

Control supervisorio para operar el sistema Cutzamala

Carlos Hernández Herrera

Comisión de Aguas del Valle de México, SARH

Una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para la capital del país y municipios conurbados del Estado de México es el sistema Cutzamala, cuya longitud y capacidad de bombeo lo convierten en uno de los más importantes de América Latina: se localiza entre los estados de México y Michoacán y capta el agua para su bombeo de ocho presas. Debido a las características del sistema y a sus variables hidráulicas y eléctricas, se requiere de un sistema de control supervisorio para hacer más expedita y segura su operación. El control proyectado es del tipo de operación centralizada mediante un equipo electrónico idóneo que garantizará la continuidad en el servicio y servirá para programar los mantenimientos preventivos y correctivos indispensables en sistemas de abastecimiento de esta magnitud.

Configuración del sistema Cutzamala

Entre las grandes urbes se encuentra la ciudad de México y su área metropolitana, cuya población actual se calcula aproximadamente en 20 millones de habitantes, a la cual es necesario abastecer de agua potable. El organismo responsable del suministro es la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos a través de la Comisión de Aguas del Valle de México, la cual, entre otras obras, cuenta con el sistema Cutzamala. Su capacidad de bombeo es de hasta 24 m³/s. El agua se eleva a una altura aproximada de 1 200 m, para lo cual fue preciso instalar cinco plantas de bombeo con grupos motor-bomba de diferentes capacidades que abarcan desde 2 985 kW (en la PB5A) hasta 15 391 kW (en las PB3 y 4).

El sistema está constituido por dos tramos principales. El primero, por bombeo, va de la PB1 hasta la torre de oscilación 5 e incluye las PB2, 3, 4, 5 y 5A, las cuales operan en forma de cascada; esto significa que la variación de un parámetro hidráulico en una de ellas se refleja en las otras (hacia adelante o hacia atrás) que forman parte de dicha cascada. En el segundo tramo el escurrimiento es por gravedad y va desde la torre de oscilación 5 hasta la ciudad de México y su zona conurbada. Las aguas que se generan en la cuen-

ca del río Cutzamala se captan en los vasos de las presas Villa Victoria, Valle de Bravo, Tilostoc, Colorines, Ixtapan, El Bosque y Tuxpan. Los gastos aprovechables en Villa Victoria y Valle de Bravo son debidos a cuencas propias. Por lo que se refiere a Colorines, le llegan aguas provenientes de la presa El Bosque y sus filtraciones y de la presa Tuxpan. El gasto medio que se pretende conducir es de 19 m³/s que, tomando en cuenta las variaciones estacionales, corresponde a 20 m³/s como gasto mínimo en épocas de lluvias y 24 m³/s de gasto mínimo en el estiaje.

Adicionalmente a las captaciones descritas, el sistema Cutzamala está formado por una línea de conducción de 111.8 km, constituida por dos tramos principales: el primero, de Colorines a la torre de oscilación 5, tiene cinco tramos de bombeo y cuatro de gravedad; su longitud es de 34.2 km y la carga total a vencer, de aproximadamente 1200 m; el segundo, entre la torre de oscilación 5 y el túnel Analco-San José, es un escurrimiento de gravedad con una longitud de 77.6 km. En el primer tramo el bombeo se realiza mediante seis plantas con las características anotadas en el cuadro 1; cada una forma parte de un módulo que tiene además un tanque de sumergencia y una torre de oscilación; aquél garantiza la sumergencia de las bombas y el volumen necesario por

tiempo de respuesta para arranques y paros, y el segundo para disminuir las sobrepresiones originadas por fenómenos transitorios.

Además de las conducciones y los módulos de bombeo se cuenta con un vaso regulador de 288 000 m³, denominado Donato Guerra, que tiene la finalidad de efectuar el cambio del régimen de bombeo de 20 a 24 horas de operación de otras instalaciones como la planta potabilizadora del sistema y las de bombeo 5 y 5A, debido al consumo de energía eléctrica de las otras instalaciones.

El segundo tramo —de escurrimiento por gravedad— está seccionado por los tanques Santa Isabel y Pericos, situados a 17 y 53 km, respectivamente, de la PB5, que es la última del primer tramo (véase ilustración 1).

