

CAPÍTULO 5
MANTENIMIENTO

Autor:

Ing. Emilio Alpizar Villegas
Consultor CAPRE/GTZ

1. INTRODUCCIÓN

Todos tenemos una idea general, más o menos precisa, de lo que es el mantenimiento. Lo concebimos como todo el trabajo necesario para mantener en buen estado de funcionamiento todo tipo de bienes, como los edificios y las máquinas.

Se puede decir que el mantenimiento nació con los primeros hombres. Desde el momento en que el hombre busca cubrir su cuerpo de las inclemencias del tiempo, está haciendo mantenimiento, el de su propia persona. Cuando el hombre buscó materias grasas para engrasar los ejes de sus carretas, echó a andar las bases de los métodos que actualmente se usan.

Una definición de mantenimiento podría ser la siguiente: todas las actividades desarrolladas con el fin de conservar las instalaciones y equipos en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico.

En este capítulo se presenta un manual de instrucción sobre mantenimiento para los ingenieros encargados de las plantas de tratamiento de agua. Se ha dividido en cuatro partes. En la primera se detallan los fundamentos del mantenimiento en general. En la segunda se explica la organización del mantenimiento en la empresa de aguas. En la tercera se aborda la conformación del plan de mantenimiento y en la cuarta se presenta un pequeño ejemplo de selección de la estrategia de mantenimiento apropiada.

Se pretende que este trabajo sea complementado con un curso teórico-práctico para ingenieros de mantenimiento. Las técnicas y conceptos aquí presentados permitirán implementar un plan de mantenimiento al desarrollarlas ampliamente en un curso.

2. MANTENIMIENTO, GENERALIDADES Y DEFINICIONES

En este capítulo se dan los conceptos básicos generales para comprender posteriormente el programa de mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua.

2.1 Objetivo básico

Como un objetivo básico, el mantenimiento procura contribuir por todos los medios disponibles a reducir, en lo posible, el costo final de la operación de la planta. De este se desprende un objetivo técnico por el que se trata de conservar en condiciones de funcionamiento seguro y eficiente todo el equipo, maquinaria y estructuras de tratamiento.

El personal de mantenimiento tiene dos puntos de vista para cumplir estos objetivos: el aspecto humano y el técnico. El evitar los accidentes previene pérdidas humanas y de grandes responsabilidades. Por el lado técnico, la maquinaria, las instalaciones y los equipos bien mantenidos no provocarán pérdidas económicas y facilitarán la producción continua y eficiente de la planta.

2.2 Definiciones generales

Es necesario aclarar algunos conceptos respecto al verdadero significado de mantenimiento. Generalmente no se hace distinción entre las diferentes clases de mantenimiento. Popularmente, se conocen solamente dos tipos: el correctivo y el preventivo. Puede decirse que la diferencia entre ambos es la misma que existe entre “tener” que hacer una actividad de reparación y el realizarla “cuando esta se desea”. Sobre la base de esta diferencia, se define:

2.2.1 Mantenimiento preventivo

Es el conjunto de actividades que se llevan a cabo en un equipo, instrumento o estructura, con el propósito de que opere a su máxima eficiencia, evitando que se produzcan paradas forzadas o imprevistas. Este sistema requiere un alto grado de conocimiento y una organización muy eficiente. Implica la elaboración de un plan de inspecciones para los distintos equipos de la planta, a través de una buena planificación, programación, control y ejecución de actividades a fin de descubrir y corregir deficiencias que posteriormente puedan ser causa de daños más graves.

2.2.2 Mantenimiento correctivo

Es el conjunto de actividades que se deben llevar a cabo cuando un equipo, instrumento o estructura ha tenido una parada forzada o imprevista. Este es el sistema más generalizado, por ser el que menos conocimiento y organización requiere.

Cuando se hace mantenimiento preventivo dentro de un sistema correctivo, se le llama *mantenimiento rutinario*. Cuando se hace mantenimiento correctivo en un sistema preventivo, se le llama *corrección de falla*. En la práctica, no es posible diferenciar totalmente ambos sistemas.

2.3 Definición de términos

Es necesario plantear una serie de definiciones que se seguirán utilizando en el desarrollo de este trabajo.

Planta. Conjunto de maquinaria, equipos y procesos para el tratamiento de las aguas.

Unidad. Componente de la planta que realiza una función determinada en el proceso.

Parte. Componente simple de cada unidad. Es la parte de la unidad que puede cambiarse directamente en el sitio.

Componente. Repuestos simples de una parte. Solo pueden ser cambiados en el taller de mantenimiento.

Estrategia. Metodología empleada para llevar a cabo el mantenimiento.

Plan o programa. Conjunto de estrategias seguidas para llevar a cabo el mantenimiento.

Modo de falla. Falla o avería típica de una unidad. Se tipifica como la parte que falla y la frecuencia con que lo hace una unidad.

Tour o recorrido. Recorrido de inspección o de trabajo por la planta, siguiendo el flujo del agua y optimizando las distancias recorridas.

Monitoreo de condiciones. Conjunto de técnicas de inspección que se utilizan para conocer las condiciones de operación de equipos y tomar las acciones preventivas o correctivas necesarias.

2.4 Estrategias

Para llevar a cabo cualquiera de los dos tipos de mantenimiento mencionados, modernamente se consideran cinco estrategias diferentes. Una combinación de estas puede ser la estrategia óptima para llevar a cabo la conservación y mantenimiento de la planta de tratamiento.

2.4.1 *Mantenimiento programado*

Las acciones llevadas a cabo mediante esta estrategia se realizan a intervalos regulares de tiempo o cuando los equipos se sacan de operación. Este tipo de actividad requiere sacar de funcionamiento el equipo y solo puede ser bien planificada cuando la falla es dependiente del tiempo de operación. Eso no es lo común en nuestras plantas de tratamiento. Las actividades que son siempre factibles de programar son la lubricación y la limpieza. Para llevarlas a cabo, los fabricantes de los equipos indican la frecuencia con que se requieren. Con esta información se puede establecer la programación correspondiente.

2.4.2 *Mantenimiento predictivo*

El mantenimiento predictivo no es dependiente de la característica de la falla y es el más efectivo cuando el modo de falla es detectable por monitoreo de las condiciones de operación. Se lleva a cabo en forma calendaria y no implica poner fuera de operación los equipos.

Entre las técnicas usadas en esta estrategia están las inspecciones, el chequeo de condiciones y el análisis de tendencias.

2.4.3 *Operar hasta la falla*

Esta estrategia no requiere planes por adelantado o ninguna otra actividad más que la de asegurar que al momento de la falla se contará con los hombres, las herramientas y los repuestos necesarios para atender la emergencia en el menor tiempo posible. Desde todo punto de vista, esta es la estrategia menos deseable si se empleara como la única por seguir.

2.4.4 *Mantenimiento de oportunidad*

Esta es una manera efectiva de dar mantenimiento. Se hace uso de los tiempos de parada de los equipos por otras estrategias empleadas o por paradas en la operación de la planta. Se hace uso de los tiempos muertos. El esfuerzo

desplegado en aplicar esta estrategia puede ser muy efectivo desde el punto de vista económico.

2.4.5 Rediseño por obsolescencia

Esta es la mejor alternativa cuando las fallas son demasiado frecuentes y la reparación o los repuestos son muy costosos. Si se ejecuta bien, es una actividad de un solo tiempo; todas las demás son actividades repetitivas.

2.5 Técnicas de monitoreo de condiciones

La facilidad de hacer mediciones es el principal criterio que influencia la selección de la técnica para el monitoreo de condiciones. Las técnicas de medición que requieren detener la máquina para efectuar las mediciones se llaman *métodos invasivos (off load)* y aquellos métodos que no requieren la parada de la máquina se llaman *no invasivos (on load)*.

Naturalmente, se escogerán como técnicas aquellas que no requieran detener la operación de los equipos medidos. A continuación se definen las técnicas más comunes de monitoreo de condiciones.

2.5.1 Los sentidos humanos

Tocar, ver, oler y oír son actividades generalmente olvidadas cuando se escribe la lista de los métodos para monitorear condiciones de operación. Posiblemente esto ocurre porque estos sentidos siempre están presentes en nuestras acciones. Es muy frecuente, en mantenimiento, que una apreciación subjetiva, usando nuestros sentidos, inicie un análisis objetivo y exhaustivo de un problema. El decir “No se ve muy bien” es, entonces, muy importante. Esta ventaja del cuerpo humano se refleja en la gran variedad de parámetros que puede detectar: ruido, vibración, temperatura, luz y olores.

2.5.2 Técnicas ópticas

Ya se ha mencionado el uso de la visión. Existe una amplia gama de técnicas que amplían la potencia del ojo humano. Se puede obtener amplificación extra con el uso de lupas o de otros instrumentos ópticos. A veces el objeto que se quiere inspeccionar no se encuentra accesible, por lo que se requiere equipo especializado para alcanzarlo. Otras veces, el objeto no está quieto o se encuentra viajando

a baja velocidad, por lo que es necesario utilizar técnicas para simular que está detenido.

a) Amplificación

La amplificación puede lograrse mediante el uso de lupas o de microscopios de baja potencia. Existe una gran variedad de pequeños microscopios de mano que pueden ser muy valiosos para inspecciones in situ de deterioro de superficies o de análisis de virutas en los aceites. Se pueden usar también cámaras de video o de fotografía en los equipos de laboratorio para almacenar los resultados.

b) Accesibilidad limitada

A menudo el objeto que va a ser inspeccionado se encuentra dentro de la máquina. Para evitar este inconveniente se tienen varias técnicas:

- Sondas, que son fuentes de luz flexibles y que pueden usarse en conjunto con espejos y varillas.
- Baroscopios, que son objetos especialmente diseñados para el trabajo de inspección. Consisten en un líquido o una fibra óptica con los que se ilumina y visualiza el objeto por inspeccionar. Pueden ser rígidos o flexibles, y tener diferentes opciones de cabezas de inspección. Además, pueden tener amplificación incorporada.

