

Sistema Tuy III

Pruebas de Golpe de Ariete y Puesta en Servicio de la Tercera Línea

Ing. Horacio Luis Velasco

SINOPSIS

Luego de 14 años de servicio, se tomó la decisión de ampliar la capacidad de conducción del sistema Tuy III, con la instalación de una bomba adicional en cada una de las estaciones 32 y 33, que conducen el agua tratada hasta Caracas. Parte de los trabajos requeridos consistieron en la graduación de los mecanismos de accionamiento de las válvulas de cierre controlado del sistema, que permiten la atenuación de los efectos del régimen transitorio o golpe de ariete hasta valores admisibles por los componentes del sistema de aducción. Si los mecanismos de accionamiento se encuentran desgraduados o no permiten el correcto funcionamiento de los dispositivos de atenuación, el sistema puede fallar, a través de una ruptura de la tubería (por exceso de presión) o daños en los equipos de bombeo (por exceso de giración en sentido inverso al normal); lo cual pudiese ocurrir en un lapso de tiempo de 5 a 10 segundos (las bombas) o de 30 a 60 segundos (la tubería). Desde su instalación en 1980, los mecanismos de protección del sistema Tuy III han tenido desgaste, de forma que no protegían adecuadamente al sistema; al igual que ocurre en los sistemas Tuy I y Tuy II. El proceso de graduación y ajuste de los mecanismos requiere de instrumentos de medición y personal técnico especializados, debido a la rapidez y magnitud de los cambios en las variables que se desean medir. Por este motivo, y para efectuar periódicamente la graduación de los elementos de atenuación del golpe de ariete en todas sus estaciones de bombeo, Hidrocapital tomó la decisión de formar un equipo local de trabajo para realizar estas actividades. La especial importancia de las pruebas y ajustes en el Tuy III radica en que, por primera vez fueron realizadas enteramente por empresas venezolanas especializadas en las diversas actividades requeridas. Las pruebas de puesta en servicio y ajuste de los mecanismos de control resultaron exitosas; se ha logrado una excelente descripción analítica del fenómeno transitorio en el sistema; se realizaron las graduaciones y ajustes a los mecanismos de

accionamiento, los cuales se han mantenido hasta el presente y han permitido la operación de tres bombas en cada estación del Tuy III, de forma continua a partir de febrero de 1994. con un aumento del suministro de agua a Caracas de unos 3 m³/s.

I. INTRODUCCIÓN

El sistema Tuy III actualmente aporta un caudal del orden de 10 a 11 m³/s para el abastecimiento del Area Metropolitana de Caracas, cuya demanda se estima en unos 16 a 17 m³/s. El sistema consta de dos estaciones de bombeo, denominadas 32 y 33, y una tubería de acero de 18,2 km de longitud y 2,54 m de diámetro que conduce el agua desde la planta de tratamiento de Caujarito, cerca de Charallave, a la cota 340 msnm, hasta los estanques de Baruta, en Sartenejas, a la cota 1.080 msnm, para ser distribuida a la ciudad. El sistema fue puesto en servicio en 1980 con la instalación de tres equipos de bombeo en cada estación, de los cuales dos eran para operación permanente y otro como reserva en caso de falla o mantenimiento (2+1); en ese entonces, la capacidad de bombeo era del orden de 7 m³/s, suficiente para enviar hacia Caracas el caudal disponible en la planta de Caujarito con agua proveniente del embalse Camatagua, cerca de Camatagua, en el estado Guárico. La capacidad final del sistema de conducción es de 21 m³/s con la instalación de (6+1) bombas, cada una con capacidad de elevar 3,25 m³/s a una altura de 404 mca, para conducir el agua proveniente del embalse de Camatagua, y la proveniente del futuro sistema Tuy IV (planificado con puesta en servicio en 1990), a ser tratada también en Caujarito. Ante el retraso en la construcción del sistema Tuy IV, Hidrocapital tomó la decisión de aumentar el caudal enviado desde el embalse Camatagua hasta la planta de Caujarito, mediante la construcción de la es-

tación de bombeo de relevo de Mamona!, y algunas mejoras en la capacidad hidráulica de la planta de Caujarito, realizadas en 1992, con un incremento del caudal disponible para Caracas del orden de 2,5 m³/s; lo cual permitió instalar y poner en servicio un equipo adicional de bombeo en cada estación del sistema Tuy, denominado tercera línea, en 1993.

Ahora bien, durante la operación normal de un sistema de bombeo, además de las condiciones estables o permanentes de flujo, ocurren eventos puntuales, tales como el accionamiento y/o desconexión programadas de las unidades de bombeo, o la desconexión en emergencia de una o todas las bombas por falla del equipo o del suministro de energía. Estos eventos inducen un comportamiento en el sistema de bombeo que se caracteriza por variaciones temporales de los parámetros característicos de funcionamiento en la estación de bombeo, como lo son: la velocidad de giro de las máquinas y el caudal y presión en la tubería. Los cambios de caudal y presión en una sección particular del sistema se transmiten elásticamente como ondas de presión a lo largo de las conducciones hasta sus puntos extremos, donde ocurre un reflejo de esas ondas. Se configura entonces, en el sistema de bombeo, un conjunto de ondas primarias y reflejadas, superpuestas, que definen en cada punto unas condiciones particulares de caudal y presión interna. Este fenómeno, de naturaleza variable en el tiempo, se denomina Régimen Transitorio o Golpe de Ariete, y puede ocasionar presiones internas elevadas, hasta el punto de poner en peligro la integridad estructural de la tubería o de las bombas si no se protege debidamente al sistema de conducción. En general, y para una aducción particular por bombeo, las presiones derivadas del régimen transitorio son más severas en cuanto mayor es el caudal conducido.