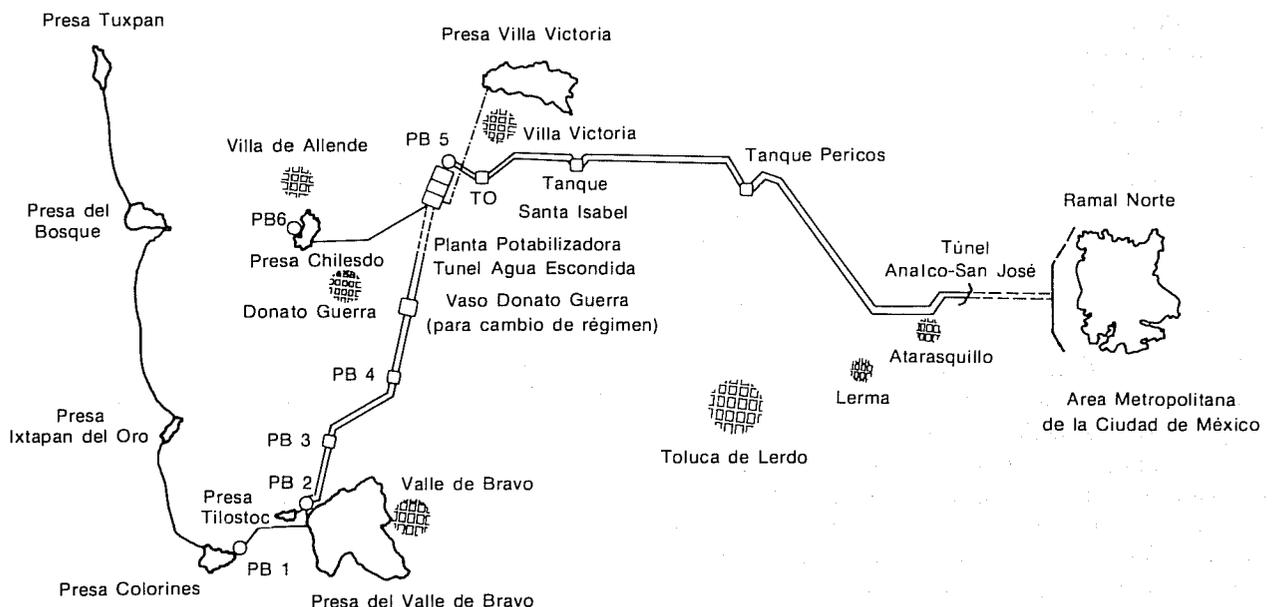
1. Características del equipo de bombeo

	PB 1	PB 2	PB 3	PB 4	PB 5 A	PB 5	PB 6
Num de bombas	5	6	6	6	3	6	3
Q (m ³ s)	4	4	4	4	17	4	17
H (m)	157.00	122.00	350.40	350.00	157.60	174.2	213.2
Pot (kW)	6931	5370	15391	15391	2985	7646	3815
N (rpm)	1200	1200	1200	1200	1800	1200	1800

Como se observa en el cuadro 1, los motores para la operación de las bombas de cada planta

son muy potentes, no corresponden a los equipos comúnmente utilizados en plantas de bombeo y pozos y, dada su capacidad, así como la de las bombas que mueven, se necesita utilizar equipo computarizado adicional para vigilar todas las variables que recomienda el fabricante. Las variables originadas por el equipo motor-bomba se concentran en el tablero de mando y control local (TMCL), que recibe, muestra y envía a otros equipos señales de mando y control como las de arranque y paro del grupo, de variables eléctricas e hidráulicas y, en general, toda la amalgama de señales necesarias para el control adecuado. Lo mismo ocurre con el control y señalización de la válvula esférica, la cual es manejada automáticamente mediante señales de presión, gasto y energía en la planta de bombeo. El arranque, la vigilancia de la operación y el paro de los equipos se efectúan en forma individual con un computador de operación dedicada de programación tipo escalera (PLC) en el que se concentran todas las variables por controlar, de forma tal que no se rebasan los rangos de operación normal. El PLC se encarga también de enviar los comandos de apertura y cierre del interruptor arrancador de los grupos motor-bomba.

1. Croquis del sistema Cutzamala



La operación del sistema Cutzamala se basa principalmente en equipo electrónico, ya que tanto su capacidad de respuesta a perturbaciones como su versatilidad para llevar a cabo los arranques y paros de los grupos motor-bomba son inmediatas.

Operación del sistema

Esta se divide en dos partes, una que funciona durante las 24 horas del día (planta potabilizadora, PB5 y vaso regulador Donato Guerra) y otra que sólo lo hace 20 horas al día (PB1, PB2, PB3, PB4 y PB6), debido a las dificultades inherentes durante las horas pico en la demanda de energía eléctrica.

