

Análisis de fenómenos transitorios en el acueducto Cutzamala

Gildardo Vázquez Tirado
Salvador Aguirre Tello
Sistemas Hidráulicos y Ambientales

La operación de los grandes acueductos induce la presencia de fenómenos transitorios que provocan esfuerzos en los componentes del sistema, por lo que es preciso instalar elementos de protección para contrarrestarlos. De entre las diversas opciones que se analizan para el Sistema Cutzamala, se eligió el uso de torres de oscilación, tanto en la descarga de las plantas de bombeo como en las líneas de succión. Esto fue posible en virtud de haber encontrado un trazo del acueducto, cuyo perfil es adecuado para la ubicación de las torres, con lo que se consiguió una solución económica que no requiere de dispositivos mecánicos, que pueden fallar. El funcionamiento hidráulico del sistema se analizó bajo diversas condiciones de operación, tanto para régimen establecido como para fenómenos transitorios. Las perturbaciones estudiadas incluyen fallas, paros y arranques en las plantas de bombeo. Se considera que la situación más desfavorable es cuando fallan simultáneamente todos los equipos de una planta de bombeo: se producen las mayores variaciones de presión en las líneas y en el nivel de las torres de oscilación y, además, se observa la máxima velocidad angular negativa en las bombas. En este artículo se presentan las condiciones a partir de las cuales se eligió el tipo de elementos de protección y se describe el análisis del funcionamiento hidráulico.

Descripción del Sistema Cutzamala

El Sistema Cutzamala capta aguas superficiales del río del mismo nombre, aprovechando obras que formaban parte del sistema hidroeléctrico Miguel Alemán. En la ilustración 1 se muestra una planta del sistema y en la 2, su perfil. Una parte del sistema está formada por cinco plantas de bombeo, colocadas en serie, que elevan el agua 1 145 m desde la presa Colorines al tanque Santa Isabel; la otra envía el agua a la planta potabilizadora desde la Presa Chilesdo.

La planta de bombeo 1 (PB1) tiene una capacidad de 20 m³/s y bombea el agua de la presa Colorines, a la cual llegan escurrimientos —parcialmente regulados— de las presas El Bosque, Tuxpan, Ixtapan y del río Tilostoc. Las PB2, PB3 y PB4 bombean lo que envía la PB1, adicionando agua de la presa Valle de Bravo. A las plantas de bombeo 1 al 4 corresponde el mayor desnivel de bombeo en el sistema, por lo que se ha pensado

en operarlas de manera intermitente, suspendiendo su funcionamiento diario durante las horas pico de demanda de energía eléctrica. Esto obligó a sobredimensionar su capacidad, por lo cual las PB2, PB3 y PB4 cuentan con una capacidad de bombeo de 24 m³/s, aunque el gasto medio anual en este tramo es de sólo 15 m³/s.

Después de la PB4 se encuentra la planta potabilizadora a la cual también llegan aguas provenientes de Villa Victoria y de la presa Chilesdo, que se envían mediante la PB6. Dicha planta opera durante las 24 horas del día, por lo tanto, es necesario regularizar el caudal procedente de la PB4, que es bombeado sólo 20 horas, para lo que se utiliza el tanque Donato Guerra que envía el agua a la planta potabilizadora en un régimen uniforme de 24 horas.

La PB5 se localiza después de la potabilizadora; tiene una capacidad de 24 m³/s, opera las 24