A manera de ilustración del fenómeno transitorio se ha preparado la figura N°1-1, en la cual se muestran dos de los registros medidos de la evolución temporal de la presión en la tubería inmediatamente aguas abajo (descarga) de la estación de bombeo 32, luego de la detención en emergencia de una bomba en operación, un registro corresponde a la bomba instalada en la quinta posición, G5, y el otro a la bomba instalada en la séptima posición, G7, del patio de bombas. En la figura hay dos aspectos relevantes que se deben comentar: (i) la diferencia en las presiones transitorias, aún cuando las bombas son iguales entre sí; (ii) y el valor de la presión máxima observada en la detención de G5, de 650 mca, 210 mca mayor que la presión derivada del régimen permanente, de 440 mca; mientras que la presión máxima luego de la detención de G7 es de sólo 475 mca. La explicación de las diferencias se observa en la figura N° 1-2, en la cual se muestra la evolución del comportamiento de uno de los elementos de protección, válvulas

Figura N° 1-1
Aducción Sistema Tuy III - Estación de Bombeo 32 - Detención de (1) Bomba

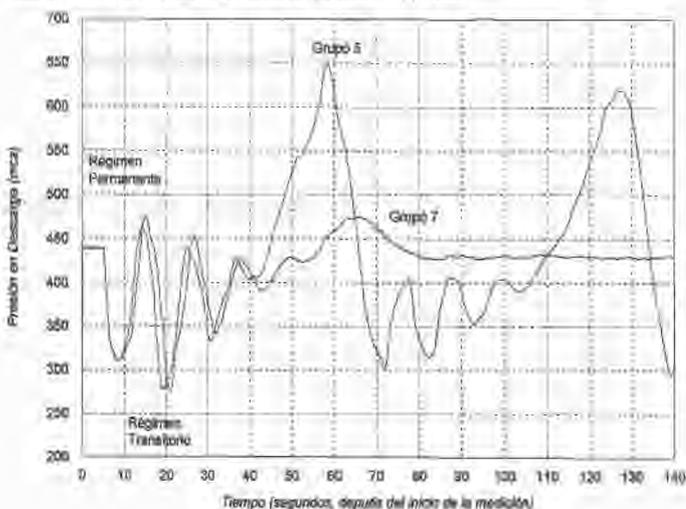
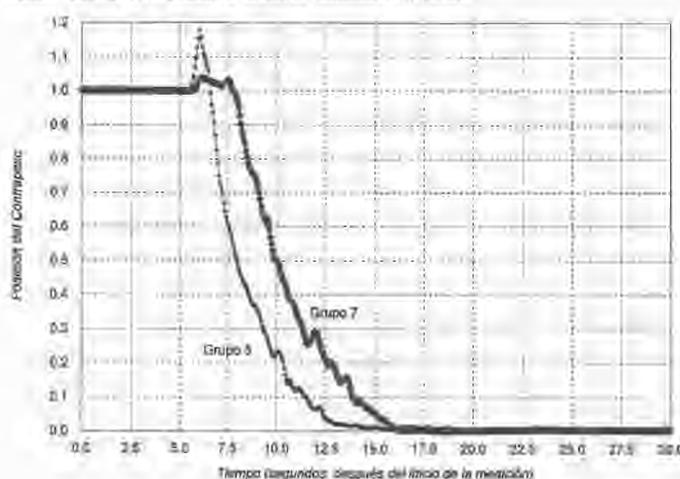
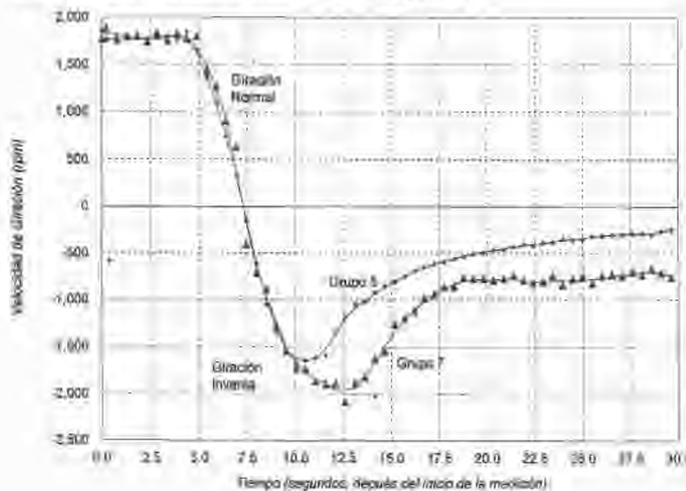