Planta de bombeo 5

Esta planta se controla independientemente del resto del sistema de bombeo, excepto de la planta potabilizadora, ya que recibe el agua por bombear de su tanque de sumergencia, que es a la vez el tanque de aguas filtradas de la planta potabilizadora; estas aguas son enviadas a la torre de oscilación 5 para ser conducidas por gravedad a la ciudad de México. Esta planta es la más impor-

tante del sistema, ya que en ella se efectúa el último paso para el bombeo del agua ya potabilizada, motivo por el cual se maneja de manera independiente; para su operación se diseñó un sistema de controladores programables (computadoras de operación dedicada) para llevar el monitoreo de señales de control a un tablero mímico y al centro de control para el registro estadístico.

Plantas de bombeo 1, 2, 3 y 4

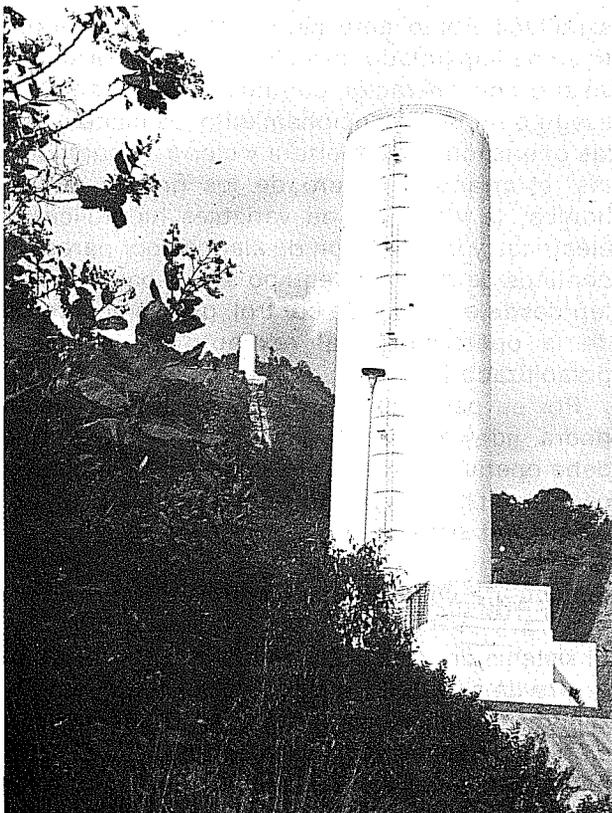
Dada la configuración del sistema Cutzamala, las plantas de bombeo 1, 2, 3 y 4 forman un subsistema que funciona en cascada, aun cuando la PB1 no siempre forma parte de dicha cascada. Por lo tanto, una sección importante del sistema la integran estas plantas de bombeo, por donde se conduce la mayor parte del gasto a manejar. Su operación y control se hacen por medio de un centro de control que tiene la información necesaria para llevar a cabo acciones directas en caso de contingencias.

La PB1 toma el gasto que maneja de la presa derivadora Colorines a la que llegan las aguas de las presas Tuxpan, el Bosque e Ixtapan del Oro. Este gasto, dependiendo de las condiciones imperantes, se bombea hacia la presa Valle de Bravo o va directo al tanque de sumergencia de la PB2; ésta, también según el gasto, toma el agua de la presa de Valle de Bravo o directamente de la planta 1; de la PB2 pasa a las 3 y 4 donde el gasto ha vencido un desnivel de 980 m hasta la torre de oscilación 4.

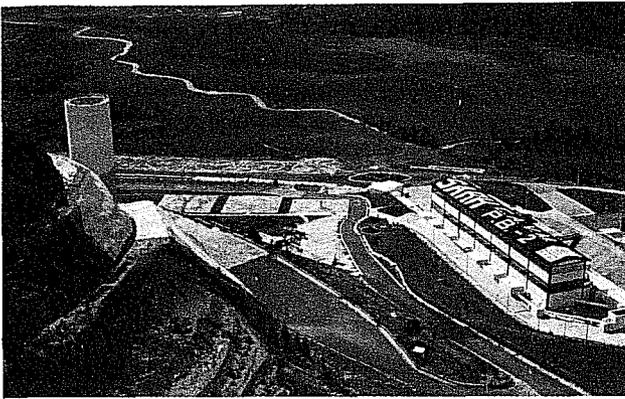
Vaso y estructura Donato Guerra

Debido a la situación de las horas pico, en el trayecto de bombeo entre la presa Valle de Bravo y la planta potabilizadora (PB 2, 3 y 4) se construyeron el vaso regulador y la estructura distribuidora Donato Guerra con objeto de almacenar, en el primero, una cantidad del gasto bombeado para alimentar a la planta potabilizadora durante las 4 horas pico de demanda eléctrica, en que las plantas 2, 3 y 4 quedan fuera de servicio. Por lo tanto, la forma óptima de operar las plantas indicadas es la de satisfacer la demanda del gasto. De ahí que resulta necesario llenar el vaso Donato Guerra con el excedente, para después, alimentar la planta potabilizadora con el gasto procedente del vaso.