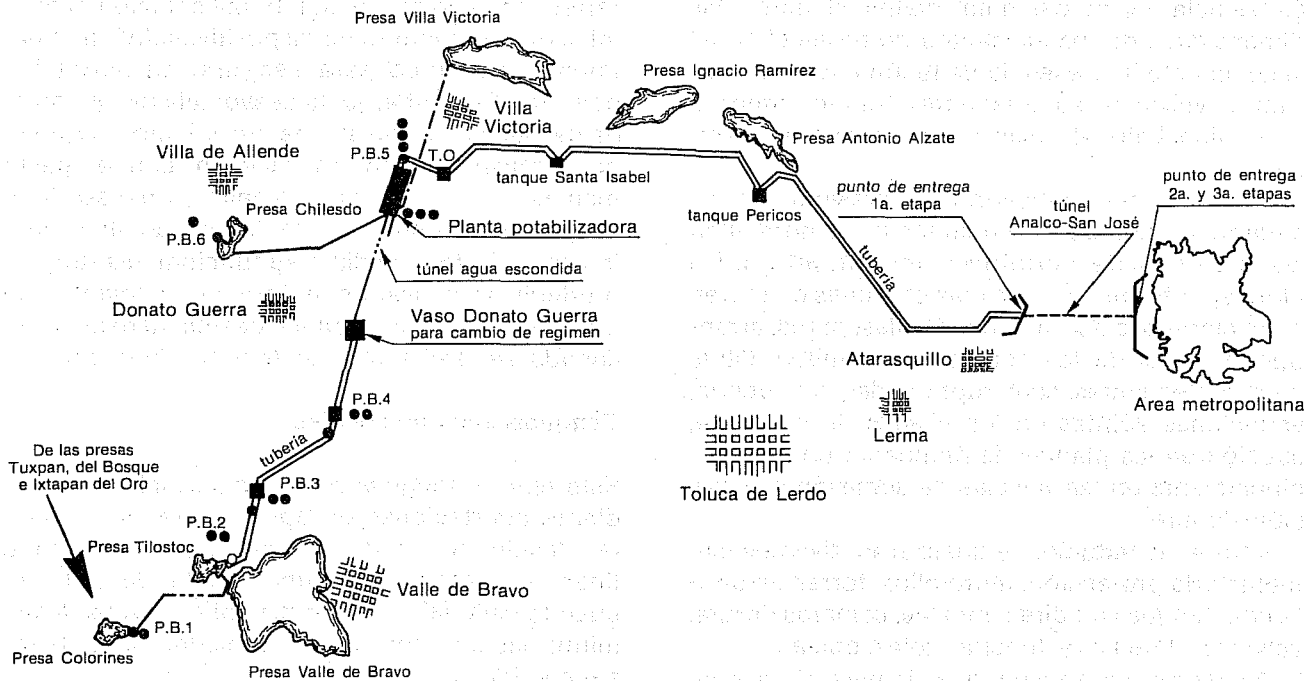
horas del día y bombea todo el caudal de agua potabilizada hacia la ciudad de México.

El acueducto Cutzamala está integrado por tuberías de presión de acero en los tramos de descarga de las plantas de bombeo; los diámetros de dichas tuberías son de 2.9 m para la PB1; de 3.1 m para las PB2, PB3, PB4 y PB5, y de 1.68 m para la PB6.

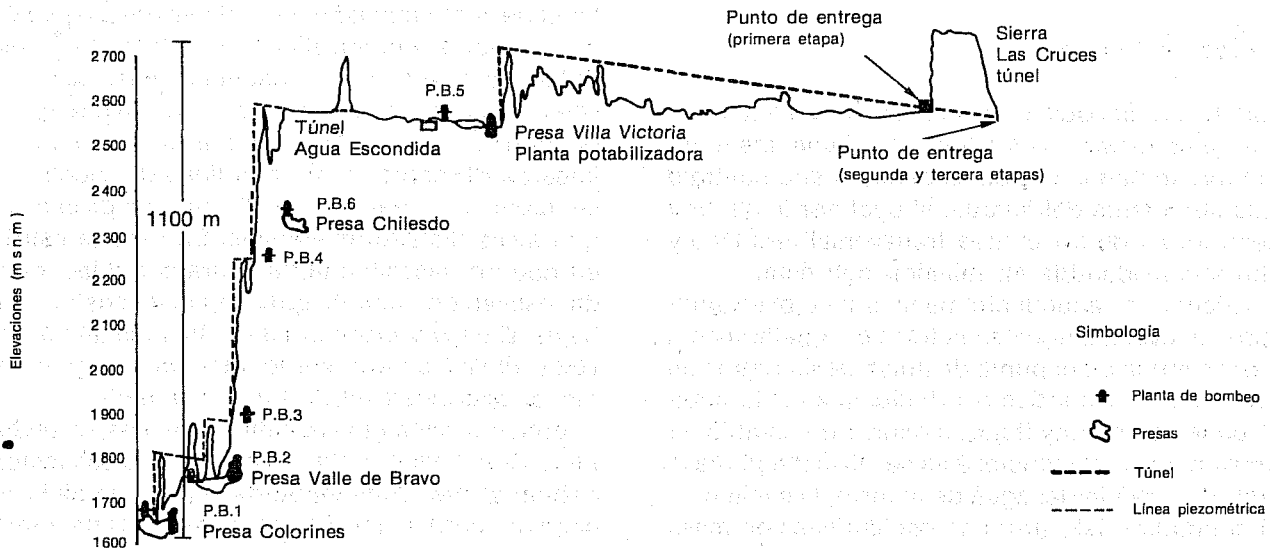
Al final de los tramos de presión de cada

planta, el acueducto tiene una doble tubería de concreto de 2.5 m de diámetro que llega hasta el túnel Analco-San José. En virtud de que en la PB6 se aprovecharon las tuberías de 1.37 m y 1.07 m ya existentes, el tramo quedó integrado por dos partes con doble tubería de concreto de estas medidas. En el cuadro 1 se aprecian las principales características hidráulicas y mecánicas de las plantas de bombeo antes descritas.

