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible se puede presentar un incremento del valor de turbiedad por sobre los valores admisibles. En forma similar, un filtro puede alcanzar la máxima pérdida de carga sin que haya incrementos en la turbiedad, pero se pueden crear presiones negativas dentro del manto. Por otra parte, un filtro con agua cruda de muy baja turbiedad puede operar por períodos muy prolongados de hasta 100 horas o más, pero esto tampoco es deseable pues se puede producir una acumulación de materia orgánica dentro del filtro con el consecuente aumento de bacterias o la aparición de olores y sabores desagradables. En general, se considera aceptable una carrera de filtración mayor de 15 horas y menor de 36 a 40 horas.

En el proyecto de los filtros se debe definir en qué momento deben lavarse y si la operación será manual o automática. La tendencia actual es colocar un turbidímetro o un medidor de partículas en cada uno de los filtros y la automatización podrá hacerse en base a la señal de dichos instrumentos, aunque también deberá conocerse en todo momento la pérdida de carga. La automatización de los filtros será parte del Control Automático de la Planta.

#### 7.4.2. Filtración Lenta

El papel del operador es de fundamental importancia en la operación de un sistema que posee filtros lentos, ya que generalmente, se trata de poblaciones aisladas del medio rural, donde es el único responsable de la calidad del agua. Por eso es importante preparar un programa de operación que puede ser semejante al propuesto Visscher y otros y que se presenta en la **Tabla 8**.

| Frecuencia                           | Actividad  |
|--------------------------------------|--|
| Diariamente                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verificar el estado de la obra de captación de agua cruda (algunas captaciones se pueden visitar con una frecuencia baja)</li> <li>▪ Revisar el filtro lento de arena: <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Verificar y ajustar la velocidad de filtración</li> <li>➢ Verificar el nivel del agua en el filtro</li> <li>➢ Verificar el nivel del agua en la cámara de agua filtrada</li> <li>➢ Retirar el material flotante</li> <li>➢ Tomar muestras de agua y determinar su calidad</li> </ul> </li> <li>▪ Revisar todas las bombas</li> <li>▪ Llevar el registro diario de la planta de tratamiento</li> </ul> |
| Semanalmente                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revisar y engrasar las bombas y partes móviles</li> <li>▪ Verificar la existencia de combustible y solicitar más si es necesario</li> <li>▪ Inspeccionar la red de distribución y grifos domiciliarios y reparar cuando sea necesario.</li> <li>▪ Comunicarse con los usuarios</li> <li>▪ Limpiar el sitio de la planta</li> </ul>  |
| Mensualmente o con menos frecuencia  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Raspar el lecho filtrante o filtros.</li> <li>▪ Lavar la arena raspada y almacenarla.</li> </ul>  |
| Anualmente o con menos frecuencia    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lavar la cámara de agua filtrada</li> <li>▪ Verificar que el filtro y la cámara de agua filtrada no tengan fugas</li> </ul>   |
| Cada dos años o con menos frecuencia | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Realizar rearenamiento de las unidades de filtración.</li> </ul>  |

**Tabla 8.** Calendario de actividades del operador en un sistema de tratamiento con filtros lentos de arena

Las operaciones más importantes a realizar se describen a continuación:

### ***Puesta en marcha***

Un filtro lento de arena, ya sea nuevo o luego de una limpieza, debe ponerse en marcha de la siguiente forma:

- Llenar por la parte inferior.
- Comenzar a filtrar el agua cruda a velocidades muy bajas hasta que se produzca la maduración del filtro. Las velocidades se irán incrementando gradualmente hasta llegar a la velocidad de diseño en un período que puede ser de 4 a 7 días. Durante el período de maduración, el agua se debe enviar al desagüe si no existe un proceso posterior de cloración.
- Para determinar si el filtro está maduro deberán extraerse muestras con una frecuencia diaria y efectuar análisis bacteriológicos. El filtro estará maduro cuando se obtenga la remoción bacteriológica prevista en el diseño. Si no se lograra en un tiempo razonable, habrá que determinar las causas y probablemente sea necesario, disminuir las velocidades de filtración.

### ***Operación normal***

Es fundamental controlar la turbiedad del agua que llega al filtro la que no debe ser mayor de 10 UNT y el número y tipo de algas, en los casos en que la fuente sea una represa o canal de riego. El control del tipo de algas deberá ser realizado por un profesional capacitado.