La estructura derivadora se divide en dos: la cámara alta, a donde llega el gasto procedente de las plantas de bombeo 2, 3 y 4 y la baja, por donde



Torre de oscilación 3



Planta de bombeo 2

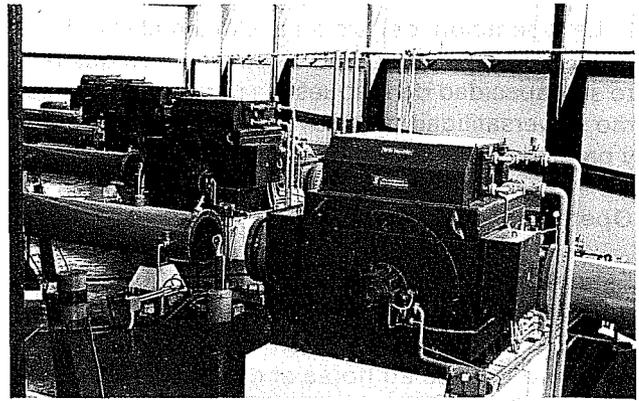
se extrae el gasto durante las 4 horas de paro. Ambas están provistas de tres compuertas, mediante las que se regula el gasto que se envía a la planta potabilizadora. En virtud de que las compuertas de la cámara alta trabajan para un gasto determinado y para una cota de llegada constante, siempre se abren a una altura fija, dependiendo del gasto que se envía a la potabilizadora, lo que no sucede con las compuertas de la cámara baja, cuya altura debe ser ajustada constantemente, según el nivel en el vaso Donato Guerra y el gasto que se esté manejando a la planta potabilizadora.

Planta de bombeo 6

Esta planta permite la regulación del gasto que maneja la planta potabilizadora, al captar las aguas del río San José Malacatepec mediante la presa derivadora Chilesdo, lo que además, ahorra los costos de operación, ya que evita que las aguas del río bajen hasta la presa Colorines. Mediante esta planta se regula el gasto a la planta potabilizadora en caso de contingencia en alguna de las plantas correspondientes a la cascada formada por las PB 1, 2, 3 y 4.

Operación de las presas derivadoras

De acuerdo con la política de explotación, cada presa aporta una cantidad de gasto determinado que debe ser constante; si fuera mayor, la torre de sumergencia podría llegar a derramarse y en caso contrario, el nivel en la torre podría llegar a bajar al punto de poner en peligro la sumergencia de las bombas. Para evitar que suceda alguno de los dos casos, las compuertas de cada presa tienen actuadores eléctricos que se comandan a control remoto, de tal forma que al abrirse, el gasto que pase a la planta de bombeo sea el correcto, ya



Mantenimiento, PB-2

que el operario cuenta con un indicador del gasto que sale de la presa.