2.5.3 Técnicas térmicas

La técnica de monitoreo por calor se puede emplear para medir fluidos en un sistema o para superficies de componentes mecánicos como las cajas de rodamientos o muñoneras. Para la medición de condiciones térmicas, se utilizan dos tipos de sensores:

a) Sensores de contacto

Los sensores de contacto son aquellos que toman la temperatura del cuerpo con el cual están en contacto y luego la transmiten como si fuera la suya propia. La precisión y el tiempo de respuesta se ven afectados por los mecanismos de sujeción. Un buen contacto térmico es esencial para su funcionamiento. El tiempo

de respuesta se ve afectado por la inercia térmica, por lo que las temperaturas que varían muy rápidamente se deben medir con sensores pequeños (bajo volumen). Algunos tipos de sensores son los siguientes:

- De expansión líquida como alcohol o mercurio en vidrio.
 - De expansión bimetalica, que son muy robustos pero inconvenientes para medir temperaturas en superficies.
 - Pinturas, crayones y perdigones conforman un método simple de medición en superficies al cambiar de color o forma con la temperatura.
 - Termocuplas. Son los dispositivos más pequeños y adaptables usados en detección térmica. Pueden ser usados con pequeños medidores portátiles, pero tienen el inconveniente de que no puede repetirse la medición por su pobre superficie de contacto.
- b) Sensores sin contacto

La energía radiante desde un cuerpo varía con la temperatura absoluta del cuerpo y la emisión de la superficie de radiación de acuerdo con la ley de Boltzmann. Esto nos permite deducir la temperatura de la superficie a partir de la energía radiante sin estar en contacto con ella. Para esto, se usan dos tipos de instrumentos:

- Pirómetros de radiación, los cuales se pueden seleccionar en una amplia gama de temperaturas; por ejemplo, 0 °C y 2.500 °C.
- Cámaras infrarrojas de rastreo, que despliegan la temperatura del cuerpo en forma directa.

2.6 Técnicas de vibraciones

La medición de vibraciones ha demostrado ser una técnica muy versátil y se han desarrollado muchas formas de utilizarla para determinar las condiciones de la maquinaria. Su éxito depende de que sea un método muy preciso, simple de aplicar y no invasivo.

2.6.1 Medición global

La técnica más simple utiliza la medición global de vibraciones con aceleración, velocidad y desplazamiento. Este método cuantifica la cantidad de vibración y la compara con normas preestablecidas y aceptadas y sus niveles correspondientes de alarma, según se requiera.

Las medidas de aceleración son particularmente sensitivas a las altas frecuencias, por lo que son muy útiles para detectar fallas en rodamientos o en piñones de cajas de reducción de velocidad. Las medidas de velocidad son muy útiles para la detección de fallas, tales como desbalance, desalineamientos y apoyos flojos. El desplazamiento se utiliza para vibraciones de baja frecuencia y se utiliza en equipos de baja velocidad. Las mediciones globales dan un grado de diagnóstico bueno, pero no son lo suficientemente específicas en la mayor parte de los problemas.

2.6.2 Detección de fallas en rodamientos

La vida de los rodamientos es aleatoria dentro de ciertos límites. Esto le provoca al ingeniero de mantenimiento un problema que puede resolver con determinada frecuencia de reemplazo. La aplicación de los métodos de medición de vibraciones para indicar daños en los rodamientos ha tenido un gran desarrollo.

Estos métodos se concentran en la vibración de alta frecuencia que los elementos rodantes producen dentro del rodamiento. La falla en los rodamientos generalmente comienza con la formación de defectos en la superficie. Este golpeteo con los defectos produce residuos abrasivos que provocan desgaste interno en el rodamiento. Los impactos causados por los elementos rotatorios que colisionan con estos defectos producen vibración de muy alta frecuencia entre el rodamiento y su caja.

Se ha probado que el daño en los rodamientos puede detectarse en una etapa temprana, con lo que se evitan paradas inesperadas. Los métodos desarrollados incluyen:

- **Análisis de envolvente.** La compleja señal de salida por rodamiento de bolas dañado se acondiciona y luego se filtra para eliminar cualquier dato de vibración no deseado. El espectro resultante da una indicación bien clara de los problemas del rodamiento.

- “SOC pulse”. Los impactos causados por daño en los roles producen impulso de choque. Estos impulsos se detectan usando un transductor que se sintoniza a 32 kHz. La baja frecuencia proveniente de otras fuentes es, desde luego, filtrada.
- “Spike energy”. La señal de daño es medida en unidades “g” y es filtrada entre 5 y 50 kHz. La salida da una indicación de la condición de los rodamientos.
- “Kurtosis”. Es un método estadístico para obtener la condición de los roles, basado en la comparación entre la vibración elevada a la cuarta potencia y la vibración a la segunda potencia, ambas como su promedio.

2.6.3 Análisis de espectro

Las ventajas de los circuitos de estado sólido han permitido el desarrollo de analizadores de vibraciones pequeños y portátiles. El análisis que estos aparatos llevan a cabo muestra la frecuencia y la magnitud para dar una señal completa. Los analizadores de vibraciones pueden usarse para diagnosticar muchos tipos de defectos en la maquinaria. Su aplicación permite diferenciar entre los diferentes modos de falla. Algunas de las fallas comunes detectables por esta técnica son:

- Desbalance: Produce un pico a la velocidad del eje.
- Desalineamiento: Se produce típicamente a 1x, 2x y 3x de la velocidad del eje.
- Bases flojas: A menudo, a 1x ó 2x de la velocidad del eje.
- Daños en rodamientos: Picos de frecuencia entre 2 kHz y 5 kHz, dependiendo de la velocidad del eje y de la resonancia del transductor.
- Problemas eléctricos: Frecuencia sincrónica y bandas adyacentes.
- Daño en piñones: La gama de frecuencias depende del número de dientes y de la velocidad del eje.
- Daños en aspas: El número de aspas multiplicado por la velocidad del eje.
- Eje fracturado: Típicamente, 2x y 3x de la velocidad del eje.

Como puede verse en la lista anterior, el análisis de vibraciones es una herramienta muy poderosa en la detección de fallas.

2.6.4 Monitoreo de corriente

La corriente de los motores eléctricos puede medirse utilizando muchos métodos muy conocidos. Entre estos métodos están los siguientes:

- Graficación de la variación continua de la corriente con el tiempo.
- Graficación de picos de corriente.

2.6.5 Monitoreo de lubricantes

Se puede monitorear la composición de los lubricantes para detectar la presencia de contaminantes o partículas abrasivas que puedan producir daños.

2.6.6 Monitoreo de la corrosión

Los procedimientos convencionales de monitoreo de la corrosión se basan en la detección de la pérdida de peso, la medición de resistencia eléctrica y la polinización lineal. Para detectar la corrosión, se siguen numerosos métodos, entre ellos, inspección visual, ultrasonido, radiografía, inducción magnética y medición de corrientes parásitas.

2.7 El plan o programa

Un plan de mantenimiento tradicional se basa principalmente en la estrategia número tres enunciada arriba, “operar hasta la falla”. Se concentra en la habilidad para reparar rápidamente, en la disponibilidad de personal entrenado y el contar con los repuestos necesarios y las herramientas adecuadas en el momento de la falla.

Un plan de mantenimiento moderno consiste en la combinación de varias estrategias que deben ser escogidas para mantener la planta. La autoridad responsable de las funciones de mantenimiento es la encargada de establecer o modificar, según se requiera, el plan de mantenimiento. Las unidades que tienen una determinada función —por ejemplo, un agitador para floculación mecánica— pueden ser definidas como “el menor grupo de partes que requieren mantenimiento

en donde están instalados o mantenimiento de línea”. Un pequeño motor puede ser considerado una parte, porque puede ser reemplazado, pero un rodamiento es un componente, porque solo puede ser reemplazado en el taller.

En el proceso de desarrollar el plan de mantenimiento, se debe determinar el mejor procedimiento para cada parte. Los procedimientos de las partes se juntan para producir el plan de mantenimiento de la unidad. El desempeño de la planta y la efectividad de los procedimientos de mantenimiento normalmente se obtienen al nivel de las “unidades”, ya que la disponibilidad de la unidad afecta directamente la ejecución de una determinada función. Se debe notar que la mayor subdivisión de una planta es en “unidades”, para propósitos de operación y de mantenimiento, pero los procedimientos de mantenimiento deben desarrollarse inclusive hasta el nivel de partes. Al ensamblar los diferentes planes de mantenimiento para las unidades, se obtiene el plan de mantenimiento para la planta en general.

De lo anterior se desprende que para desarrollar racionalmente un plan de mantenimiento, aplicando las estrategias enunciadas según el caso, se deben examinar las diferentes unidades de la planta, su importancia crítica en el proceso y la probabilidad de que se produzca determinado tipo de falla en cada una de las partes constituyentes.

El desarrollo o la modificación del plan de mantenimiento puede dividirse en etapas como se indica en la figura 5-1, donde los cuadros de la izquierda representan los recursos. Este desarrollo nunca se logra de una sola vez o en un único proyecto. El desarrollo aquí descrito debe ser considerado como un proceso o actividad permanente y continuo, a fin de mejorar el desempeño de la planta para alcanzar los propósitos de la administración.

Las actividades para llevar a cabo el plan de mantenimiento que se indican en la figura 5-1 se pueden resumir en la siguiente lista:

a) Determinación de las unidades críticas en el proceso

Sobre la base del diagrama de flujo de la planta, se lleva a cabo un análisis de la función que la unidad desempeña en el proceso. Se debe ponderar su importancia.

b) Determinación de disponibilidad de las unidades

Haciendo uso del historial de mantenimiento del que se disponga, se lleva a cabo un análisis de la confiabilidad de la unidad.

c) Determinación de las partes críticas y su modo de falla

Se deben utilizar el historial de mantenimiento y la base de datos de confiabilidad disponibles para ubicar cuáles son los modos de falla de cada una de las partes de la unidad en estudio.

d) Selección del procedimiento de acuerdo con el modo de falla

Una vez conocido el modo de falla o mediante el uso de técnicas de monitoreo de las condiciones de operación, se procede a seleccionar la estrategia apropiada.

e) Ensamblar el plan para cada unidad

En las ventanas de producción se procede a confeccionar el plan para cada una de las unidades, que puede, perfectamente, constar de una combinación de todas las estrategias. Debe procurarse que se tienda al mantenimiento preventivo.

f) Ensamblar el plan para toda la planta

Aquí se debe hacer uso de las ventanas de producción y de todas las fuentes y recursos de mantenimiento para ensamblar un plan general para toda la planta.

Cada una de las actividades presentadas en la figura 5-1 será descrita en detalle cuando se explique el ejemplo de confección del plan de mantenimiento para una planta.

La aplicación de estas estrategias en la confección del plan requiere la adquisición de gran cantidad de información acerca de la planta y de su mantenimiento. Una adquisición de datos sobre la planta adecuada y precisa requiere la cooperación del personal y, en muchos casos, un cambio de actitud en el reporte del trabajo realizado.