1. Planta del sistema



2. Perfil del sistema



1. Características de las plantas de bombeo

	PB1	PB2	PB3	PB4	PB5A	PB5	PB6
Número de bombas	5	6	6	6	3	6	3
Caudal unitario (m ³ /seg)	4	4	4	4	1.7	4	1.7
Carga (m)	155.00	119.30	347.73	347.73	154.34	175.89	213.12
Par de diseño (kg.m)	6 017	4 793	13 833	13 833	1 710	7 011	2 402
Velocidad (r.p.m.)	1 200	1 200	1 200	1 200	1 800	1 200	1 800
Momento de inercia (kg.m ²)	1 200	1 000	2 500	2 500	125	1 200	800

Fenómenos transitorios en el acueducto

En el diseño de grandes acueductos, como el de Cutzamala, es fundamental definir el tipo y las dimensiones de los elementos de protección del sistema ante la presencia de fenómenos transitorios y verificar su adecuado funcionamiento hidráulico bajo diversas condiciones de operación.

Un fenómeno transitorio se presenta en un acueducto cuando el funcionamiento normal en condiciones de equilibrio permanente sufre alguna perturbación. Las más comunes consisten en el cierre o la apertura de válvulas, paros, arranques y fallas de los equipos de bombeo. Otras menos frecuentes son: ruptura de una tubería, variaciones súbitas en los niveles de descarga, succión en las plantas de bombeo o un mal funcionamiento en las válvulas de admisión y expulsión de aire.

Para el acueducto, se analizaron diversos elementos de protección, entre ellos: torres de oscilación, tanques unidireccionales, cámaras de aire, válvulas de alivio y tuberías telescópicas.

Asimismo, se hizo un análisis para el caso de fallas y arranques en las plantas de bombeo y paros en las plantas adyacentes a una que previamente falló.

Torres de oscilación

Las torres de oscilación son estructuras abiertas que se conectan al acueducto mediante una tubería que no tiene control, es decir, el agua entra o sale libremente del tanque, el cual por lo general tiene forma de torre: área transversal reducida y altura considerable en relación con ésta.

Cuando el acueducto tiene un flujo establecido, el nivel del agua en la torre es igual a la cota piezométrica en el punto de unión de la tubería de conexión y el conducto principal, y en la línea de conexión no hay flujo. Al ocurrir un cambio de presión en el acueducto, ésta se alivia mediante la entrada o salida del agua de la torre de oscilación al conducto. Esto produce oscilaciones en masa

dentro de la torre, cuya amplitud va disminuyendo hasta que se estabiliza un nuevo nivel en el tanque.

Las torres de oscilación pueden emplearse en el tramo de descarga de las plantas de bombeo, para aliviar las disminuciones de presión iniciales en el caso de falla; también se pueden utilizar en la línea de succión para aliviar las sobrepresiones ocasionadas por fallas o las bajas de presión en el arranque.

En el *Sistema Cutzamala* se localizó un trazo cuyo perfil fue adecuado para la ubicación de las torres; con ello se consiguió una solución económica que no requirió de dispositivos de funcionamiento mecánico para asegurar su operación correcta. Sin embargo, la desventaja de las torres de oscilación es que al tener un volumen pequeño de almacenamiento en relación con el gasto manejado, en caso de una falla es necesaria la coordinación entre las plantas de bombeo para interrumpir de inmediato su funcionamiento y no producir derrames de las torres en la planta que haya fallado, ya que con los gastos manejados su llenado se realiza en cuestión de segundos.

Tanques unidireccionales

Este tipo de tanques se utiliza para aliviar —mediante aportaciones de agua desde el tanque— las disminuciones de presión que ocurren en la línea de descarga de una planta de bombeo cuando ésta falla. En cierta medida, ayudan a disminuir las sobrepresiones, que son reflejo de las subpresiones.

Los tanques unidireccionales son estructuras que contienen agua almacenada a superficie libre y sólo la proporcionan al acueducto, ya que la línea de conexión tiene una válvula *check* que cierra el flujo de entrada al tanque. El llenado de éste se hace desde el mismo acueducto a través de una línea adicional controlada por una válvula de flotador o de altitud. Su uso permite proteger la línea de descarga, pero en la línea de succión de las plantas se requiere de otro tipo de protección que alivie las sobrepresiones. Su ventaja estriba en que no necesitan tanta altura como las torres de oscilación, por lo que implican costos más bajos. En la conexión pueden ubicarse tantas válvulas *check* como se requiera para lograr una mayor seguridad en su funcionamiento.