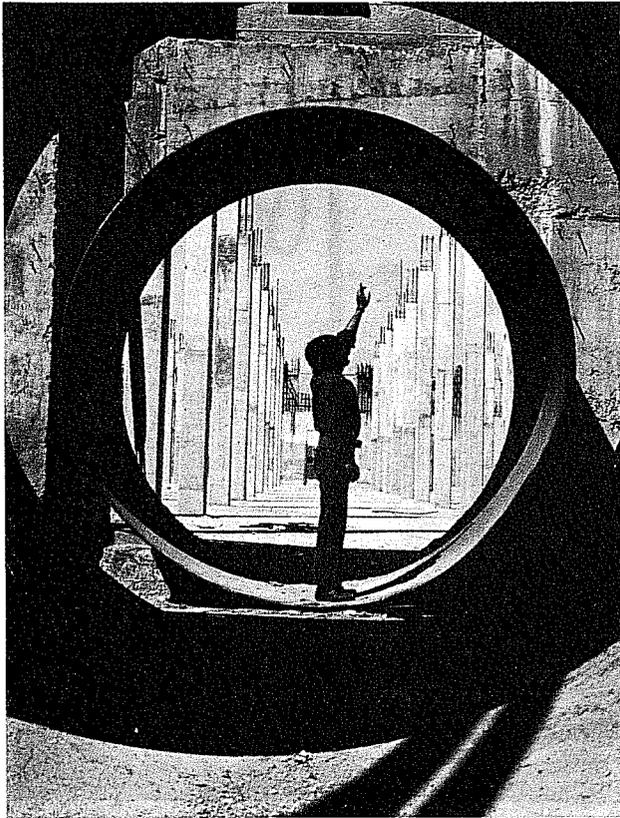
Control de la operación del sistema

El control para la operación del sistema no puede realizarse de manera independiente, esto es, cada planta de bombeo no puede controlarse de manera autónoma, ya que de hacerlo, cada una debería contar con información actualizada de las otras estructuras de control y de la propia, lo que redundaría en la duplicidad de equipo y no sería económico; además, la coordinación general no sería fácil. Por lo tanto, para controlar el acueducto se ha implantado un sistema de control supervisorio con operación centralizada que facilite y asegure un buen funcionamiento, de manera que las operaciones de apertura y cierre de compuertas, el arranque y paro de los grupos motorbomba, la vigilancia de variables hidráulicas y eléctricas y la recepción de alarmas por paros repentinos de cualquier equipo se reciban y ejecuten desde el centro de control, que se encargará de la operación total (excepto de la planta potabilizadora).

Por su parte, el operario general del sistema podrá, además, decidir la política del gasto que debe operar y conocer el estado real que guarda cada equipo o elemento primario de las instalaciones del sistema.

Sistema de control supervisorio

El sistema de control supervisorio (SCS) tiene un centro de control localizado en la planta potabilizadora, 11 estaciones periféricas (EP) y una estación satélite enlazada a la estación 2. Las EP transmiten los datos del sistema hacia el centro de control y ejecutan los mandos enviados desde dicho centro. Se localizan en: PB1; PB2 con su esta-



Tanque de almacenamiento Pericos

ción satélite; PB3; PB4; vaso y estructura Donato Guerra; PB6; planta potabilizadora; PB5; presa Villa Victoria; tanque Santa Isabel y tanque Pericos.

En cada planta de bombeo se concentran las señales y medidas comprendidas entre sus tanques de sumergencia y de oscilación, de tal forma que el tablero mimico muestre y registre localmente todo lo relativo a la succión y descarga.

El centro de control tiene los elementos necesarios para realizar los comandos y recibir las señales hacia y desde las plantas de bombeo y se ubica en la planta potabilizadora Los Berros, ya que en ésta es en última instancia donde se reflejan las acciones tomadas.

Filosofía de operación del sistema de cómputo

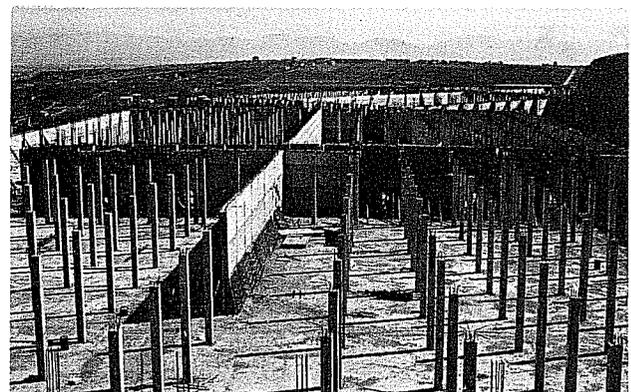
El sistema de cómputo del SCS está constituido por dos computadoras de alta velocidad para aplicaciones de proceso en tiempo real y sus equipos auxiliares. En cuanto a su funcionamiento, una es activa y otra de respaldo; están enlazadas por un canal de comunicación paralelo de alta velocidad y vigiladas por un supervisor de intercambio de control. Este esquema permite compartir la información adquirida del proceso y su transferencia

del control del SCS en forma inmediata y automática a la computadora de respaldo cuando se presenta alguna falla en la primaria. Ambas deben tener la posibilidad de operar individualmente sobre el SCS, por lo que todos sus componentes e interfaces deben estar duplicados:

- Unidad central de procesamiento (UCP)
- Módulo de memoria principal
- Unidad de punto flotante
- Dispositivo de almacenamiento masivo (DAM)
- Dispositivo de respaldo de información (DRI)
- Módulo de tiempo real
- Consola de operación

En condiciones normales, la computadora definida como *primaria* debe desempeñar las actividades de control en línea y la otra tiene la función de *reserva caliente* (que se utiliza también para trabajos fuera de línea). Además, el sistema de doble computadora debe conectarse al equipo de interfase hacia el sistema de adquisición de datos y al de interfase para el coloquio hombre/máquina. Ambos equipos se conectan al *bus* (enlace común) de las computadoras; las unidades de conmutación se encargan de hacer funcionar cada componente según el esquema *primaria-reserva caliente*, que evita interrupciones en la continuidad de la operación del sistema. Las actividades de control de las instalaciones se realizan sólo a través de la primera, que ejecuta las siguientes funciones:

- Adquisición y procesamiento de las informaciones procedentes del campo
- Envío de datos centrífugos (telecomandos, tele regulaciones, etc.)
- Intercambio de datos con el equipo de control de la PB5.
- Presentación al operario de eventos, alarmas y, en general, informaciones necesarias para la gestión del sistema.