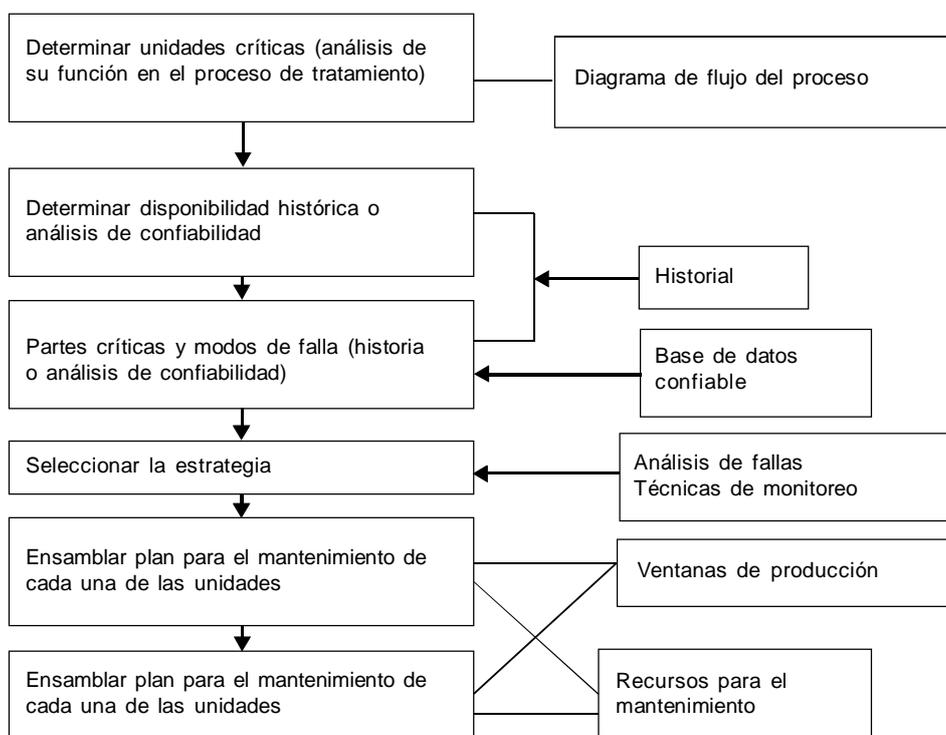


Figura 5-1. Diagrama de desarrollo del plan de mantenimiento

El análisis de la base de datos que se genera cuando se trabaja en la confección de la historia de la planta es otra materia que se debe considerar. Todo el proceso podría acarrear la necesidad de computarización, ya que se tiende a eliminar el sistema de información basado en la confección de informes escritos y en su lugar se utilizan los sistemas de almacenamiento magnético de las computadoras. Este paso depende del tamaño de la planta y de la disponibilidad de recursos. Probablemente este no sea un problema que en nuestro medio aparezca como prioritario.

La aplicación y la evaluación del programa de mantenimiento son actividades importantes en el proceso de tratamiento de las aguas. Las condiciones físicas de los componentes de la planta pueden variar hasta el punto de requerir un total rediseño del programa o inclusive del sistema de mantenimiento, ya que se correría el riesgo de afectar la calidad del agua tratada.

Esto significa que el plan o programa de mantenimiento no es una actividad que termina con su puesta en marcha. La evaluación y control constante darán la requerida retroalimentación para que el plan se actualice y mejore su eficiencia con la experiencia generada.

2.8 Planificación

Se debe conocer que existen tres áreas básicas en la planeación del mantenimiento.

- El largo plazo;
- el corto plazo;
- planes inmediatos.

La primera cubre la planeación a largo plazo de los requerimientos de mantenimiento y está muy ligada a los proyectos de largo plazo del departamento de producción de la empresa. Esta planeación debe llevarse a cabo en los niveles gerenciales y sus metas se deben fijar a cinco o diez años. Aunque el nivel inicial de esta planificación es muy elevado, los efectos de estos planes recaen sobre toda la organización. El propósito fundamental del planeamiento a largo plazo es mantener los objetivos, las políticas y los procedimientos de mantenimiento acordes con los objetivos fundamentales de la empresa.

La planeación a corto plazo, la segunda área, contiene planes que se desarrollan con el horizonte aproximado de un año. Esta recae bajo la responsabilidad directa de los jefes de departamento. Para estos planes se toman en cuenta tres actividades básicas: la instalación de equipo nuevo, el trabajo cíclico y el trabajo de mantenimiento preventivo. Las tres deben estar incluidas en el programa de mantenimiento.

La tercera área contiene los planes inmediatos en la actividad del mantenimiento. Esta actividad puede ser desarrollada por los técnicos en control del mantenimiento o por los supervisores. Se incluye entre sus actividades una planificación diaria con el propósito de reducir el tiempo utilizado en traslados y otras actividades que no constituyen el trabajo directo sobre los equipos o instalaciones. Sin una planificación día a día, se estaría dedicando realmente al trabajo tan solo 25% de la fuerza laboral disponible.

Como ejemplo, la manera de evitar viajes en exceso al almacén para pedir herramientas y materiales es proveer al operario de una descripción detallada del trabajo que se va a realizar antes de que lo inicie. Esta lista de materiales y herramientas solo podrá lograrse en la medida en que se haya analizado previamente dicha tarea. El jefe del taller será la persona idónea para hacer la planificación día a día. Debe contarse también con los recursos necesarios.

Es muy importante notar que las tres áreas de planeación difieren enormemente en su tipo de desarrollo y en su nivel administrativo. Sin embargo, todas deben llevarse a cabo de una manera muy coordinada. Los objetivos y responsabilidades de la planeación del trabajo varían muy poco, aunque sea llevado a cabo por un ingeniero de planta, un jefe de taller o un planificador. Aunque los detalles de procedimientos varíen un poco, las actividades necesarias para conseguir los objetivos comunes pueden describirse como investigación, análisis económico, desarrollo del plan, ejecución y evaluación.

3. DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE LA EMPRESA DE AGUA

El mantenimiento debe formar parte integral de la empresa de aguas como un subsistema. Los conceptos dados en el capítulo 1 se aplican también a la empresa de aguas, aunque esta sea una empresa de servicio público y no solo una empresa productora de bienes.

La empresa fija los objetivos, las políticas y las normas del subsistema, que serán implementados mediante las técnicas o programas y planes específicos por la dirección técnica del subsistema, lo que implica que los programas de mantenimiento se lleven a cabo en sus diferentes etapas. Para ello se crea un departamento especializado. Este departamento, que podría llamarse “departamento de mantenimiento”, será tan complejo como lo requiera el tamaño de la empresa.

El grado de ejecución de los planes y programas se refleja en los servicios prestados por el departamento, cuyo control está garantizado por la información o las quejas provenientes de los usuarios de los diferentes servicios. Los usuarios del subsistema de mantenimiento son de dos tipos: los internos (otros departamentos de la empresa) y los externos (los usuarios o abonados de la empresa). De esta información surge la autoevaluación como una actividad permanente y necesaria del subsistema.

Por lo general, el subsistema de mantenimiento no está bien establecido en las empresas de agua o no funciona adecuadamente. Se da como excusa la falta de recursos humanos y materiales, sin tener en cuenta los beneficios que dejan los programas de mantenimiento aplicados eficientemente. La prestación adecuada del servicio de abastecimiento de agua, la prolongación de la vida útil de la planta y la disminución de los costos en reparaciones se encuentran entre estas ventajas.

El subsistema de mantenimiento debe encontrarse muy relacionado con los subsistemas comercial, financiero, de planificación y el subsistema administrativo en general. Esta relación se traduce en un flujo de información que se muestra en forma gráfica en la figura 5-2.

Las funciones administrativas y técnicas del subsistema se llevan a cabo en varios niveles de la organización, dependiendo de la complejidad y el tamaño de la empresa. Fundamentalmente existen tres niveles de ejecución:

- a. central;
- b. regional;
- c. local.

Al nivel central le corresponde determinar objetivos y políticas, dictar normas generales, asignar recursos y llevar a cabo un control global del funcionamiento del subsistema. Para esta función se debe tomar en cuenta a todos los niveles, desde la junta directiva hasta la retroalimentación que podría dar el operador de la planta de tratamiento. Si no se toman en cuenta todos estos niveles de planificación, se fracasará.

Al nivel regional le corresponden las funciones de programación, supervisión, asesoría, planificación y control de las actividades. En este nivel también se tiene que recurrir a la retroalimentación desde niveles inferiores y superiores de la empresa.

Al nivel local le corresponde la implementación de los planes y programas, así como la recolección de la información necesaria para retroalimentar la planificación.

Toda empresa debe tener organizado su mantenimiento de forma particular. Hablaremos aquí del departamento sin ubicarlo dentro de la organización global de la empresa. La ubicación definitiva depende del tamaño de la empresa misma

y de la importancia que esta le brinde al subsistema de mantenimiento. La cabeza del departamento debe ser un ingeniero. La especialidad de este es irrelevante, siempre y cuando cuente con alguna formación y/o experiencia en manejo de personal y en la administración en general. El jefe de mantenimiento será responsable del planeamiento, la programación y el control. El inventario de equipos y estructuras, así como la codificación y el diseño de normas es también su responsabilidad. Para desarrollar sus funciones, debe contar con el apoyo de los operadores de planta, técnicos en mecánica y en electricidad, personal de secretaría y administradores de bodega e inventarios. Deberá establecer una organización interna del departamento en la que se sugiere la creación de unidades que estén encabezadas por un supervisor técnico.

Una función importante del jefe de mantenimiento es la organización y análisis de los archivos de información del historial de los equipos. Sobre la base de esta información debe establecer los cambios o mejoras en los planes. El solo recolectar la información no tiene ningún sentido práctico. La selección de personal y su entrenamiento son funciones inherentes al departamento de mantenimiento.

Por la carencia de personal especializado o cuando la complejidad del trabajo así lo requiera, el departamento de mantenimiento podrá contratar servicios con entidades externas a él. Estos contratos tienen por objeto realizar algunos trabajos que, dada su naturaleza, no justifican el disponer permanentemente de técnicos especializados para su ejecución. Algunas razones tales como trabajos muy especializados y poco frecuentes o con un costo muy alto de herramientas y equipos para su ejecución justifican estas contrataciones.

Los trabajos que se recomienda efectuar por esta vía son:

- rebobinado de motores eléctricos;
- reparaciones complejas de motores diesel y gasolina;
- reparación y calibración de equipos de control;
- reparación de cloradores;
- reparación de tanques y otras estructuras de la planta;
- algunos trabajos de mantenimiento preventivo que las políticas de la empresa permitan.