Una vez que se ha alcanzado la pérdida de carga máxima, debe sacarse el filtro de funcionamiento para proceder a su limpieza.

### ***Limpieza***

Para realizar la limpieza se debe drenar el sobrenadante y bajar el nivel de agua hasta una altura por debajo del manto, que permita caminar sobre él. La cantidad de arena a remover de la superficie del filtro depende de la profundidad a la que hayan penetrado los sólidos. Generalmente, se extraen entre 2 y 5 cm. La arena que se retira debe lavarse en instalaciones destinadas a tal efecto.

Se procede a efectuar sucesivas limpiezas hasta que la profundidad del manto de arena sea de 0,60 m, en cuyo caso, se procede a reponer arena lavada para lograr la profundidad inicial.

Los pasos para proceder al lavado de la arena se detallan en la **Tabla 9** (extraída de Vischeer y otros).

| Actividad  | Acciones claves   |
|--|---|
| Colocar la arena raspada o nueva sobre la plataforma de lavado | ▪ Es preciso lavar inmediatamente los raspados para evitar olores desagradables   |
| Lavar la arena   | ▪ Dirigir el chorro de la manguera sobre la arena y removerla el procedimiento generalmente toma una hora                           |
| Comprobar que la arena está limpia                             | ▪ Frotar la arena entre las manos   |
| Secar la arena   | ▪ Quitar el vertedero para drenar el agua de la plataforma de lavado<br>▪ Esparcir la arena sobre la plataforma para secarla al sol |
| Guardar la arena lavada  | ▪ Guardar apropiadamente la arena lavada y seca para prevenir su contaminación  |

**Tabla 9.** Operaciones para el lavado de arena

### **Rearenamiento**

#### **Prefiltros de Grava**

Un filtro de arena generalmente cuenta con algún sistema de filtración gruesa preliminar para eliminar sólidos suspendidos. Los filtros gruesos pueden ser de flujo horizontal o vertical y de una o varias etapas, pero su operación es muy similar.

Antes de iniciar la operación del filtro, debe llenarse y efectuarse un lavado, mediante la apertura de la válvula de drenaje, de modo de eliminar las impurezas que puedan haber quedado en la grava. En algunos casos, la operación debe repetirse hasta asegurar la limpieza del manto.

Una vez que se ha puesto en marcha el filtro grueso, la mejor manera para controlar el proceso es la determinación de turbiedad a la entrada y a la salida. Se debe proceder al lavado por drenaje inferior del agua contenida en el filtro, cuando la turbiedad sobrepase de un valor previamente establecido, por ejemplo, 10 UNT. En el caso de filtros gruesos en varias etapas, la frecuencia de limpieza podrá no ser la misma en cada una de ellas.

Después de reiniciada la operación deberá medirse la pérdida de carga, para verificar la efectividad del lavado. En algunos casos, podrá complementarse la limpieza por drenaje de fondo con una inyección de agua por la parte superior del filtro, mediante mangueras.

Luego de un período prolongado de tiempo de operación podrá ser necesario, proceder a sacar la grava para lavarla fuera del filtro y luego volver a colocarla.

## **7.5. DESINFECCIÓN**

El control del proceso de desinfección incluye :

- Determinar el caudal, para controlar el tiempo de contacto en la cámara de cloración y ajustar la dosis de desinfectante.
- Controlar la concentración del desinfectante.
- Verificar que el punto de aplicación sea el correcto.

El proceso de desinfección más utilizado en nuestro país es la cloración, por lo que en adelante, se hará referencia a este proceso.

La dosis de cloro a aplicar dependerá del punto de aplicación (precloración, postcloración, recloración) y del objetivo que se persigue. En general, el ensayo a realizar consistirá en colocar el agua a tratar en un número dado de vasos de precipitado, agregar dosis crecientes de cloro, dejar actuar por un tiempo dado, que dependerá del tiempo de contacto establecido, y luego de ese tiempo determinar la concentración de algún organismo indicador y el cloro residual.

La determinación de cloro residual en el agua que sale de la planta, es una medida rápida de la eficiencia con que se está llevando a cabo el proceso de desinfección. El cloro residual se puede determinar por una serie de métodos, de los cuales el más difundido es el de la ortotolidina. Sin embargo, el método ha sido eliminado de los Standard Methods, por la naturaleza tóxica de dicha sustancia y actualmente el método más difundido es el DPD (dietil-p-Fenilene-diamina).