Tanque de almacenamiento Pericos

Esta computadora debe actualizar a la de *reserva* en sus memorias central y auxiliar con los resultados que ha procesado, para que esta última pueda asumir de inmediato, en caso necesario, la función de *primaria*. La computadora de *reserva*, además de realizar su función específica, permite desarrollar servicios complementarios, como: nuevos programas, modificación del banco de datos, entrenamiento del personal, diagnóstico fuera de línea, etcétera.

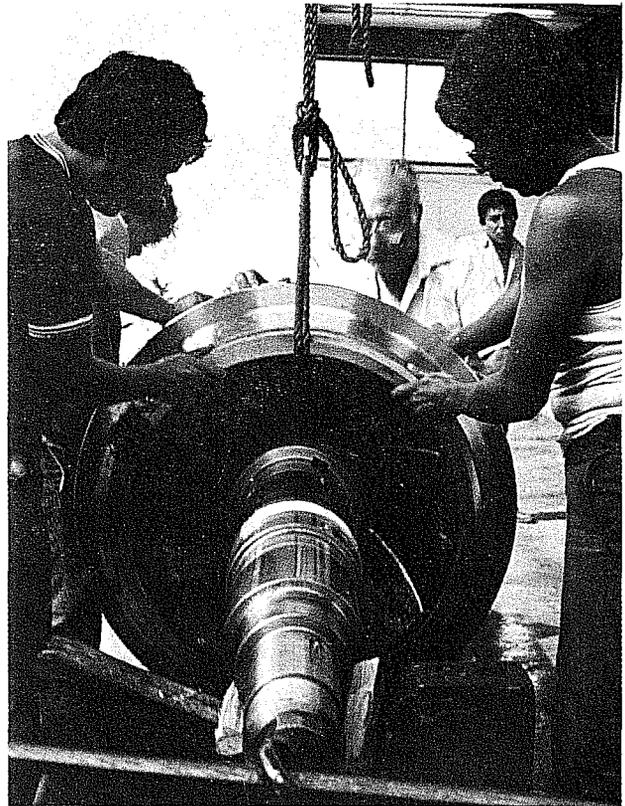
Subsistema hombre/máquina

Está integrado básicamente por todos los equipos que permiten al operario dialogar en modo interactivo con el sistema, y por lo tanto, con el campo:

- Un tablero mimico.
- Dos monitores de video (TRC) con sus teclados para presentar la información de las estaciones periféricas y enviar los mandos hacia las mismas.
- Tres impresoras, una para los reportes de diario de servicio, otra para los estadísticos, y la última para respaldar las otras dos, programar y como sistema fuera de línea.

Operación con el tablero mimico

Los operarios del centro de control disponen del tablero mimico como elemento activo, desde cuyos botones ejecutan las acciones relativas a la operación de los equipos de bombeo de las plantas. Estas acciones también se pueden realizar a través de los teclados funcionales de los TRC, donde la presentación de la información es más detallada, pero el sistema se opera (en cuanto a ejecución de mandos) tanto con el tablero mimico como con los teclados funcionales y alfanuméricos de los TRC. Dado que el tablero mimico se



Mantenimiento PB-2

utiliza para respaldo de información, sobre su panel sinóptico sólo se representan las informaciones indispensables para el manejo del área hidráulica. Está subdividido en dos áreas funcionales:

- **Area de registradores.** Tiene tres registradores de tres plumas cada uno. Uno para gastos, otro para presiones y el tercero para niveles. Abajo de cada uno hay botones con lámpara para elegir la medida por graficar. La selección de la pluma de un registrador se hace en cuatro pasos, cada uno de los cuales representa un nivel de selección:
 - Selección de registrador. Tiene tres botones, uno debajo de cada registrador, para seleccionar en cuál se quiere graficar las variables (según se trate de gasto, nivel o presión).
 - Selección de pluma. Tres botones permiten escoger en cuál pluma del registrador se graficará la variable.
 - Selección de planta. Tiene seis botones (uno por planta) para seleccionar la planta de la cual se desea graficar.
 - Selección de grupo motor-bomba. Seis botones, uno por grupo, permiten elegir cuál de dichos grupos de la planta seleccionada se desea graficar.



Presa Valle de Bravo

Como los botones son luminosos, es fácil observar la selección que se hace en el momento. Para obtener el historial de lo que se grafica en los registradores, se usan los TRC de la interfase hombre/máquina, empleando el diálogo de registrador en papel, que se especifica en la sección correspondiente.