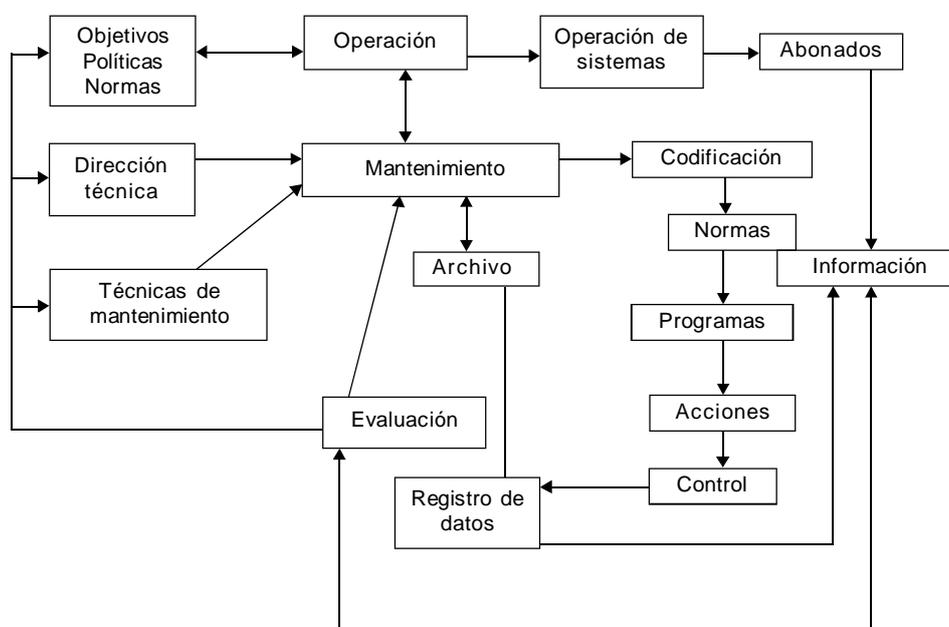


Figura 5-2. Esquema de funcionamiento del subsistema de mantenimiento

Para la contratación exterior de servicios, se deben tener en cuenta, entre otros, los siguientes cuidados:

- certificar la capacidad del contratista;
- especificar detalladamente el motivo del contrato;
- acordar el tiempo de entrega;
- fijar el costo y la forma de pago;
- concertar pruebas de funcionamiento;
- solicitar garantía de funcionamiento por un tiempo prudencial.

En los últimos años se ha evidenciado una tendencia hacia la contratación de servicios a empresas externas por parte de las empresas públicas. Los departamentos de mantenimiento han sido de los que han caído dentro de esta política. De aquí que la administración de contratos y su contraparte y seguimiento técnico-administrativo se hayan convertido en una actividad muy importante del departamento de mantenimiento.

4. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

Los programas de mantenimiento de la planta tienen como objetivo primordial el lograr que sus unidades componentes trabajen económicamente en forma normal durante todo su periodo de vida útil. Forman parte del programa el registro de datos, la programación de las actividades, las normas técnicas, los recursos humanos y materiales y los controles necesarios para su desarrollo y la evaluación correspondiente.

Podemos distinguir como etapas de un programa de mantenimiento las siguientes:

- confección de historiales;
- diseño;
- puesta en marcha;
- supervisión;
- evaluación.

Todas estas no son etapas terminadas sino que se debe lograr un proceso continuo de reacondicionamiento de ellas, de tal manera que constituyan un ciclo de desarrollo propio del programa. Los cambios que se lleven a cabo no deben obedecer a un proceso antojadizo, sino que deben responder al control y evaluación que se haga del proceso.

4.1 Confección de historiales

El historial de los equipos representa una de las herramientas más importantes con que cuenta el ingeniero de mantenimiento. Tres actividades típicas conforman esta labor.

4.1.1 *Inventario técnico*

La confección de historiales se inicia con un registro de toda la maquinaria e instalaciones existentes en la planta. El jefe de mantenimiento, en colaboración con los supervisores y técnicos, se ocupará de confeccionar un inventario técnico como un primer paso. Este inventario se irá cumpliendo por unidades de tratamiento. Para este inventario, se usará la ficha técnica que se muestra en la figura 5-3.

El inventario técnico de los equipos e instalaciones de la planta se elabora en las tarjetas especificadas en la figura 5-3. Para la ejecución del inventario, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Para el ordenamiento de las tarjetas, se debe establecer un *tour* o ruta que coincida con el recorrido del agua por las diferentes instalaciones y equipos del proceso de tratamiento, desde el ingreso del agua a la planta como agua cruda hasta su salida hacia la distribución como agua tratada.

Se deben codificar las unidades de la planta asignándoles la letra y/o número correspondiente, de acuerdo con el sistema de codificación particular que se emplee como formato de identificación y clasificación de equipos, con el correspondiente número de ubicación en el proceso.

Ejemplo

Si existen en la planta dos unidades de dosificación y estos son los primeros equipos por donde circula el agua y la letra correspondiente para los mecanismos de dosificación es *R* y para los motores *H*, las dos unidades quedarán codificadas como *R1*, *R2* y *H1*, *H2* respectivamente. Estas letras deben marcarse en los equipos, de tal forma que coincidan con lo escrito en las tarjetas correspondientes.

- b) En el caso de existir unidades acopladas como las motobombas, se debe emplear la parte anterior de la tarjeta para el equipo operado (bomba) y la parte posterior para el equipo motriz (motor).
- c) Los datos técnicos adicionales se refieren a aquellos que no se encuentran indicados en las respectivas placas de datos, pero que son importantes. Entre estos estarían el caudal y la altura dinámica total, en el caso de bombas, o la velocidad de rotación de un agitador.

A continuación se presenta un listado de equipos con indicación de los principales datos técnicos requeridos:

BOMBA DE TURBINA VERTICAL

- Número de etapas y longitud del eje de la bomba;
- diámetro de los impulsores;
- profundidad de la bomba;
- diámetro del eje de la columna y su longitud;
- diámetro y longitud de la tubería vertical del bombeo;
- tipo de lubricación;
- tipo de cojinetes;
- acoplamiento;
- capacidad: caudal contra altura de bombeo;
- curvas de rendimiento;
- caudal;
- carga dinámica total.

BOMBAS CENTRÍFUGAS DE EJE HORIZONTAL

- R.P.M.;
- número de impulsores;
- acoplamiento;
- capacidad L/s contra metros de altura;
- curvas de la bomba;
- carga dinámica total;
- accesorios (válvulas de entrada, retención-salida, de pie, de alivio);
- tipo de succión (diámetro);
- tipo de impulsión (diámetro);
- diámetros de impulsión y succión;
- tipo de lubricación.

REDUCTORES

- Potencia;
- relación de velocidad;
- marca de los roles;
- lubricación;
- tipo de aceite;
- tipo de acople;
- velocidad.

MOTORES ELÉCTRICOS

- Potencia (HP);
- tensión (V);
- corriente de plena carga (A);
- ciclos;
- fases;
- velocidad nominal (R.P.M.);
- corriente de trabajo (A);
- factor de servicio;
- tipo de rotor;
- diámetro de eje;
- roles: marca, referencias;
- arranque;
- acoplamiento;
- lubricación.

DOSIFICADORES

- Datos del motor eléctrico;
- tipo de transmisión de potencia;
- diámetro de las poleas;
- longitud de las correas;
- capacidad;
- material de la tolva;
- tipo de mecanismo de dosificación;
- tipo de lubricación;
- clase de aceite o grasa;

- mecanismo de agitación;
- materia del recipiente de mezcla.

MEZCLADORES

- Datos del motor eléctrico;
- datos del reductor de velocidad;
- diámetro y longitud del eje;
- tipo de mecanismo de mezcla.

FLOCULADORES

- Datos del motor eléctrico;
- datos del reductor;
- tipo de floculador;
- tipo de transmisión de potencia;
- tipo de lubricación del sistema de transmisión;
- tipo de lubricante;
- número de sistemas de paletas;
- número de paletas;
- material de las paletas;
- diámetro del sistema de paletas;
- longitud del sistema de paletas;
- tipo de rodamientos;
- tipo de lubricación de los rodamientos.

COMPRESORES

- Datos del motor;
- capacidad de compresión;
- sistema de lubricación;
- clase de lubricante;
- diámetro de los cilindros.

CLORADORES

- Tipo de clorador;

- capacidad;
- escala de rotámetro;
- capacidad de la balanza;
- número de cilindros;
- capacidad de los cilindros.

MOTORES A GASOLINA

- Potencia (H.P.);
- número de cilindros;
- velocidad (R.P.M.);
- sistema de lubricación;
- sistema de arranque;
- sistema de enfriamiento;
- voltaje del acumulador;
- capacidad del tanque de combustible;
- consumo de combustible (L/h);
- consumo de aceite (L/mes).

MOTORES DIESEL

- Potencia (mín.-máx.) HP;
- velocidad (mín.-máx.) R.P.M.;
- potencia de trabajo HP;
- velocidad de trabajo R.P.M.;
- número de tiempos;
- número de cilindros;
- diámetro de cilindros;
- carrera;
- cilindrada total;
- accesorios e instrumentos;
- capacidad del cárter;
- consumo de combustible (L/h);
- consumo de aceite (L/mes);
- consumo de grasa (kg/mes);
- arranque;
- refrigeración;
- lubricación;

- inyección;
- capacidad del tanque de combustible;
- filtros de aceite;
- filtros de combustible.

UNIDADES DE ARRANQUE

- Tipos de fusibles del interruptor de seguridad;
- características completas del interruptor de seguridad;
- clase, modelo y número de elementos del arrancador;
- características eléctricas completas del arrancador.

TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

- Capacidad (K.V.A.);
- tipo de conexión;
- alta tensión;
- baja tensión;
- clase de aislante;
- corriente primaria;
- corriente secundaria;
- peso total;
- tipo de ventilación.

GENERADORES

- Tensión (V);
- corriente (A);

- capacidad (Kw);
- ciclos;
- fases;
- roles, lubricación;
- factor de potencia;
- velocidad, R.P.M.

TANQUES DE HORMIGÓN O MAMPOSTERÍA

- Planos completos, con detalles;
- capacidad;
- sistema de entrada, salida, desagüe, desbordes y controles especiales;
- fuentes de abastecimiento y zonas a las que sirve.

MEDIDORES

- Tipos de medidores;
- localización;
- capacidad nominal;
- tipo de lubricación;
- clase de lubricantes;
- accesorios.

TABLEROS DE CONTROL

- Voltímetros (escala);
- amperímetros (escala);
- selectores de fase;
- contadores trifásicos;
- transformadores (intensidad);
- controles y sensores conectados.

4.1.2 Normas de mantenimiento

Como parte fundamental del programa, se debe contar con un manual de normas en el que se indiquen todos los procedimientos que se deben seguir por parte de los técnicos al realizar servicios de mantenimiento. Para el diseño del manual de normas de mantenimiento, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- a) Las clases de equipos, estructuras y unidades de la planta.
- b) Recomendaciones sobre mantenimiento de las casas fabricantes.
- c) Experiencia adquirida en la operación de la planta.
- d) Ensayos que permitan establecer frecuencias, personal requerido, etcétera, para las operaciones de mantenimiento.

La aplicación de las normas depende fundamentalmente de la estrategia que se haya determinado para el equipo o instalación. En el apéndice C se detallan algunos aspectos que se deben considerar en la adopción de normas para diferentes equipos.

| Ficha técnica para equipos | |
|----------------------------|----------------------------|
| Equipo: | Ubicación: |
| Placa de datos | Datos técnicos adicionales |
| | |
| | |
| | |
| | |

Figura 5-3. Ficha técnica para equipos

El uso de dos registros independientes para las fallas y los datos técnicos permite mantener los datos físicos (de instalación y características) sin tener que repetirlos cuando el número de reparaciones sea elevado y se complete dicho formulario. Una vez terminado el inventario de todo el equipo, se procede a la confección de la ficha de historial que se muestra en la figura 5-4.

| Ficha de historial | | | | |
|--------------------|-------|-------------------|-------|--------|
| Equipo: | | | | |
| Fecha | Orden | Trabajo realizado | Costo | Tiempo |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Figura 5-4. Ficha técnica de historial

Cuando en el plan no ha existido nunca un registro de fallas en máquinas, se procede a revisar las órdenes de trabajo de, al menos, los dos últimos años. En este proceso es necesario recurrir a la experiencia del personal de mantenimiento en el caso de no tenerse del todo registros.