Existen analizadores de cloro automáticos en línea que permiten operar automáticamente los dosificadores de cloro y puede ser conveniente su inclusión en los siguientes casos:

- Cuando el caudal es muy variable.
- Cuando la demanda de cloro varía durante el día.
- Cuando se requiere mantener registros continuos de la concentración de cloro residual.

Los analizadores son equipos delicados que requieren una calibración y mantenimiento adecuados, por lo que deben instalarse en plantas importantes, donde se pueda asegurar esas condiciones.

## **7.6. TRATAMIENTOS ESPECIALES**

### **7.6.1. Flotación**

La operación de un sistema de Flotación por Aire Disuelto (FAD) es relativamente simple una vez que el sistema está en régimen y funciona según los parámetros de diseño. Es de la mayor importancia que el operador respete dichos parámetros ya que los tanques de presurización y las bombas auxiliares frecuentemente no funcionan correctamente fuera del rango previsto en el diseño.

La óptima operación de un sistema FAD requerirá que el operador determine cuál es la velocidad y la frecuencia de operación de los barredores superficiales. Los mismos son operados en forma muy lenta realizando un barrido completo generalmente cada 30 minutos.

Muchas instalaciones tienen un temporizador off-on que permite un barrido durante 10-15 minutos cada hora; este tipo de operación resulta beneficioso para permitir el desarrollo de la capa flotante. El tipo de operación depende de la cantidad de sólidos y de la eficiencia en remoción que se desea obtener que deberá ser de 95-98%, mientras que la altura promedio de la capa flotante puede ser de 10-20 cm.

La eficiencia de remoción se controlará mediante la determinación de sólidos suspendidos y turbiedad a la entrada y a la salida del sistema. Una buena manera de ver cómo está funcionando el proceso es tomar una muestra (en la misma cámara de flotación) en una probeta de un litro. De esta forma se puede comprobar cuál es el espesor de la capa flotante.

### **7.6.2. Intercambio Iónico**

Las instalaciones de intercambio iónico se operan en forma similar a los filtros granulares. En general el agua que ingresa a este tipo de equipos está libre de sólidos suspendidos que puedan colmatar el lecho.

La única operación que debe realizarse con cuidado es la regeneración del medio cuando su capacidad se ha agotado. Los métodos de aplicación del regenerante, el tipo de regenerante, su concentración, tiempo de contacto y tiempo de enjuague varían para cada instalación y deberán ser proporcionados por el fabricante. Las recomendaciones del proveedor del equipo deberán respetarse al pie de la letra para mantener la eficiencia del sistema.

Muchos regenerantes son corrosivos y requieren materiales especiales para su almacenamiento y precauciones especiales para su manipuleo. Los problemas de mantenimiento de un equipo de este tipo son más críticos que en una planta de filtración convencional.

La disposición de los residuos del proceso de regeneración y el agua de enjuague presentan problemas especiales que deberán ser tenidos en cuenta (ver Capítulo IX – Tratamiento y Disposición de Residuos de Plantas Potabilizadoras y Reuso de Agua de la presente Fundamentación).

### **7.6.3. Adsorción**

#### **7.6.3.1. Carbón Activado en Polvo**

La operación de adición de carbón activado tiene requerimientos semejantes al agregado de cualquiera de los productos químicos que se han considerado con anterioridad. Será necesario determinar la dosis óptima mediante Ensayos de Jarras y calibrar los equipos dosificadores.

#### **7.6.3.2. Carbón Activado Granular**

Al igual que en los equipos de intercambio iónico, el agua que ingresa a los filtros de carbón activado granular, está libre de sólidos suspendidos para evitar su colmatación y la pérdida de la capacidad de adsorción.

Cuando los ensayos realizados en el laboratorio indican que el filtro ha perdido su capacidad de adsorción, el carbón debe ser reactivado.

En plantas pequeñas, deberá realizarse un estudio para comparar el costo de remover el carbón, llevarlo a una instalación donde pueda ser reactivado y luego volver a colocarlo, frente al costo de utilizar carbón nuevo. En plantas grandes, el estudio puede indicar la conveniencia de prever instalaciones para la reactivación en el lugar.

## 8. SISTEMAS DE INFORMACION Y REGISTROS

Llevar adecuados registros es una parte importante de la operación de las plantas de tratamiento. Si se llevan a cabo informes completos, claros y concisos de lo que ha ocurrido ellos pueden ser útiles para prever situaciones futuras y para comprender e interpretar los resultados del tratamiento.