- **Area del diagrama hidráulico.** En ella se representa toda la red hidráulica, desde la presa del Bosque hasta el túnel Anlco-San José, la planta de bombeo 6 y la presa Villa Victoria. Sobre este diagrama hay indicadores digitales para la lectura continua de las medidas de las presiones de succión y descarga de las plantas de bombeo, los niveles en tanques y presas y los gastos a la entrada y/o salida de las plantas. Además, se debe contar con unos LED (Light Emission Diode) para la señalización del estado de las bombas principales y de sus válvulas esféricas y de mariposa.

Para cada motobomba hay dos LED de alarma: uno para la indicación de arranque bloqueado y otro para la indicación de alarma que provoca paro. El paralelo de alarmas de estos dos tipos (funciones lógicas) debe reflejar el estado general de las variables o señales que maneja la computadora en sus presentaciones en pantalla o reportes.

Desde el tablero mímico se pueden parar o arrancar todas las motobombas por medio de mandos directos efectuados a través de manipuladores de dos posiciones. Sobre éstos es posible, a partir de un criterio de discrepancia/anomalía, visualizar el estado de las motobombas. Adicionalmente, sobre el panel sinóptico debe haber un área para representar las alarmas de los enlaces de radio y de los equipos telefónicos utilizados para la transmisión de datos y voz del sistema de bombeo. Sobre el panel hay motores para reconocimiento y cancelación de alarmas, prueba de lámparas y LED.

Operación de los videos

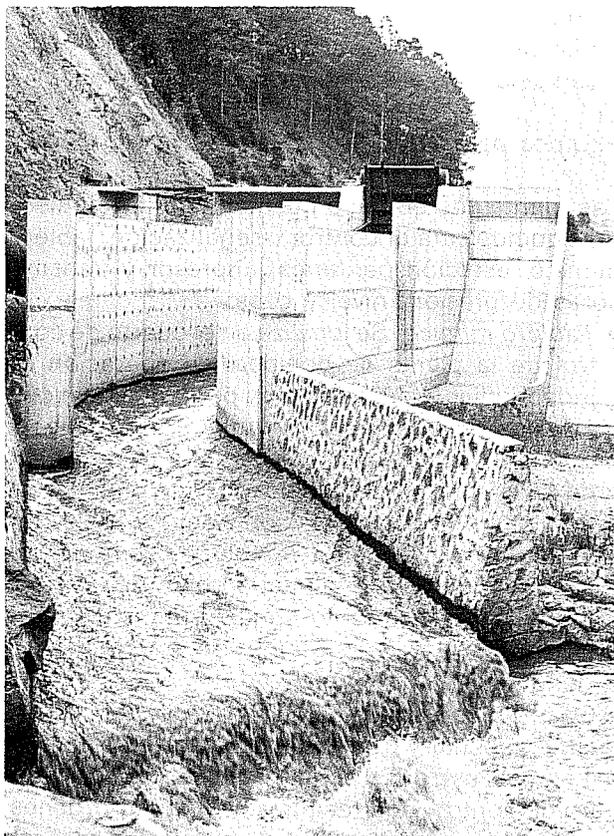
Los operarios deben comunicarse interactivamente con el sistema a través de las terminales de video. Para ello se debe contar con teclados especializados en los TRC donde, además de las teclas alfanuméricas, hay teclas funcionales y de desplazamiento del cursor óptico de la pantalla. Se dispone también de *páginas* que se presentarán sobre la pantalla de video, en las cuales se visualizan los acontecimientos del campo, tanto en forma sinóptica, con el auxilio de símbolos

gráficos y de color, como de manera tabular. (Para mayor detalle sobre estas *páginas*, véase la especificación de la interfase hombre/máquina).

El diálogo hombre-máquina (h/m) realizado por parte de la computadora debe orientarse hacia el operario, lo que permitirá a éste concentrar su atención en el manejo del sistema. Esta interfase h/m estará constituida por los siguientes equipos:

- Dos monitores de video (TRC en color) en los que se visualizan los eventos y esquemas de la instalación (de las estaciones periféricas), con el mayor detalle posible.
- Dos teclados funcionales y alfanuméricos, para ejecutar todas las acciones de control (envío de mandos, adquisición de señales y alarmas, etc.).
- Tres impresoras para el registro de la información a través de dos tipos de reportes: diarios de servicio y estadísticos. La impresora restante se utiliza como soporte de la programación y respaldo del equipo fuera de línea.

El conjunto *hardware-software* que conforma la interfase h/m deberá llenar, entre otras, las siguientes condiciones:



Presa derivadora Chilesdo

- Suministrar al operario las informaciones provenientes de la instalación telecontrolada (señales, alarmas, medidas).
- Presentar sobre los monitores de video, a su petición, los esquemas y tablas de datos del campo.
- Guiar al operario en las funciones que tenga que realizar.
- Efectuar controles de validación de las operaciones realizadas y señalar los errores al operario.
- Reducir al mínimo las intervenciones del operario, sobre todo, en la ejecución de maniobras repetitivas.