Analizando las dos fichas del equipo, se podrá encontrar cuáles han tenido un excesivo número de reparaciones y se podrá determinar si requieren un acondicionamiento previo antes que se las incluya en el plan de mantenimiento. Es muy importante que todas las reparaciones y ajustes efectuados queden debidamente registrados. Del conocimiento que se tenga de ellos dependerá la posibilidad de prevenir futuras fallas.

Una técnica que podría obviar la necesidad de usar los dos métodos mencionados anteriormente es la de inspección previa para determinar la condición normal de los equipos. Para esto se requiere contar con personal experimentado y con equipos de medición, tales como el medidor de vibraciones. El análisis de vibraciones es una de las técnicas conocidas como de monitoreo de condiciones, entre las que se cuenta también con la aplicación directa de los sentidos humanos, técnicas ópticas y térmicas.

4.1.3 Análisis de tendencias

Los cambios que ocurren en la planta pueden ser analizados por su tendencia, lo cual anticipa problemas futuros. Los gráficos de tendencias permiten identificar situaciones que tienden a empeorar y comportamientos erráticos. El análisis de tendencias es más efectivo en el caso de que se esté produciendo un em-

peoramiento de condiciones. Una planta que ha comenzado a deteriorarse se puede identificar muy fácilmente cuando se hace el estudio de la tendencia de fallas.

4.2 Diseño

Una vez completa la etapa de recolección de información y de análisis, se procederá a diseñar el plan de mantenimiento, siguiendo lo especificado en la sección 2.4. El uso de una o más estrategias depende del análisis hecho y es muy probable que se tenga que considerar algunas unidades con estrategias propias o diferentes de la mayoría. Se debe enfatizar que el diseño resultante, para ser efectivo, debe contener una mezcla de las cinco estrategias descritas anteriormente. Esta etapa debe arrojar la programación correspondiente de actividades que permita adquirir los recursos necesarios. En este punto se debe ser enfático. Los programas y planes deben determinar el presupuesto y no a la inversa.

4.3 Puesta en marcha

Una vez realizada la programación, adquiridos los recursos, seleccionado y entrenado el personal, se procede a la implantación del plan.

Para tal fin, el ingeniero jefe del programa o el subalterno designado imparte órdenes de trabajo a los técnicos y operadores encargados de la ejecución. Esta orden de trabajo debe ser lo más explícita posible, a fin de evitar errores y traslados innecesarios. Las órdenes de trabajo deben revisarse para que su ejecución siga el diagrama de flujo de la planta. En la orden de trabajo debe incluirse, además, el espacio necesario para que el ejecutante detalle comentarios u observaciones.

Las órdenes de trabajo pueden confeccionarse manualmente cuando se reciban quejas o pueden programarse para que su producción sea rutinaria mediante el uso de un programa de cómputo.

4.4 Supervisión

El control del programa de mantenimiento debe llevarse a cabo directamente por el ingeniero. Para esto, debe tener lo siguiente:

Informes de labores. Deben ser presentados por técnicos y operadores semanalmente y deben corresponder con las órdenes de trabajo recibidas. Las causas de no correspondencia entre órdenes de trabajo y el informe deben quedar claramente especificadas. El formato de estos informes debe ser claro y estar de acuerdo con el estilo gerencial del ingeniero. El procedimiento de los informes brindará la retroalimentación que la supervisión debe entregar al sistema.

Reportes de operación de la planta. Esta información es importante para evaluar los resultados de la aplicación del plan de mantenimiento. Los operadores son un agente externo al departamento y proporcionan un punto de vista independiente sobre la calidad del servicio que reciben. La forma de recolectar esta información debe ser coordinada con el departamento de producción de la empresa.

Evaluación en el sitio. Se requiere una evaluación periódica por parte del ingeniero acerca de las condiciones de funcionamiento de las unidades de la planta. Esa evaluación puede basarse en un programa aleatorio de mediciones e inspección que permitan un control cruzado de la labor de sus técnicos. Todo el control del programa se basará en el proceso estadístico de la información recibida. La toma de decisiones deberá estar basada en el análisis de toda esta información.

4.5 Evaluación

Esta es una etapa permanente del sistema y es la más importante. Permite la retroalimentación requerida para corregir cualquier deficiencia que se presente en la aplicación del programa. Los resultados obtenidos del programa deberán evaluarse, a fin de determinar que no exista ni exceso ni defecto de mantenimiento. Un buen sistema deberá ser evaluado constantemente para reflejar, en todo momento, las condiciones actuales de eficiencia. Un análisis de costos contra satisfacción de usuarios representa un buen método de evaluación del mantenimiento.

5. EJEMPLO DE SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA

Se plantea aquí un ejemplo de selección de la estrategia adecuada para una unidad en una planta de tratamiento de agua, de la que se tiene historial de mantenimiento. Se supone, además, la existencia de equipos electromecánicos de tratamiento para que el ejemplo sea más representativo.

Como primer paso, se procede a hacer un diagrama de flujo de la planta:

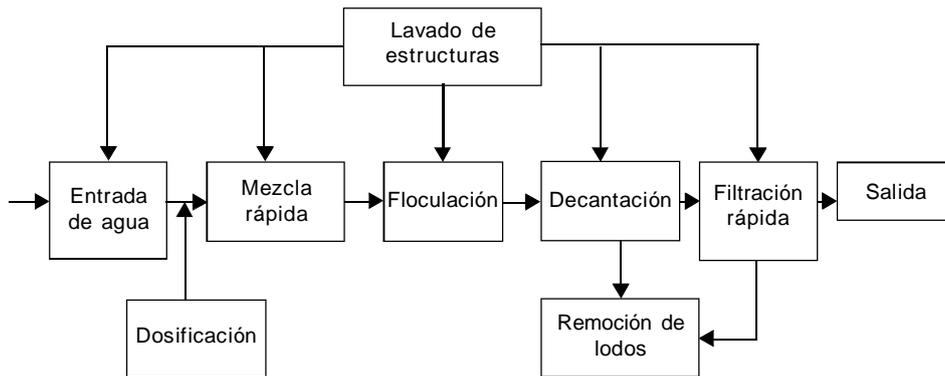


Figura 5-5. Diagrama de flujo de la planta

De acuerdo con el diagrama de flujo, se procede a establecer un *tour* o recorrido de la planta que nos permitirá identificar los equipos y posteriormente será seguido en las rutinas de inspección al aplicar la estrategia apropiada.

La codificación empieza por asignar letras de código a cada una de las estructuras, a saber:

- E para la sección de entrada;
- D para la sección de dosificación;
- MR para la sección de mezcla rápida;
- FL para la sección de floculación;
- BL para las bombas de lavado de estructuras;
- S para la sección de sedimentación y remoción de lodos;
- FR para la sección de filtración rápida.

Estos códigos pueden ser adecuados según el gusto del codificador. Lo importante es que se conviertan en un léxico común a todos los trabajadores de mantenimiento para tener una ubicación e identificación que no lleve a confusiones.

Para la codificación de los componentes de las secciones, se debe crear un código alfanumérico representativo de cada uno. Por ejemplo:

Si en la sección de lavado de estructuras se encuentran dos bombas, estas se codificarán como BLb1 y BLb2 o como le fuere más cómodo al ingeniero de mantenimiento.

Como segundo paso, se procede a la confección de las fichas técnicas para todos los equipos y estructuras existentes. Se muestra aquí, por conveniencia de espacio, solo la ficha técnica para las bombas de lavado. Nótese que se ha modificado apropiadamente el formulario presentado en la figura 5-3 como se indica en la figura 5-6. Esta modificación estará acorde con las necesidades particulares de cada programador. Si estas se tienen preparadas en el *software* correspondiente, este trabajo es bastante simple. La producción en serie de estas fórmulas es un proceso sencillo, como consecuencia.

| Ficha técnica | |
|---|--|
| <i>Equipo:</i> Bomba de lavado de estructuras | <i>Ubicación:</i> Sección de lavado de estructuras. Código BLb1 |
| <i>Placa de datos:</i> Bomba centrífuga de eje horizontal. RPM = 1525 CCW Impulsores = 2 de 250 mm Díam. succión = 100 mm Díam. descarga Lubricación por agua Caudal/presión = 45 L/s/20 m | <i>Datos técnicos adicionales</i> |
| | Marca: XX Pompas |
| | Mod. 12es2 Serie: 122-56 |
| | Año: 1992 Curva: 23se |
| <i>Nota:</i> Funciona de base | |

Figura 5-6. Ficha técnica de ejemplo

En el diagrama de flujo de la figura 5-6, podemos observar que si se cuenta con floculación mecánica, el floculador se convierte en una de las partes más importantes del sistema; por lo que se le da el calificativo de unidad crítica. Como se supone que se cuenta con la información correspondiente de fallas para este equipo, se procede a llenar el modelo de ficha mostrado en la figura 5-4, según se indica en la figura 5-7.

| Ficha de historial | | | | |
|-----------------------------|---------|--------------------|--------------|-----------|
| Equipo: Floculador mecánico | | | | |
| Fecha | Orden # | Trabajo realizado | Costo (US\$) | Tiempo |
| 10-03-88 | 123 | Cambio de rol | 21,00 | 3 horas |
| 15-06-88 | 1.200 | Corregir vibración | 10,00 | 1,5 horas |
| 13-09-88 | 1.323 | Corregir vibración | 10,00 | 2 horas |
| 02-01-89 | 1.589 | Cambio de roles | 50,00 | 6 horas |
| 02-05-89 | 1.645 | Cambio de roles | 50,00 | 6 horas |

Figura 5-7. Ficha de historial de ejemplo

Del análisis de las fallas de este equipo se nota una tendencia al cambio de rodamientos, que hace sospechar de una falla en el balanceo de las aspas del agitador. De acuerdo con esta información, se procede a balancear el agitador y se inicia como si este se encontrara en condiciones iguales a las que tenía cuando fue instalado. Se establece entonces un programa de inspecciones para determinar el grado de vibración aceptable y se determinan los niveles de alarma para el agitador. Esto protegerá al equipo de la necesaria rutina de cambio de rodamientos. En este caso, la estrategia que se debe adoptar no es la del rediseño de los rodamientos sino más bien el estudio de las aspas del agitador de tal manera que sean rediseñadas para soportar el trabajo que se les está demandando sin producir la mencionada falla en el balanceo. Esta corresponde a la estrategia número 5 mencionada en la sección 2.4.