La experiencia diaria provee datos históricos sobre la performance de la planta. Los distintos registros que pueden llevarse en una planta pueden cumplir las siguientes funciones:

- Satisfacción de requerimientos legales.
- Ayudar al operador a resolver problemas.
- Proveer una alerta ante condiciones cambiantes en la calidad del agua cruda.
- Probar que el agua tratada cumple con las normas de calidad vigentes.
- Ayuda a investigar quejas de los usuarios.
- Proveer datos sobre costos del tratamiento.
- Proveer la base para los informes mensuales y anuales.

Los registros pueden ser simples o complejos. Deben ser realistas y adaptarse al tipo de tratamiento y al tamaño de la planta, así como al número de operadores. Debe analizarse con detenimiento, cuales datos son esenciales y útiles y luego elaborar planillas que sean fáciles de completar.

Por ejemplo, uno de los registros de calidad indispensables cuando se tratan aguas superficiales son los datos de turbiedad del agua cruda, agua sedimentada, agua filtrada en el efluente final de la planta y en cada uno de los filtros.

La frecuencia en la toma de muestras deberá determinarse en cada caso particular, según las variaciones en la calidad del agua cruda. En la Surface Water Treatment Rule (SWTR) de los Estados Unidos, se exige una frecuencia mínima de una muestra cada 4 horas para el agua tratada.

Es conveniente elaborar gráficos que permitan visualizar cómo funcionan las distintas etapas. Por ejemplo, si se grafican las turbiedades promedio diarias del agua cruda, agua sedimentada y agua filtrada a lo largo de un mes por ejemplo, podrá visualizarse la eficiencia de cada etapa y cómo influyó la calidad del agua cruda sobre la sedimentación y a su vez, la calidad del agua sedimentada sobre la etapa de filtración.

El mismo gráfico puede hacerse para un día y en ellos pueden visualizarse los errores operativos, por ejemplo, el aumento de turbiedad producida en el agua sedimentada a raíz del aumento de la turbiedad en el agua cruda, si no se ha cambiado la dosificación de coagulantes.

Pueden construirse gráficos de frecuencia para las turbiedades del agua filtrada a lo largo del año, y de esa manera visualizar cuantas veces el agua no cumplió con el requerimiento establecido en las normas de calidad.

Las mediciones que se realizan diariamente, se vuelcan en planillas diarias y éstas en planillas mensuales.

En el ANEXO del presente Capítulo se proporciona un ejemplo de planilla diaria y mensual para una planta con procesos de clarificación convencionales.

### ***Informes***

Los registros son esenciales para la operación de la planta pero no proveen a los supervisores y a los organismos que ejercen el control con un completo panorama sobre la performance de la planta, por lo que deberán elaborarse informes mensuales, cuatrimestrales o anuales donde se detalle la calidad del agua tratada, los problemas ocurridos, las soluciones adoptadas y los planes para el futuro.

Los informes deben ser completos, claros y fácilmente entendibles por parte de cualquiera, incluso por el público. Los gráficos mencionados en el punto anterior y otro tipo de gráficos, deberán incluirse y permitirán visualizar la información y ayudar a la interpretación de los datos.

Debe incluir datos sobre consumo de productos químicos, costos de energía eléctrica y otros costos asociados al tratamiento.

## 9. SEGURIDAD EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

El personal de una planta es su capital más importante, por lo tanto, un aspecto esencial en la operación de ella es la protección de su personal de accidentes y de enfermedades laborales. Esto exige el diseño y la implementación de un programa activo de seguridad.

La aceptación pasiva de los reglamentos y prácticas de seguridad no evitará los accidentes ni los inconvenientes que derivan de éstos en la operación normal de la planta. Por lo tanto, será indispensable que cada empleado y operario se identifique plenamente con los objetivos del plan de seguridad.

Para ello podrán utilizarse cursos de capacitación/concientización, carteles, boletines y artículos de difusión con temas de seguridad y prácticas de trabajo seguras. La pertenencia a organizaciones de seguridad y el establecimiento de premios por períodos sin accidentes pueden incentivar el trabajo en este tema.