En lugar de tanques unidireccionales, en el *Sistema Cutzamala* se utilizaron torres de oscilación, debido a que la magnitud de las cargas de bombeo y el perfil de las líneas de descarga no permi-

tieron colocar tanques unidireccionales que protegieran adecuadamente las líneas, además de requerirse varios por cada planta de bombeo.

Cámaras de aire

El funcionamiento de una cámara de aire es similar al de una torre de oscilación; es decir, puede entrar o salir agua de la cámara hacia la línea. Estas cámaras son tanques a presión que contienen parte de agua y parte de aire. Debido a que su operación depende de la elasticidad del aire, no son tan eficientes como las torres de oscilación, y dado que es preciso reponer el aire que se disuelve en el agua, con el tiempo, requieren de mantenimiento. Para dar solución a este problema se construyen cámaras con una membrana que aísla del aire la superficie del agua; sin embargo, las cámaras disponibles son de tamaño menor que el necesario en el *Sistema Cutzamala*. Aunque su funcionamiento es conveniente, tanto en la línea de descarga de las bombas que alivia las disminuciones de presión, como en la de succión que alivia las sobrepresiones, la necesidad de reponer el aire disuelto y el elevado costo de las cámaras del tamaño requerido hizo desechar su uso.

Válvulas de alivio

Estas válvulas deben localizarse en el punto de la línea donde aumenta la presión cuando se efectúa una maniobra de operación. Al aumentar aquella y abrirse la válvula, se desfoga un determinado gasto que alivia la sobrepresión. Cuando ésta disminuye, la válvula debe cerrarse lentamente para no causar problemas en la línea.

A fin de disminuir las sobrepresiones ocasionadas por fallas de las bombas se estudió la conveniencia de usar válvulas de alivio en la línea de succión de las plantas de bombeo; su funcionamiento resultó adecuado para este tipo de fenómeno, pero se requeriría de un dispositivo adicional, como un tanque unidireccional, para los casos de arranques de las bombas.

La calibración para controlar la apertura de válvulas no es un problema sencillo, por lo que no hay certeza de que su funcionamiento se apegue un 100% a lo previsto. Con base en lo anterior se optó por eliminar su uso, en virtud de las graves consecuencias que ocasionaría una falla parcial o total en el sistema respecto al suministro de agua en bloque a la ciudad de México y al área conurbada.

Tuberías telescópicas

En las líneas de descarga de las plantas de bombeo es común usar tramos de diferente diámetro; en la zona de las bombas, donde las presiones son mayores, se utilizan las de menor tamaño. El uso de tuberías telescópicas provoca en ocasiones que las curvas envolventes de presión mínimas se adapten mejor al perfil del tramo de presión. A causa de las condiciones propias de Cutzamala, no se detectó ningún caso que se resolviera ventajosamente con tuberías de este tipo; en algunos tramos fue preferible profundizar la instalación de las tuberías para modificar el perfil de la línea en sí.

Simulación del funcionamiento del acueducto

Con objeto de calcular las variaciones de velocidad y presión en las líneas de conducción, los niveles del agua en las estructuras conectadas al acueducto y la evolución de la velocidad de rotación de las bombas ante la presencia de fenómenos transitorios, se realizó una simulación del funcionamiento del sistema.

Las condiciones transitorias que se analizaron en cada una de las plantas de bombeo fueron:

- Falla total de los equipos.
- Falla parcial de los equipos.
- Desconexión (controlada) de las plantas de bombeo adyacentes a la que falló.
- Arranque de todos los equipos.

Algunos de los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Falla total de los equipos

Lo más desfavorable que podría ocurrir en una de las plantas de bombeo sería que todos los equipos fallaran al mismo tiempo, situación que podría ocurrir por una suspensión en el suministro de energía eléctrica. A partir del instante de la falla, la columna de agua bombeada tiende a frenarse y a escurrir en sentido contrario; simultáneamente, la válvula esférica empieza a cerrarse mediante un mecanismo accionado por baterías de emergencia destinadas para estos casos.

La primera fase del golpe de ariete generada en la tubería de descarga cercana a las bombas conlleva una disminución de presión que se propaga hasta la torre de oscilación; ahí, se refleja y provoca un regreso de la onda hacia las bombas, la que a su vez origina la fase inversa del fenómeno, o sea, el incremento de la presión. En consecuen-

cia, el fenómeno de oscilación de masas se presentará aguas abajo de la torre de oscilación y hasta la torre de sumergencia de la siguiente planta de bombeo, provocando la variación de los niveles dentro de ambas torres.