Este tipo de análisis se llevará a cabo para todas y cada una de las partes de la planta de tratamiento y se escogerán las estrategias correspondientes. Finalmente, se establece un plan que cubra todas las instalaciones y que comprenda una combinación de las estrategias estudiadas.

En la implantación de este plan se giran las órdenes de trabajo correspondientes. Estas órdenes pueden ser formuladas directamente desde el programa

computarizado o, en su defecto, el ingeniero puede establecer un sistema manual de órdenes. El sistema computarizado de mantenimiento no es tema de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

Babcock, Russell. *Instrumentación y control de plantas de tratamiento*. Limusa, 1982.

Holderbank. *Mantenimiento preventivo*. Ginebra, 1973.

Ortega, Carlos H. “Operación y mantenimiento de aparatos de medida y regulación de flujo”, s. d.

Palacios, Enrique. *Manual de instrucción. Versión preliminar de mantenimiento de plantas*. 1981.

ANEXO A

Instrumentación de plantas de tratamiento de agua

El uso de instrumentos de medición y regulación en las plantas de tratamiento de agua es apenas un reflejo de la situación que se presenta en todas las instalaciones industriales, donde es necesario conocer el comportamiento de los procesos correspondientes y su efecto en la productividad general de la planta. Por esto, los conceptos de control son familiares en la ingeniería industrial y se reconoce que debido precisamente al rápido avance en la técnica y en la complejidad de los procesos industriales —particularmente en la industria química— se hizo necesaria la formulación de principios para racionalizar la producción a través del uso de “sistemas de control”. Este es el origen de la técnica que nos ocupa.

En el diseño y operación de nuestras plantas de tratamiento de agua, que tradicionalmente se han efectuado lejos de las técnicas de la ingeniería industrial, se han implantado diversos grados de mecanización sin el uso de conceptos de “control de procesos”, por lo cual se registra actualmente un cuadro confuso en cuanto a tipos de equipo, grados de automatización, condiciones de operación y mantenimiento.

Para salir de esta situación irregular, es importante que el especialista en tratamiento de aguas se entere de los aspectos básicos de la ingeniería de los sistemas de control y este es el propósito de este capítulo, que se inicia con las definiciones de los términos empleados en la exposición.

DEFINICIONES

El término “control” y su sinónimo “regulación” se usarán indistintamente en estas explicaciones para denominar la acción correctiva y de supervisión que se ejerce sobre las variables que definen un determinado proceso. El conjunto de medios físicos que actuarán sobre las variables principales de este proceso se denomina, a su vez, “sistema de control”.

La noción de “control” es de dominio corriente en nuestra sociedad industrializada; también lo es el concepto de “sistema”, que proviene de la reciente tecnología de la cibernética y su mayor aplicación: las computadoras.

La teoría de los procesos de control comienza estableciendo el concepto de “control” ligado al de “sistema”; en otras palabras, la acción de regular implica la presencia de varios componentes; a saber:

- Medición
- transmisión de informaciones (señal);
- recepción de las informaciones;
- comparación entre señal y pauta (índice de control);
- generación de una acción correctiva.

Son estos elementos los que conforman el “sistema de control”.

PROCESOS

“Proceso” es una operación donde se presenta, por lo menos, una variación en la característica física o química de un determinado material. Esta definición, adaptada a la teoría de control, es muy amplia y cubre no solo las “operaciones unitarias” que se estudian en ingeniería industrial, sino que también el flujo en una tubería o un tanque de agua se considera aquí como “proceso”.

Cuando se aplica un sistema como el descrito anteriormente a un proceso determinado y se actúa constantemente sobre alguna de las variables de tal proceso, de manera que dentro del propio sistema se determina la eficacia de la acción correctiva (mediante una “retroalimentación”), el resultado será que la variable manipulada mantendrá un valor constante, independiente de los cambios externos al sistema. En este caso tenemos un “sistema de control automático”, “regulación automática” o “automatización”.

Aunque este es un caso particular de “sistema de control”, se anota que en la literatura técnica generalmente el término “control” significa “control automático”.

El proceso es un eslabón en el ciclo de la automatización; es decir, pertenece al sistema de control. Para una mejor comprensión de los conceptos de regulación automática, es conveniente analizar algunas características de los procesos que se relacionan con la aplicación del control.

Son variables típicas de los procesos industriales la presión, la temperatura, el caudal, el nivel, etcétera. La selección de la variable que debe ser regulada es

decisiva para la eficacia de un sistema de control automático. Normalmente en los procesos se puede identificar un agente principal o un medio de equilibrio, tal como el combustible o el volumen líquido de un recipiente; en estos casos, la variable regulada será el flujo de combustible o el nivel del tanque, respectivamente.

Las características básicas de los procesos son las siguientes:

- Cantidad;
- potencial;
- tiempo.

La cantidad expresa la magnitud de las variables del proceso, tal como el número de calorías, de metros cúbicos, de kilos de vapor, etcétera.

El potencial de un proceso es el “desnivel” de energía aprovechable que se expresa por la temperatura, la presión, la diferencia de niveles, etcétera.

La capacidad se define como la relación entre cantidad y potencial; representa, por ejemplo, la aptitud para almacenamiento de calor en un cuerpo o el volumen de líquido contenido en un depósito a un nivel determinado.

La resistencia de un proceso es la relación entre potencial y cantidad que circula por unidad de tiempo. En la transmisión de calor por conducción, es el inverso de la conducción térmica.

AUTORREGULACIÓN

Algunos procesos están dotados de una tendencia al equilibrio después de una perturbación. De ellos se dice que poseen “regulación inherente”, siendo este el caso más frecuente en las plantas de tratamiento de agua, según la siguiente explicación:

Si un tanque recibe alimentación constante de agua y tiene una salida en el fondo, el nivel se mantendrá en una altura tal que la entrada y salida del agua estén perfectamente equilibradas.

Si se aumenta el gasto de entrada y se lo conserva en su nuevo valor, se produce un desequilibrio momentáneo entre entrada y salida, el nivel tenderá a

subir aumentando, a su vez, el gasto de salida, debido a una mayor presión sobre el fondo del tanque. Esto llevará al sistema a un nuevo estado de equilibrio donde el nivel permanecerá estable.

El caso inverso también es válido y corresponde a un tanque donde una fluctuación de nivel impuesta por circunstancias distintas de variaciones del gasto como el aumento de fricción en un filtro se hace necesaria para mantener equilibrio entre la entrada y salida (cuando no se dispone de regulación automática).

Un proceso que carece de autorregulación se da en el caso de un tanque cuya salida de agua es mantenida constante (mediante una bomba). Al incrementarse la alimentación, el nivel aumentará continuamente sin encontrar un nuevo estado de equilibrio.

Se dice que la regulación inherente es una propiedad de los procesos, por la cual se alcanza el equilibrio después de una perturbación, en ausencia de control. En el caso del tanque, el nivel se estabiliza a una altura h tal que:

$$Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}} = l \cdot h$$

OBJETIVOS DEL CONTROL

Cuando se aplica el control automático, se persiguen las siguientes ventajas:

- a) 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 siempre en forma igual.

- b) Aumento en la cantidad de la producción, por la reducción en las pérdidas por fallas humanas, por la economía en materia prima, en energía y en mano de obra.
- c) Se obtiene una operación más segura por las razones antes mencionadas.
- d) Economía en el uso de personal y en el uso de productos o materias primas.

- e) Control exacto de las especificaciones del producto conocido como control de calidad.
- f) Control de los costos de producción y del consumo de los componentes.
- g) Facilita la disposición en la instalación del proceso, pues las unidades pueden ser más compactas.
- h) Facilita todas las rutinas de operación.

En algunos casos, el control es indispensable para ciertos procesos.

Se utiliza personal más capacitado y, por otra parte, el aumento en la productividad genera más empleo secundario y obliga a que el operario se capacite.

APLICACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

Se debe aclarar el significado de “instrumentación”, término que usaremos para definir el uso de equipo para medida de las variables de proceso, tales como flujo y nivel.

Es un hecho que las instalaciones de tratamiento de agua tienen una gran expansión en cuanto al número de plantas, su capacidad, velocidad de proceso y exigencias sobre la calidad del producto. Este crecimiento ha creado una mayor necesidad de instrumentación y control automático, aunque el costo del agua tratada no ha aumentado significativamente.

VENTAJAS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Aumento de la eficiencia por los siguientes medios:

- a) Permite medir de manera exacta las variables de los procesos, lo que facilita la operación y la utilización óptima de las instalaciones.
- b) Facilita el análisis de las condiciones de operación y la planeación de las operaciones futuras.
- c) Medición continua y control de los aspectos de calidad del agua.
- d) Permite el diseño y operación de plantas con cargas muy superiores a los valores tradicionales.

VENTAJAS DEL CONTROL AUTOMÁTICO

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

DESVENTAJAS DE LA INSTRUMENTACIÓN

- a) La instrumentación es costosa.
- b) Aumento del mantenimiento.
- c) Muchos instrumentos son complejos y tienden a mayor refinamiento.
- d) No existe normalización en esta industria, lo que dificulta la selección y reemplazo de los equipos.
- e) Los tipos de instrumentos y modos de transmisión están cambiando continuamente.
- f) El diseño adecuado de instrumentación es un costo que rara vez se reconoce al consultor.

DESVENTAJAS DEL CONTROL AUTOMÁTICO

- a) Los sistemas de alto grado de automatización no son siempre los mejores y su funcionamiento puede ser difícil de comprender para los operadores.
- b) No permite mucha flexibilidad para situaciones críticas.
- c) El personal de operación puede rechazar el sistema cuando no ha tomado parte en su planeamiento y diseño.
- d) La puesta en marcha de los sistemas puede ser muy difícil y desanimadora.

- e) Pueden dejar de percibirse fallas del control automático y se pueden crear problemas de operación.

CONTROL AUTOMÁTICO

Recapitulando, diremos que “control automático” de un proceso es el conjunto de elementos destinados a mantener en su valor deseado las características físicas o químicas que le son propias, como presión, gasto, nivel, etcétera.

Cuando se han establecido las condiciones óptimas de un proceso, ellas pueden variar en forma inesperada por numerosas circunstancias. Es necesario, por lo tanto, introducir en la planta un sistema de control que atenúe las perturbaciones en los valores prefijados de las variables o parámetros del proceso.

Existe la posibilidad de algunos procesos de gran estabilidad o autorregulación, de emplear sistemas de control manual a veces llamados *sistemas semiautomáticos*. Por ser una alternativa viable en algunos casos y como corresponde al mínimo grado de mecanización que se puede proveer en una planta de tratamiento, esta opción se va a tratar aquí al describir los mecanismos específicos usados en las plantas de tratamiento.

Entre tanto, las explicaciones se referirán solamente a la regulación automática.

PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Ya hemos mencionado los componentes de los sistemas de control. La forma como actúan involucra la transmisión de la información (señal) de los cambios de la variable que se controla a la unidad reguladora. Esta unidad compara la señal con un índice prefijado o punto de control y produce la reacción necesaria para obtener el equilibrio del proceso.

Según esto, al hablar de regulación, se supone siempre una medición; es decir, la forma de generar la información que el regulador recibe. Por otra parte, la medición en la teoría de sistemas de control no se considera como una operación aislada y autosuficiente, sino que se relaciona con la finalidad que esta medición persigue dentro de un sistema de regulación.

En el caso, aparentemente más lejano a la aplicación de control, de las mediciones de laboratorio de una planta de tratamiento, se trata de un procedimiento de control no mecanizado: el operador genera la información mediante las mediciones, compara los resultados con las normas adoptadas (índice de control) y efectúa las correcciones correspondientes en el proceso. En resumen, toda actividad de supervisión se rige por los principios de la teoría de control. Se pueden encontrar los elementos de la regulación en numerosas actividades de la vida diaria.

El ejemplo clásico en los textos es el del calentador de agua; inicialmente, el operador hace las veces de regulador y efectúa su labor en ciclos que van de la toma de temperatura al accionamiento de la válvula de vapor. Se aprecia que toda acción de regulación se procesa a través de un ciclo o circuito cerrado (“*closed loop*”), lo que constituye el concepto fundamental del control.

El sistema “manual” puede ser “automatizado” mediante el uso de un termómetro, una válvula de control motorizada y un dispositivo comparador (regulador). También aquí aparece un circuito cerrado compuesto totalmente de elementos mecánicos y físicos, al cual nos referiremos en adelante al usar el término *circuito cerrado*. La acción en circuito cerrado se repite continuamente, puesto que la acción correctiva modifica la variable manipulada del proceso; hay nueva medición, comparación y acción correctiva hasta llegar a un valor tan próximo como sea posible del valor deseado o índice de control (“*set point*”). El dispositivo automático “observa” en cada interacción el resultado de su trabajo y transmite esta información al circuito. Esta característica llamada “retroalimentación” es la condición fundamental en el control automático.

ELEMENTOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Las partes fundamentales y sus funciones son las siguientes:

- a) *Detector o sensor*. Elemento primario destinado a la medición de la variable que se regula.
- b) *Transmisor*. Modifica la medición y la transfiere como información codificada dentro del circuito cerrado.
- c) *Receptor*. Recibe y traduce la información en términos utilizables para lectura instantánea, registro o acumulación (totalizador). Es el instrumento de lectura.

- d) *Unidad de control, controlador o regulador.* Mide y compara la señal con un valor prefijado que representa la condición deseada y genera una señal correctiva codificada que se transfiere al circuito.
- e) *Elemento de control final o válvula de control.* 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.

Algunas condiciones particulares pueden modificar el circuito de control; cuando la distancia entre el elemento primario y receptor o regulador es pequeña, no se usa el transmisor. En distancias del orden de 150 a 300 metros se usa de preferencia el transmisor neumático que envía señales estándar de aire a presión. Para distancias mayores, se emplea el circuito eléctrico o electrónico, aunque la tendencia actual es el uso únicamente de circuitos electrónicos independientemente de las distancias.

DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL

De lo tratado hasta aquí se deduce la importancia de los sistemas de control para obtener la máxima eficiencia en los procesos industriales. Desde la introducción del primer regulador automático industrial, el de balas de Watt en el siglo XVII hasta nuestros días, el desarrollo de la técnica de control automático ha sido impresionante y en la actualidad se dispone de numerosos equipos de regulación aptos para las más diversas circunstancias y aplicaciones.

También las modalidades de control que permiten los equipos modernos son variadas y permiten una actuación gradual y progresiva sobre las variables de los procesos.

Para describir el uso de los modernos equipos de medición y regulación, se ha introducido el término genérico “instrumentación”, reservando el término “control” al manejo de los procesos mediante conjuntos de equipos (instrumentos) que integran sistemas de regulación manual o automática.

A fin de estudiar los componentes de los sistemas de control, es útil establecer inicialmente el tipo de problemas y objetivos específicos en el control de los procesos de las plantas de tratamiento de agua.

En general, los procesos de las plantas de agua son los dotados de regulación inherente, fácilmente regulables mediante sistemas de control simplificados. En cambio, estos procesos son sumamente complejos desde el punto de vista fisicoquímico y electroquímico.

Se pueden identificar normalmente en las plantas entre cuatro y seis unidades de tratamiento con flujo continuo, que en algunos casos (como los filtros) se subdividen en compartimientos con flujo paralelo, cuyo número es determinado por el tamaño de la planta y su capacidad.

En nuestra práctica, la planta se diseña y opera para un caudal tratado relativamente constante y se sirve de tanques de almacenamiento para atender las variaciones de la demanda. Esto permite que el sistema de control no necesite un campo de operación muy amplio, pues las fluctuaciones son relativamente pequeñas.

En una planta de tratamiento, las distancias para la transmisión de las señales son relativamente cortas, lo cual es otra ventaja para la aplicación de control.

Por otra parte, los problemas más frecuentes en el funcionamiento de las plantas provienen 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 la sobrecarga de su capacidad.

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

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

Existen numerosas opciones de control para los problemas anotados y al proyectista se le dificulta la selección; para ayudar a resolver estas cuestiones, se tratarán las características de los componentes de los sistemas de control en forma separada inicialmente y luego se establecerán las orientaciones para elegir los conjuntos de control más aptos para la tarea que les corresponde en las plantas de tratamiento de agua.

DETECTORES O SENSORES

Estos elementos hacen el primer paso de la regulación, que es una operación de medición continua de la variable por 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 presión, caudal, nivel, etcétera.

El tipo de sensor depende de la variable por 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 (transductor).

Ejemplos de “transductores” son los dispositivos de fuelle, diafragma, tubo de Bourdon para el caso de la presión.

Los diferentes sensores deben ser calibrados para garantizar la exactitud de la medición. Para esto se usan patrones de medida.

SENSORES DE PRESIÓN

A partir de los principios de la física de la presión, se establecen tres categorías de medidores de presión:

- a) De presión absoluta;
- b) de presión efectiva;
- c) de presión diferencial.

Los detectores de presión pueden clasificarse, según su principio de funcionamiento, así:

Por equilibrio de presiones

- a) Columnas de líquido en tubo en U;
- b) campana;
- c) celda de presión diferencial.

Por deformación de un material elástico

- a) Tubo de Bourdon;
- b) membrana o diafragma;
- c) 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 uno apto 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 es para uso general hasta 1.000 kg/cm^2 . El de espiral, para presión entre 1 y 15 kg/cm^2 , y el de helicoide, generalmente para presión mayor de 15 kg/cm^2 . Estos últimos ofrecen movimiento de mayor amplitud, más fuerza (par), respuesta más rápida, reducción de la llamada banda muerta y, por lo tanto, mayor precisión.

En los circuitos de control 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 llamada “presión diferencial”. La fórmula simplificada expresa que la presión diferencial es igual al producto de la diferencia en altura del líquido 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 de este líquido en una cámara externa. Al ejer-

cer 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.

- 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 ítem “Transmisores”.
- El diafragma se emplea en la medición de presiones muy bajas. Se utiliza una membrana fina de material elástico metálico o de neopreno, teflón, caucho, etcétera. La membrana está ligada a un resorte y a un brazo que forma 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 en el interior del fuelle o en su superficie externa. Es muy usado en los instrumentos neumáticos.

SENSORES DE FLUJO

La medición de caudales es la más importante en el tratamiento de aguas. El problema de la medición de flujos se aborda en forma sistemática en la hidráulica y se dispone de excelentes tratados dedicados exclusivamente a este asunto, como *Principles and Practice of Flow Meter Engineering*, de L. K. Spung.

En realidad, para la práctica de la regulación automática, es básica la comprensión de la teoría de la medición de caudales.

Hay tres tipos fundamentales de estos medidores:

Indirectos

Entre los cuales se encuentran:

- a) Los de presión diferencial (pérdida de carga variable);
- b) de área variable;
- c) de régimen crítico.

Directos o volumétricos

- a) De desplazamiento positivo;
- b) de velocidad.

Especiales

- a) Magnético;
- b) Pitot-magnético;
- c) Ultrasónico.

La operación de los medidores usados en la industria se basa en el teorema de Bernoulli, que expresa que en un conducto la energía en dos puntos es igual si se desestiman las pérdidas por fricción.

Considerando una pletina de orificio colocada en una tubería, el cambio en la sección transversal entre el tubo y el orificio produce una modificación en la velocidad, lo que produce, 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 del “diferencial” conectando los dos brazos de un manómetro en U a cada lado del orificio.

Según la fórmula, el gasto es función cuadrática del diferencial, circunstancia esta que influye en el diseño de los equipos para control de flujos, bien sea en la forma de expresar las escalas o en la necesidad de introducir en el circuito mecanismos “extractores de raíz cuadrada”.

ELEMENTOS PRIMARIOS DE PRESIÓN DIFERENCIAL

Los elementos primarios usados en medidores de tipo diferencial son todas las modificaciones del tubo Venturi desarrollado por Herschel en 1988. Se trata de un productor de alto diferencial que presenta una 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. Se presenta así 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 veinte años se han perfeccionado numerosos elementos similares al Venturi, que presentan alto diferencial y muy baja pérdida de carga; esta última condición se expresa también como “alta recuperación” de la carga hidráulica.

Uno de los más interesantes es el tubo Dall, creado por H. E. Dall para la firma inglesa Kent y diseñado específicamente para obtener la mejor utilización del efecto de la curvatura de la garganta del tubo; así, crea un gran diferencial al amplificar un pequeño cambio en las presiones, manteniendo a la vez una pequeña pérdida de carga. En la actualidad es de los mejores elementos primarios disponibles, aunque es poco accesible por su costo y por tratarse de un dispositivo de tamaño considerable frente a otras alternativas.

ORIFICIOS

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

Un “orificio” está constituido normalmente por una pletina delgada circular de acero inoxidable que tiene una perforación concéntrica; existe el orificio excéntrico y el segmental, usados en líquidos con cantidades limitadas de sólidos.

Las especificaciones para orificios de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) establecen el tamaño y posición de líquidos con aire en solución; en ciertos casos se practica otra perforación al fondo de la planta.

En la fabricación del orificio se da gran importancia 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 milímetros para medidas de gran precisión. Los bordes no deben ser exactamente perfilados; las placas con orificios se instalan entre dos bridas.

La técnica de medición del gasto con 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 los siguientes:

- Tomas en las bridas.
- Tomas en la tubería.
- En los puntos de mayor diferencial (vena contracta), que se suele aproximar por las posiciones a distancias D y $\frac{1}{2} D$ de la cara de impacto del orificio, siendo D el diámetro interno de la tubería.
- En los puntos de pérdida de carga permanente (*pipe taps*), equivalente a $2,5 D$ y $8 D$.
- En la propia placa de orificio, mediante cámaras anulares. Se usan en la técnica europea y son de gran precisión.