En todos los casos, el programa de Higiene y Seguridad Laboral de la planta deberá ajustarse a la normativa nacional y local en el tema. Entre los aspectos fundamentales que debe considerar un programa de este tipo figuran los siguientes:

- Divulgación de los conocimientos sobre los riesgos y manipulación adecuada de los productos químicos empleados en las plantas de tratamiento y abastecimiento de agua. En este sentido será útil consultar con los proveedores y con textos específicos como por ejemplo la Guía de Respuesta en Caso de Emergencia Química (CIQUIME, Secretaría de Política Ambiental, Provincia de Buenos Aires, 1998).
- Estricto cumplimiento de los reglamentos y adiestramiento en el empleo adecuado de anteojos de seguridad, respiradores y máscaras de gas.
- Estudio de las posibilidades y causas de los accidentes eléctricos que pueden registrarse en la planta.
- Empleo adecuado de herramientas y equipos de generación de energía.
- Empleo adecuado de escaleras.
- Técnicas de respiración artificial y primeros auxilios.

### 9.1. PLAN DE CONTINGENCIAS

La planta debe contar con un plan de contingencias a fin de enfrentar eventuales accidentes tales como escapes de cloro o derrames de otros productos químicos. Este plan debería incluir como mínimo los siguientes aspectos:

- Identificación de las rutas de transporte e instalaciones que contienen productos químicos peligrosos.
- Elaboración de procedimientos de respuesta para enfrentar el problema dentro y fuera de la planta.

- Asignación de responsabilidades a asumir por los distintos miembros del personal ante la emergencia.
- Redacción del plan de emergencia.
- Notificación de los procedimientos de emergencia.
- Elaboración/diseño de métodos/sistemas para determinar la existencia de un escape o derrame.
- Plan de evacuación
- Programa de entrenamiento del personal para enfrentar emergencias.
- Programa y procedimientos para llevar a cabo el plan de contingencias.

## **9.2. PROGRAMA DE SEGURIDAD EN LAS PLANTAS**

Los programas de seguridad pueden variar de planta en planta de acuerdo con sus características, capacidad productiva y complejidad. Sin embargo, todos los programas de seguridad deben contemplar como mínimo los siguientes aspectos:

- Una política escrita de higiene y seguridad en el trabajo.
- Una comisión/comité de higiene y seguridad en el trabajo.
- Entrenamiento en higiene y seguridad en el trabajo.

Además, este programa debe proveer asistencia médica y primeros auxilios así como un manual que suministre información para prevenir accidentes.

## **9.3. POLÍTICA ESCRITA DE HIGIENE Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO**

La política escrita de higiene y seguridad en el trabajo es la piedra fundacional sobre la que se desarrollará el trabajo del personal de la planta en este tema. Esta declaración es un mensaje fundamental para el personal demostrando el apoyo del máximo nivel de decisión de la planta a esta política. Los responsables de la dirección del establecimiento deben apoyar esta política con sus acciones y también con los recursos económicos necesarios.

Esta política debe ser comprendida por todo el personal de la planta y además debe adecuarse a sus necesidades. Una política adecuada de seguridad define las metas y objetivos de preservar la salud del personal frente a los riesgos de heridas o enfermedades así como evitar los inconvenientes que ellas provocan en la operación de la planta.

Asimismo asigna responsabilidades, identifica riesgos, desarrolla y establece procedimientos a seguir y define programas de capacitación para el personal en procedimientos de trabajo seguros.

## 9.4. COMITÉ DE HIGIENE Y SEGURIDAD

El comité de higiene y seguridad debe estar integrado por miembros de distintos niveles organizativos de la planta: gerencia, supervisión y operarios. La principal tarea de este comité es promover el programa de seguridad en el trabajo del establecimiento. Algunas de las tareas específicas que este comité puede realizar son:

- Promover el programa de higiene y seguridad laboral.
- Llevar a cabo inspecciones.
- Proponer y brindar entrenamiento.
- Mantener registros.
- Desarrollar un manual de higiene y seguridad en el trabajo.

## 9.5. ENTRENAMIENTO DEL PERSONAL

En primer lugar los supervisores deben tener la actitud y el interés necesarios en higiene y seguridad en el trabajo para comprender las diversas formas en que pueden prevenir accidentes y enfermedades laborales.

De otra forma la higiene y seguridad pueden estar ausentes. La prevención no es fruto de la casualidad sino más bien el resultado de un estudio sistemático de los accidentes y enfermedades laborales y sus causas así como de los métodos para su prevención.