A través de los teclados de TRC de la consola de operación, se deben realizar las siguientes operaciones como mínimo:

- Petición de visualización de páginas.
- Petición de reportes.
- Variación de los límites impuestos en las medidas.
- Envío de telecomandos.
- Visualización y operaciones (recomendaciones y cancelación) sobre alarmas.
- Gestión de la configuración de la instalación.
- Gestión de la configuración del sistema de control.
- Visualización de los símbolos gráficos de representación de elementos de la instalación.

Equipos para el control supervisorio en las PB

Las plantas de bombeo cuentan con los siguientes equipos para el control y señalización: tablero mímico, estación periférica, impresor y transmisores de presión, nivel y gasto

- *Tablero mímico*. Se localiza en el cuarto de control de la planta de bombeo; su operación es independiente de la estación periférica para que en caso de que el control supervisorio falle, el operario de la planta no pierda la información de la misma y pueda controlar los equipos de bombeo y de la subestación eléctrica. Estos tableros se dividen en áreas eléctricas, hidráulicas, de diagrama del equipo de enfriamiento y lubricación de la moto-bomba principal, de registradores y el sistema de enfriamiento general.
- *Estación periférica (EP)*. Es la encargada de recibir, adecuar y transmitir las señales de alarma medidas, estados y acumulaciones hacia el centro de control y de recibir y ejecutar las órdenes enviadas por dicho centro; así mismo, proporciona las señales de alarmas y cambios de esta-

do a la interfase del impresor de reportes.

- *Impresor*. Sirve para elaborar los reportes impresos instantáneos de las contingencias de alarma o cambios de estado que se presenten en la planta de bombeo con fecha y hora de ocurrencia. Los reportes estadísticos sólo se elaboran en el centro de control.
- *Transmisores de nivel, presión y gasto*. Se refieren a los elementos primarios y transmisores de nivel en los tanques de sumergencia y oscilación; a los medidores de presión en la succión y descarga de la planta y al medidor de gasto en la entrada o salida de la misma.

Control del vaso y estructura de control Donato Guerra

La estructura cuenta con dos cámaras, una para la llegada del agua bombeada durante 20 horas por las plantas de bombeo 1, 2, 3 y 4, las cuales generan el gasto necesario para operar la planta potabilizadora y el suficiente para almacenar en el vaso Donato Guerra, a fin de operar la planta potabilizadora las cuatro horas restantes.

En virtud de que el gasto de llegada a la cámara alta de las plantas de bombeo es constante, el nivel en éstas también es constante y la apertura de la(s) compuerta(s) será(n) a un nivel dado y, en general, no se deben ajustar a cada momento. Cuando las plantas de bombeo se paran, las compuertas de la cámara alta comienzan a abrirse, de tal forma que la planta potabilizadora no se quede sin agua. Puesto que al abrirse las compuertas, el nivel en el vaso comienza a bajar, es necesario ajustar continuamente el nivel de la(s) compuerta(s) para que el gasto de salida a la potabilizadora sea constante.

A fin de manejar la estructura se dispone de un controlador electrónico para abrir y cerrar las compuertas en forma automática, a partir de información como el nivel en ambas cámaras, el gasto por manejar, las curvas de gasto contra nivel, etcétera.

Sistema de comunicaciones para voz y datos

El acueducto tiene un eficiente sistema de comunicaciones; en cada estación periférica hay equipo telefónico y de transmisión de datos que la enlaza con el centro de control y telefónicamente, con todas las plantas de bombeo e instalaciones del sistema. Hay dos tipos de enlace, uno de operación normal a través de la radio y otro de respaldo mediante línea telefónica. La comunicación

del centro con las estaciones periféricas es *Full Duplex*, sobre dos pares de hilos diferentes por canal para dar mayor confiabilidad al enlace. Se utilizan de tres a cinco canales telefónicos para obtener un ciclo máximo de actualización de datos de 6 a 12 segundos, dependiendo de la velocidad de la transmisión.

La operación del sistema Cutzamala contempla el amalgamiento de técnica e infraestructura humana para realizar las acciones correspondientes

a la operación satisfactoria de éste. El aspecto humano es el más importante para efectuar los comandos y movimientos requeridos para llevar a cabo las políticas de operación. Por otro lado, se requiere de personal capacitado para mantener los equipos en condiciones óptimas.

Nota: Las fotografías de este artículo corresponden al Sistema Cutzamala y fueron tomadas por Javier García Alcántara.