VENTAJAS DEL ORIFICIO

- a) Fabricación simple y de muy bajo costo.
- b) Fácil mantenimiento (el cambio es muy sencillo).
- c) Posibilidad de fabricarlo para las condiciones particulares de un caso de aplicación.
- d) Posibilidad de trabajar en una gama de diferenciales muy amplia, especialmente de operar en la gama llamada “de bajo diferencial”, que va normalmente de 5 a 50 cm de columna de agua.

DESVENTAJAS DEL ORIFICIO

- a) Mayor pérdida de carga que otros sensores.
- b) La precisión es aceptable en la faja: $0,35 d/D$ a $0,75$.
- c) El borde no se desgasta.

TUBO DE PITOT

Es un dispositivo que mide directamente la diferencia entre la presión dinámica y la presión estática del fluido. Su medición se limita a la velocidad del flujo

en el punto donde se coloca el tubo que posee un orificio enfrentado al flujo; el cálculo del flujo requiere la determinación del perfil de velocidad dentro del tubo y de la velocidad media, por lo que se trata de un medidor de tipo de muestreo.

Su aplicación en plantas de tratamiento es prácticamente nula, con excepción de la verificación de otros medidores.

Su importancia radica en la utilización de su técnica en los medidores modificados del tipo Dall-Pitot y Pitot-magnético.

SELECCIÓN DEL ELEMENTO PRIMARIO

Uno de los pasos más importantes en el diseño de sistemas de control de flujo es la selección del elemento primario. En este punto preciso, la literatura técnica no contiene orientaciones claras.

La recomendación básica es hacer un cálculo económico de la energía consumida al mover el fluido venciendo las pérdidas de carga y comparándola con el costo inicial y de mantenimiento de cada elemento.

En la aplicación a las plantas de tratamiento, se presentan las siguientes condiciones relacionadas con el uso de elementos primarios de flujo:

- 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 filtración y en la alimentación de agua de lavado, si el tanque de lavado es abastecido por bombeo.
- La gama de variación de los caudales en las plantas tiende a ser cada vez mayor, ya que están introduciendo mejoras sustanciales en los procesos de tratamiento que permiten aumentar en dos y tres veces el gasto de diseño de las diversas unidades.
- Muchos elementos primarios de las plantas van colocados en la galería de conductos en las líneas de servicios a los filtros; en esta localización los elementos no disponen de la longitud de tramo recto, que es requisito básico para la precisión en la medida. Tablas con estos requisitos se encuentran en las informaciones técnicas de los fabricantes de equipos. Por otra parte, no

se requiere gran exactitud en la medición del flujo efluente de los filtros. Un valor práctico de la precisión varía entre 5% y 7%. Solamente la medición global de la entrada y salida de la planta requiere una buena precisión.

Se conoce la relación que hay en los productores de diferencial entre la llamada relación beta, β , que es igual a d/D , (donde d es el diámetro del orificio y D el diámetro del tubo en el que se inserta la placa con el orificio) y las pérdidas de carga permanentes. En la práctica se trabaja con valores beta cercanos o inferiores a 0,75, aunque en teoría se puede llegar a valores tan bajos como 0,35.

El procedimiento para la selección del sensor de flujo consiste en calcular primero el diferencial para el flujo máximo previsto, tomando un valor beta de 0,75 y usando dos o más alternativas de elementos primarios. Si el diferencial puede ser aceptado por el instrumento secundario (el siguiente en el circuito), entonces se investigan las pérdidas de carga haciendo cálculos hidráulicos completos donde se determine la disipación de carga hidráulica en cada componente del circuito hidráulico, especialmente en las válvulas de control.

Hay un error común en esta labor de selección, consistente en descartar a priori los orificios debido a su alta pérdida de carga. Esta situación proviene del hecho de que en los gráficos que expresan la pérdida de carga (como porcentaje del diferencial) en función de la relación beta, los elementos con mayores valores son los orificios.

Sin embargo, debe aclararse que aunque el valor de este porcentaje de diferencial es relativamente alto, el valor real de la pérdida puede estar muy bien dentro de los límites tolerables.

El error mencionado proviene del hecho de que la técnica de medición de gastos trabajó en décadas pasadas con gamas de diferencial alto comprendido entre 2,5 y 12,5 metros de columna de agua.

Posteriormente, se modificó un tanto esta condición gravosa impuesta por las limitaciones de los equipos secundarios (transmisores y receptores) usados en aquellas épocas. En los últimos años los valores normales del diferencial de operación están alrededor de 2,5 metros de columna de agua en algunos tipos de equipos.

Pero la realidad es que el avance en instrumentación introducido con el perfeccionamiento de transmisores de bajo diferencial (5 a 50 cm de columna) echa por tierra todas las consideraciones tradicionales basadas en el uso de lo que se puede llamar “tecnología de diferencial alto”.

Particularmente, en cuanto a pérdida de carga, se desdibuja toda la importancia de lo expuesto anteriormente, puesto que en la “tecnología de bajo diferencial” un orificio que trabaje a 12 cm de columna de agua presentará, en el peor de los casos, pérdidas permanentes del orden de 10 cm, consideradas aceptables en cualquier caso.

La comparación entre orificio y tubo Venturi para el caso de operación a bajo diferencial es ampliamente favorable al orificio si la gama de variación de flujo no es mayor de 4 a 1. Un Venturi trabajando a 1,5 metros con una pérdida de 20% dará un valor real de 30 cm de pérdida; un orificio trabajando a 50 cm con una pérdida de 50% dará un valor real de 25 cm de pérdida. Se debe anotar también que cualquier exceso en la carga o presión disponible que no sea disipado por la tubería y el elemento primario tendrá que serlo a través de una válvula de control.

MEDIDORES DE RÉGIMEN CRÍTICO

Llamados también *medidores de canales abiertos*, son de primera 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 flujo son los siguientes:

- a) *Vertederos*. Hay dos vertederos básicos, el rectangular y el triangular y cada uno de ellos con varias modalidades. 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.
- b) *Canaleta Parshall*. Es un tipo de Venturi abierto cuyo funcionamiento se basa en la presencia de una restricción al flujo que convierte la carga estática en carga de velocidad. La pérdida de carga es menor que la de los vertederos, puesto que no se requiere ventilar la lámina y es apto para líquidos que tienen sólidos en suspensión.

El costo de la canaleta Parshall es muy superior al de un vertedero. Sus ventajas consisten en la mayor gama de medición, mejor precisión y en la posibilidad de usar la turbulencia en la dispersión y mezcla de algunos productos químicos.

En ambos casos, en la práctica la correlación entre nivel y flujo tiene un error de base del 3 al 5%. Cuando se combinan el error básico y el del instrumento que mide el nivel, el error total puede llegar a ser $\pm 5\%$.

El flujo se determina por una medición de nivel, con el uso de ecuaciones características de cada modalidad de medidor. Los dispositivos usados para nivel son los siguientes: flotador para instalar en pozo de medición, flotador colocado sobre la corriente y tubo de burbujeo.

Las demás clases de medidores de flujo, no obstante su importancia, no se emplean normalmente en las plantas de tratamiento de agua.

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
 - a) Flotador;
 - b) electrodo;
 - c) visor de nivel.

- De medición indirecta
 - a) De burbujeo;
 - b) manómetro en U;
 - c) caja de diafragma;
 - d) celda de diferencial de presión.

FLOTADOR

Es el sistema más común en abastecimiento de agua en el caso de tanques abiertos. Su mayor ventaja es la de no ser afectado por la gravedad específica del líquido y permitir la medición de grandes variaciones de nivel (hasta 30 metros).

El sistema consta del flotador y un contrapeso colocados en una polea, cuyo movimiento se usa para accionar el mecanismo indicador o transmisor. Su aplicación está limitada a canales abiertos, preferentemente para la medición de flujos. Una de sus desventajas es su sensibilidad a movimientos leves del líquido.

BURBUJEO

En este sensor se hace circular continuamente una débil corriente de aire, bajo presión constante, a través de un tubo de pequeño diámetro que está sumergido en el líquido. En estas condiciones, la presión en el tubo estará siempre en equilibrio con la altura hidrostática del líquido medida desde el extremo sumergido del tubo. La medición se hace, por lo tanto, con un sensor de presión, generalmente un manómetro.

La gama de utilización es muy amplia: de 0 a 40 metros según la presión disponible para el burbujeo; el flujo recomendado es de 0,5 centímetros.

Las ventajas de este método son las siguientes:

- Simplicidad;
- la indicación directa puede llegar hasta 300 metros.

Se recomienda para variaciones de nivel no muy rápidas.

ANEXO B

Instrumentos de control

Se indican aquí características de algunos de los instrumentos de control que se están utilizando ampliamente en la actualidad.

DOSIFICADOR AUTOMÁTICO DE CLORO CON CONTROL DE CLORO RESIDUAL

El control de la dosificación del cloro se hace, en estos equipos, en forma automática, encendiendo y apagando el clorador mediante la medición continua del cloro residual en la misma masa de agua. Los niveles de cloro en masas de agua estáticas son de difícil control y mantenimiento, debido a la recirculación del agua y al gran tiempo de retardo existente entre la inyección del cloro y su medida por el analizador (se produce una mezcla pobre) o cuando se producen cambios bruscos en la demanda de agua. En estas circunstancias, el dosificador automático con control de cloro residual adquiere gran importancia. Estos equipos sirven para dosificaciones de hasta 150 kg/hora. Estos dosificadores pueden ser montados directamente en los cilindros de gas.

TRANSMISORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL

Los transmisores y acondicionadores de señal se emplean para amplificar y acondicionar señales muy pequeñas, generadas por un transductor de proceso. Esta señal es convertida en corriente o un voltaje para mover otros instrumentos como graficadores, alarmas, disparadores y controladores.

Los transmisores a dos hilos son los más ventajosos cuando el transductor de proceso se encuentra alejado del instrumento que debe operar y no se tiene energía disponible cerca del transductor. La potencia necesaria y la correspondiente señal acondicionada viajan por la misma línea.

Los amplificadores a cuatro hilos se usan cuando se dispone de energía eléctrica alterna en el sitio y se requiere una salida de 0 a 1 voltios o de 0 a 5 voltios. Estas unidades usan dos hilos para la potencia y los otros dos para la señal.

CONTROLADORES BASADOS EN MICROPROCESADORES

El control de los procesos industriales es ahora más confiable y eficiente por el empleo de microprocesadores en los instrumentos de medición y control. Las salidas de control son más estables y el empleo de *software* apropiado hace el control más versátil. Con estos controladores se puede manejar información de flujos, pH y conductividad, entre otros. En conjunto, con estos controladores se tiene una gran variedad de analizadores y sensores que eliminan la necesidad de la toma de muestras y el consiguiente retardo en el tiempo de toma de decisiones en cuanto a cambios que deban producirse en el proceso.