Todos los empleados nuevos deben cumplir con un programa de capacitación en prácticas de higiene y seguridad en el trabajo. Cuando se incorpore equipamiento o procesos nuevos se deberá hacer el entrenamiento correspondiente relacionado con los temas de seguridad.

Un programa de capacitación adecuado tendrá en cuenta como mínimo los siguientes temas de higiene y seguridad en el trabajo:

- Riesgos de la planta de tratamiento.
- Principios de Higiene y Seguridad en el trabajo.
- Equipamiento de protección para el personal incluyendo el equipo de protección para respiración.
- Mantenimiento y cuidado de la planta.
- Manipuleo y almacenamiento de materiales.
- Uso seguro de herramientas manuales y motorizadas.
- Prevención y control del fuego.
- Informe de accidentes y enfermedades.
- Investigación de accidentes y enfermedades.

- Procedimientos de entrada y rescate en lugares cerrados.
- Planes de contingencia.

El entrenamiento en higiene y seguridad industrial de un empleado/operario de la planta debe iniciarse desde el momento de su incorporación. El supervisor debe asegurarse de que los empleados adquieran una comprensión completa de las políticas de higiene y seguridad en el trabajo y asuman una actitud conducente en este sentido.

## **9.6. ASISTENCIA MÉDICA Y PRIMEROS AUXILIOS**

Los programas de salud laboral deberán incluir asistencia médica y primeros auxilios para atender la salud del personal, a fin de evitar o controlar accidentes o enfermedades de tipo ocupacional u otras. Las pautas que debe tener en cuenta un plan de asistencia médica y primeros auxilios incluyen como mínimo:

- Servicio de ambulancia para transporte de emergencia precontratado. Los números telefónicos para emergencias deben estar a mano y fácilmente visibles.
- En caso de no contar con personal médico dentro de la planta o un servicio de atención médica cercano, se deberá capacitar adecuadamente a un grupo de empleados en la prestación de primeros auxilios, de acuerdo con las instrucciones dadas por el servicio de asistencia médica de la planta.
- Cada turno laboral contará con al menos una persona entrenada en primeros auxilios.
- La planta debe contar con instalaciones y dispositivos adecuados como para atender la emergencia de que algún empleado u operario se vea expuesto al contacto con sustancias dañinas y corrosivas: duchas de emergencia, dispositivos lavaojos, etc.
- La planta debe tener al menos un botiquín de primeros auxilios y la responsabilidad de la reposición de sus elementos debe estar perfectamente identificada.
- Se preparará un manual de primeros auxilios.
- Se dispondrán en lugares clave y a la vista los números telefónicos de emergencia para llamar al servicio médico y de ambulancia.
- Se organizará un registro adecuado de primeros auxilios.

## **9.7. MANUAL DE HIGIENE Y SEGURIDAD LABORAL**

Este elemento pone al alcance del empleado/operario información útil que puede ayudar a prevenir accidentes y enfermedades laborales. Es importante que su lectura sea ágil y de fácil acceso. La información mínima que debe contener este manual incluye:

- Política de Higiene y Seguridad.
- Normas de Higiene y Seguridad.

- Procedimientos de emergencia.
- Teléfonos de emergencia.

## 9.8. RIESGOS Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN

El personal de cada planta deberá realizar su propio análisis sobre los riesgos que acompañan su operación. Sin embargo, existen algunas prácticas de aplicación general que favorecerán la prevención de accidentes y de enfermedades laborales.

### ***Higiene personal***

Esta es probablemente la primera norma de aplicación general para aquellos que trabajan en la operación de los distintos procesos de tratamiento de agua:

- Mantener las manos y los dedos lejos de la nariz, boca, ojos y oídos.
- Usar guantes de goma cuando se limpien bombas, rejas, tamices o cuando se entre en contacto con los barros producidos por los sólidos separados del agua tratada.
- Utilizar siempre guantes impermeables cuando las manos tengan algún corte o herida.
- Lavar bien las manos con jabón y agua caliente antes de comer o fumar después del trabajo.
- Mantener la uñas cortas y limpias.
- Guardar la ropa de calle y limpia en un armario separado del lugar donde se guarda la ropa de trabajo.
- Informar los accidentes menores tales como cortes y rasguños y recibir los primeros auxilios correspondientes.
- Bañarse después de cada jornada laboral.

Para completar la protección sanitaria del empleado/operario, éste deberá cumplir con el plan de vacunación que recomiende el servicio sanitario.