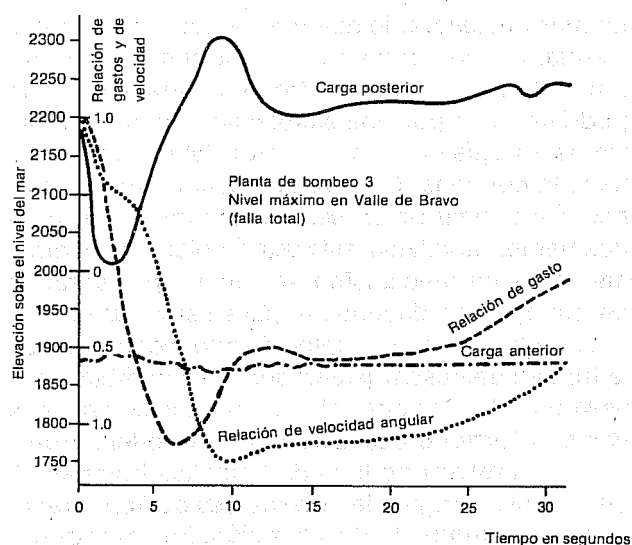
El comportamiento de las bombas de la PB3 a partir del instante en que fallan simultáneamente todos los equipos se muestra en la ilustración 3; la relación de gastos indica que al cabo de 2.5 seg la columna de agua se detiene y comienza a circular en sentido contrario, alcanzando un valor máximo negativo del 112% a los 6.5 seg; a partir de ese momento, el gasto en sentido contrario disminuye hasta los 32 seg en que la válvula esférica se cierra totalmente.

Por su parte, la *curva de relación de velocidad angular* señala que la bomba empieza a girar en sentido contrario a partir de los 5 seg y alcanza una velocidad angular negativa máxima de 125% a los 10 seg, en que comienza a disminuir. Las especificaciones de fabricación de las bombas determinan una velocidad angular máxima admisible en sentido contrario de 140%, por lo que la arriba mencionada está dentro de la tolerancia.

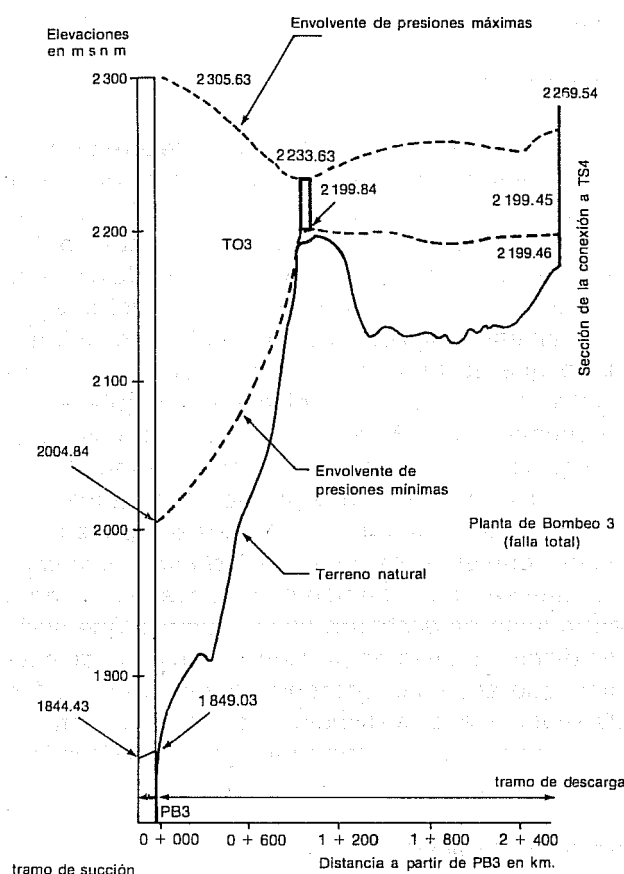
En la misma ilustración la curva denominada *carga posterior* indica que la carga de presión en la bomba colocada a un lado de la descarga baja bruscamente de 2215 a 2010 msnm en 2.5 seg y posteriormente se eleva hasta 2305 msnm a los 9.5 seg; a partir de aquí las oscilaciones en la carga de presión son mucho menores.

En la curva de *carga anterior* se muestra que la carga de presión en la bomba adyacente a la succión sube de 1880 a 1895 msnm en 2.5 seg y des-

3. Comportamiento de las bombas. Falla total (PB3)



4. Presiones máximas y mínimas (PB3)



pues baja hasta 1870 msnm a los 9 seg, manteniéndose prácticamente en un valor constante de 1880 msnm a partir de los 15 segundos.

En la ilustración 4 se observan las envolventes de las presiones máximas y mínimas a lo largo de la línea de conducción entre la PB3 y la torre de sumergencia cuatro (TS4). El tramo sujeto a mayores variaciones de presión es el localizado entre la planta de bombeo y la torre de oscilación, con lo que los tramos entre ésta y la de sumergencia quedan debidamente protegidos.

Falla parcial

Cuando falla sólo una parte de los equipos de una planta de bombeo, los efectos del golpe de ariete en el acueducto son menos severos que ante una falla total, aun cuando el comportamiento es semejante al que ocurre durante ésta.

La ilustración 5 presenta el caso de la PB6 con tres equipos operando, de los cuales falla solamente uno. Las curvas de la relación de gasto y de la relación de la velocidad angular corresponden a la bomba que falló; las de velocidad y de carga

de presión se refieren a la sección final del múltiple de descarga, que es a su vez el inicio de la tubería de descarga de la planta de bombeo.

Puede apreciarse que en 5 seg el gasto en sentido contrario alcanza un valor cercano al 120% en la bomba que falló; sin embargo, en la tubería de descarga no se regresa la columna de agua, y en 5.5 seg el agua se frena totalmente para iniciar de inmediato su flujo ascendente. El caudal impulsado por las bombas que permanecieron operando se regresa en la bomba que falló.

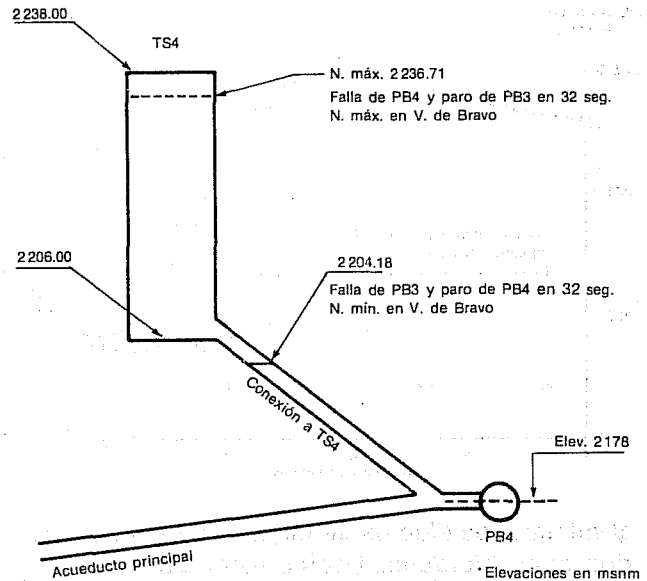
Desconexión (controlada)

Las plantas de bombeo 2, 3 y 4 del Sistema Cutzamala operan en cascada, así es que cuando una de ellas falla es necesario desconectar las otras dos, para evitar que se produzcan derrames en algunas de las torres. Las dimensiones de éstas se definieron suponiendo que mediante un sistema de control automático se ordenara la desconexión de las plantas 32 seg después de que alguna hubiera fallado.

En la ilustración 6 se presentan los resultados de la variación de niveles que se tienen en la torre de sumergencia cuatro en el caso de que falle la PB3 y que 2 seg después se inicie el proceso para detener los seis equipos de la PB4, el cual dura 30 seg más.

Durante los primeros 46 seg el nivel del agua en la torre de sumergencia cuatro (TS4) alcanza una elevación de 2215 msnm y como consecuencia de la oscilación en masa entre la torre de oscilación tres (TO3) y la torre de sumergencia cuatro