### ***Productos químicos peligrosos***

Para prevenir accidentes, el manejo de productos químicos peligrosos debe realizarse bajo la vigilancia estricta prevista por el Programa de Higiene y Seguridad de la planta, desde su compra hasta el momento de su disposición final.

Todos los productos químicos deben estar adecuadamente identificados, se debe contar con información sobre su efecto sobre la salud y con datos relativos a la seguridad de su manejo así como con procedimientos de emergencia. Finalmente, se debe auditar y verificar el cumplimiento efectivo de estos procedimientos.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Arboleda Valencia J.(1992) Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, Acodal, Colombia.1992.
- Azevedo Netto, Richter (1991) Tratamento de Agua, Tecnología Actualizada, Editora Blücher Ltda., Sao Paulo, Brasil.
- Bryant R., L.(1999) Control de la Coagulación del Agua Mediante el Monitoreo de la Corriente Circulante, Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental, N° 44, Mayo/Junio.
- Burlingame, G.A., Pickel, J. Roman, J.T (1998). Practical Applications of Turbidity Monitoring, JAWWA, Vol 90, N° 8, August.
- Harris S. Hancock, C., Vasconcelos J.(1996) Microscopic Particulate Analysis (MPA) for Filtration Plant Optimization, USEPA, Región 10, EPA 910-R-96-001, April.
- Le Chevalier, M. W., Norton W. (1992) Examining Relationships Between Particle Counts, and Giardia, Cryptosporidium and Turbidity, JAWWA, December.
- Montgomery J. (1985) Treatment Principles & Design, John Wiley and Sons.
- Perez Carrión, J.M., Cánepa de Vargas, L Programa Regional OPS/EHP/CEPIS de Mejoramiento de Calidad de Agua para Uso Humano, Módulo CB 4.5 Procesos Unitarios - Laboratorio, Perú, 1981.
- Schulz C.R., Okun D.(1990) Tratamiento de Aguas Superficiales para Países en Desarrollo, Noriega Editores, México.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA, WEF, 19 th. Edition, 1995.
- USEPA, (1991) Optimizing Water Treatment Plant Performance Using the Composite Program-EPA/625/6-91/027.
- Vázquez H., Contento, L., Ingallinella, A. M., Sanguinetti G., Bachur J., Matiuzzi, M. Remoción de Plancton en el Proceso de Filtración Rápida. XXVI - Congreso Internacional de AIDIS, Lima, Perú, 1998.
- Visscher, J.T, Paramasivan, R., Raman A., Heijnen, H. A. (1992) Filtración Lenta en Arena, Tratamiento de Agua para Comunidades, IRC, CINARA, Cali, Colombia.

## 11. ANEXO

### *Planilla de Registro Diario*

|                                       |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| HORA                                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Agua cruda                            |  |  |  |  |  |  |  |
| Turbiedad (UNT)                       |  |  |  |  |  |  |  |
| pH (unidades)                         |  |  |  |  |  |  |  |
| Color                                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Alcalinidad (mg/l)                    |  |  |  |  |  |  |  |
| Agua tratada                          |  |  |  |  |  |  |  |
| Turbiedad (UNT)                       |  |  |  |  |  |  |  |
| pH (unidades)                         |  |  |  |  |  |  |  |
| Cloro residual (mg/l)                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Agua sedimentada                      |  |  |  |  |  |  |  |
| Turbiedad (UNT)                       |  |  |  |  |  |  |  |
| Agua filtrada (UNT)                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Turb. Filtro 1 (UNT)                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Turb.Filtro2 (UNT)                    |  |  |  |  |  |  |  |
| Turb.Filtro3 (UNT)                    |  |  |  |  |  |  |  |
| Sulfato de aluminio                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Dosis (mg/l)                          |  |  |  |  |  |  |  |
| Caudal bomba (ml/min)                 |  |  |  |  |  |  |  |
| CAP                                   |  |  |  |  |  |  |  |
| Dosis (mg/l)                          |  |  |  |  |  |  |  |
| Caudal bomba (ml/min)                 |  |  |  |  |  |  |  |
| Lavado de filtro                      |  |  |  |  |  |  |  |
| Filtro 1                              |  |  |  |  |  |  |  |
| Filtro 2                              |  |  |  |  |  |  |  |
| Filtro 3                              |  |  |  |  |  |  |  |
| Volumen agua lavado (m <sup>3</sup> ) |  |  |  |  |  |  |  |