6. Niveles de agua extremos (TS4).

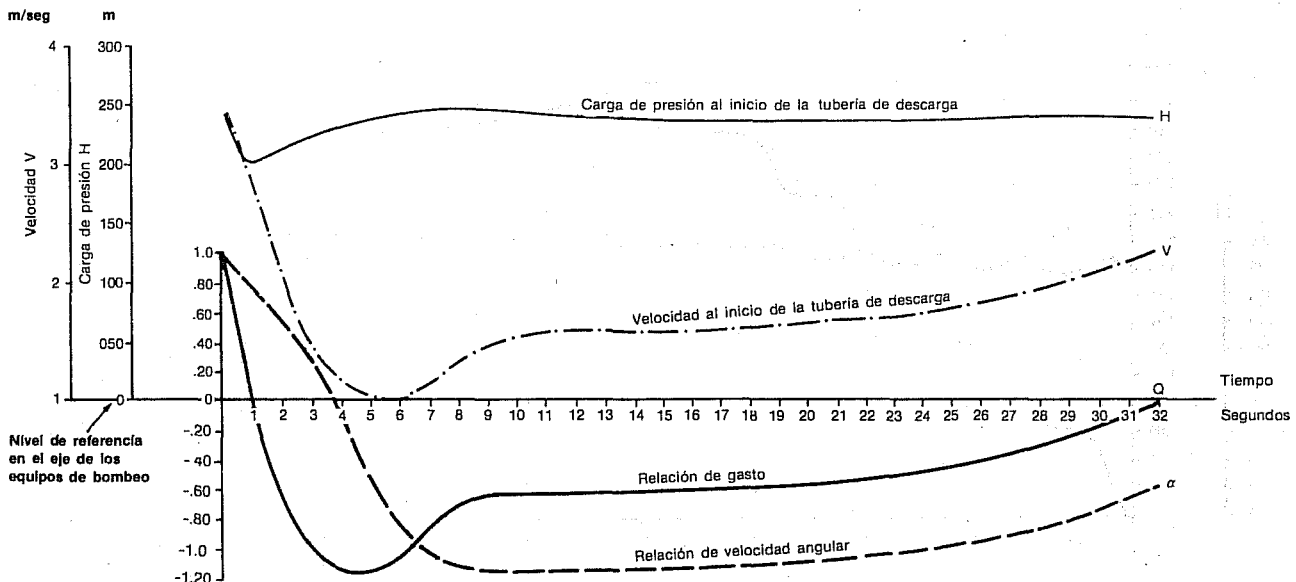


(TS4), baja después hasta 2204.18 msnm al cabo de 81 seg. La altura de esta torre se definió a partir del análisis de la condición de falla total de la PB4 y la desconexión controlada en 32 seg de la PB3, suponiendo un nivel máximo de embalse en la presa Valle de Bravo. En la ilustración 7 se muestra un esquema de la torre de sumergencia cuatro con los niveles máximo y mínimo que se presentan en ella en diferentes condiciones.

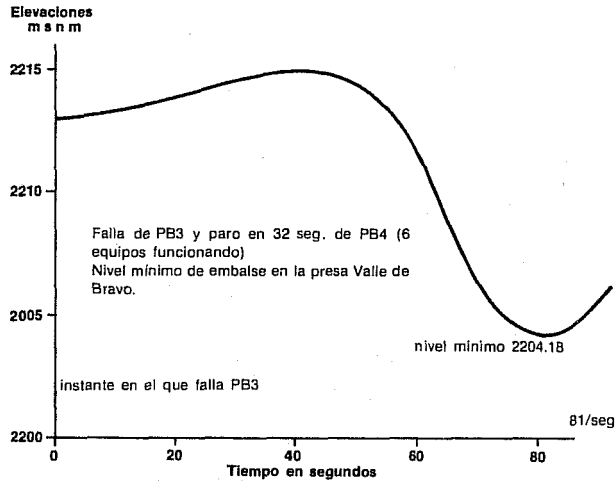
Arranque de todos los equipos

El arranque de los equipos de una planta de bombeo debe ser en secuencia, con objeto de reducir

5. Falla parcial (PB6)



7. Niveles de agua (TS4)

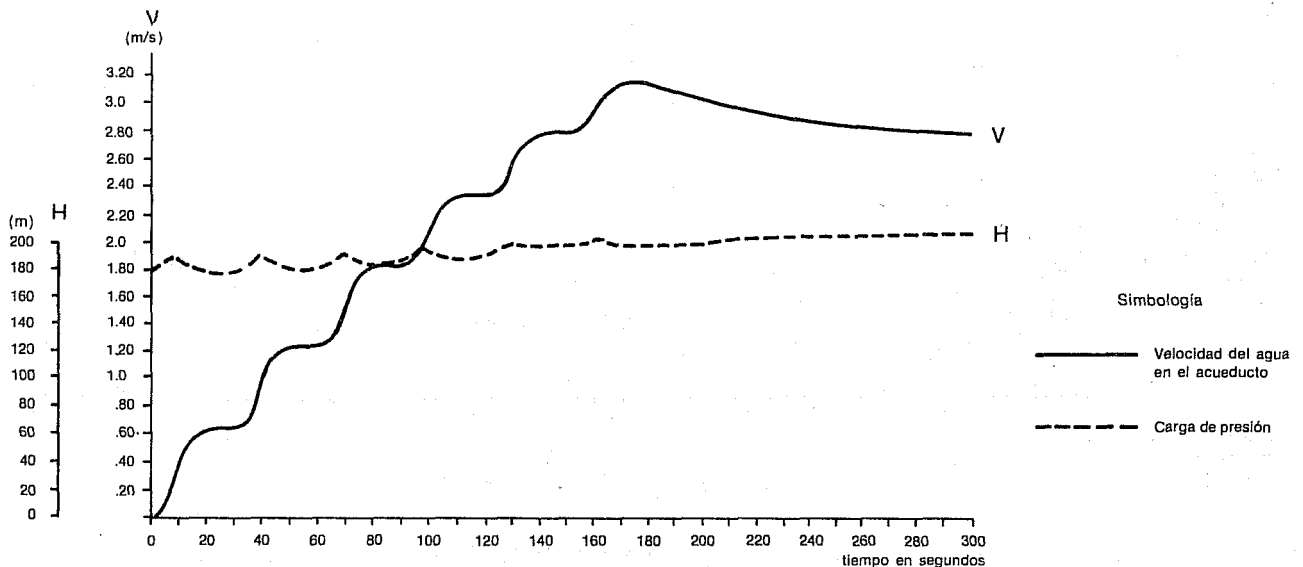


al mínimo los efectos de los fenómenos transitorios tanto hidráulicos como eléctricos.

Las curvas de variación de carga de presión y de velocidad en la sección inicial de la tubería de descarga de la planta de bombeo cinco para el arranque de las seis bombas grandes con intervalos de 30 seg se muestran en la ilustración 8. A partir del instante del arranque de cada bomba la velocidad en el acueducto tarda alrededor de 20 seg en estabilizarse.

Por otro lado, durante los primeros 10 seg posteriores al arranque aumenta la carga de presión en el acueducto, y en los siguientes 10 seg disminuye casi a su valor inicial. Esto va siendo menos notorio conforme hay un mayor número de equipos operando y se observa la influencia del aumento

8. Arranque de seis bombas a intervalos de 30 seg (PB5)



de las pérdidas de carga por fricción, que provocan incluso una disminución gradual de la velocidad a partir de los 180 seg de iniciado el proceso; después la presión se incrementa poco a poco, ya que antes de establecerse el flujo entre la torre de oscilación cinco y el tanque Santa Isabel, ésta empieza a llenarse de agua.

En la PB5 el tanque de succión tiene una gran capacidad, pues es al mismo tiempo el tanque de aguas claras de la planta potabilizadora, pero en el resto de las plantas de bombeo en donde las torres de sumergencia tienen poca capacidad, la variación de niveles en los procesos de arranques es muy importante, ya que según la elevación de embalse en Valle de Bravo, se determina la secuencia en que se ponen en funcionamiento las estaciones de bombeo dos, tres y cuatro.

Conclusiones

En el Sistema Cutzamala los elementos de protección más adecuados contra los fenómenos transitorios fueron las torres de oscilación.

Debido a la configuración topográfica de la zona fue posible encontrar una localización del acueducto muy adecuada para la ubicación de las plantas de bombeo y de las torres de oscilación. Dado que dichos elementos no requieren de mecanismos adicionales, representan una solución económica y confiable.

La simulación del funcionamiento hidráulico del sistema se realizó para diferentes elevaciones de embalse de la presa Valle de Bravo, distintos caudales manejados por el acueducto y conside-

rando las posibles fallas en las plantas de bombeo. Las dimensiones de las torres de oscilación fueron definidas con base en los resultados de las situaciones más desfavorables.

Por otra parte, el proyecto ejecutivo de las tuberías se realizó tomando en cuenta las variaciones de presión más críticas detectadas en la simulación. Las especificaciones en cuanto a la máxima velocidad angular negativa permisible en las bombas se determinaron en función de los resultados del análisis.

Bibliografía

Burden, Faires, Reynolds. *Numerical Analysis*. Prindle,

Weber & Schmidt, 1979.

Chaudhry, M. Hanif. *Applied Hydraulic Transients*. Van Nostrand Reinhold Co., 1979.

Mataix, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Harper y Row Publishers Inc., 1970.

Parmakian, J. *Waterhammer Analysis*. Dover Publications, Nueva York, 1963.

Smith, F. *Numerical Methods of Partial Differential Equations*. Oxford, 1972.

Streeter, V.L. y E.B. Wylie. *Hydraulic Transients*. McGraw-Hill, 1967.

Wylie, E.B. y Streeter, V.L. *Fluid Transients*. McGraw-Hill, 1978.