Figura N° 1-2
Aducción Sistema Tuy III - Estación de Bombeo 32 - Detención de (1) Bomba



de cierre controlado instaladas en el ramal de descarga de cada equipo de bombeo, la cual cierra automáticamente luego de la falla en emergencia de la bomba, con un mecanismo oleo-hidráulico con contrapeso que mueve el obturador de la válvula en un movimiento ajustable de cierre. Los registros muestran, primero, un desfase en el accionamiento, inducido por los relays de caída de tensión, y luego, una diferencia en el patrón de cierre de las válvulas de los grupos G5 y G7. La válvula de G5 cierra en un tiempo de 8,0 segundos, mientras que la de G7 cierra en unos 10,6 segundos. Para una misma posición, el margen se incrementa de 1 segundo al inicio del movimiento hasta 2,6 segundos al cierre total. Esta diferencia en el patrón de cierre es suficiente para ocasionar la diferencia de presiones transitorias observadas. La diferencia en el cierre de las válvulas induce no solamente un cambio en la presión en la tubería, sino también un cambio en el comportamiento de los equipos de bombeo. En efecto, en la figura N°1-3 se muestran los registros de la evolución transitoria de la velocidad de giro de los grupos G5 y G7, a partir de la velocidad del régimen permanente 1.790 rpm,

Figura N° 1-3
Aducción Sistema Túy III - Estación de Bombeo 32 - Detención de (1) Bomba



hasta su detención. Se observa que las bombas giran a velocidades cada vez menores y luego comienza un movimiento giratorio en sentido inverso al normal, para luego detenerse gradualmente. Este fenómeno se debe a que el flujo en la tubería invierte su sentido y se devuelve, como parte de su evolución transitoria, y disipa energía en el flujo a través de la válvula y bomba. En sentido inverso se alcanzan velocidades de 1.670 y 2.100 rpm, grupos G5 y G7, respectivamente. La norma de fabricación de las bombas indica que estas son capaces de soportar velocidades inversas de 2.160 rpm, por lo que se está cerca del límite admisible por los equipos, que puede ser sobrepasado en otras condiciones, más severas, de flujo transitorio. Cabe destacar que durante otro ensayo, luego de la detención simultánea de los grupos G5 y G7, se observaron velocidades inversas de 2.760 rpm durante 1 segundo, y mayores de 2.160 rpm por un período de 6 segundos. Por último, cabe mencionar otro aspecto importante puesto de manifiesto en la figura N° 1-1 (presión en la descarga, detención de una unidad de bombeo), en la cual se observa una oscilación de presión durante los primeros 30 segundos del fenómeno transitorio, seguida de un aumento hacia los 60 segundos luego de la desconexión, y la presión aumenta en unos 100 mca; este fenómeno es ocasionado por el cierre controlado de grupos de válvulas instaladas en diversos puntos de la tubería, cuyo funcionamiento es tal que admiten aire y luego expulsan agua con un cierre controlado graduable, denominadas válvulas de chorro. En este punto vale mencionar la rapidez de la evolución del golpe de ariete: en 10 segundos ocurre el accionamiento de la válvula de cierre controlado en la estación de bombeo, en 10 segundos se ha alcanzado la velocidad máxima inversa en las bombas, en 60 segundos ha ocurrido la presión máxima en la descarga; en un minuto puede ocurrir la falla de alguno de los componentes de la aducción, si no son capaces de resistir las sollicitaciones, presión en

la tubería y velocidad inversa en las bombas, inducidas por el golpe de ariete.

Se observa que la respuesta transitoria del sistema dependerá no sólo de las condiciones iniciales, representadas por el número de bombas en operación, sino también de la graduación de los mecanismos de control de los elementos de protección del sistema ante el régimen transitorio. Ahora bien, las ecuaciones descriptivas del fenómeno transitorio son más complejas que las ecuaciones que describen el régimen permanente en tuberías a presión. Se requiere de la integración numérica de un sistema de ecuaciones diferenciales, el cual permite determinar en cada punto de la tubería, y durante el transcurso del tiempo, las condiciones de caudal y presión, así como el comportamiento de los equipos de bombeo. Para lograr una adecuada concordancia entre los resultados de un modelo de cálculo y la realidad se debe tener buena información sobre las características físicas de la conducción, tales como diámetros, longitudes, tipos de material y espesores de la tubería, altimetría, características de comportamiento y graduación de los equipos de bombeo y elementos de atenuación del golpe de ariete, y de la celeridad de transmisión del tren de ondas a lo largo de la tubería. Si, además de la información indicada, se tienen observaciones del comportamiento transitorio del sistema en algunas situaciones, es factible mejorar la calidad de su representación matemática, mediante un proceso de ajuste de parámetros, denominado calibración; y se tendrá, entonces, mayor confianza en los resultados del modelo y se podrá inferir la respuesta transitoria del sistema en condiciones que no pueden ser probadas de antemano, tal como el aumento del número de unidades de bombeo instaladas hasta su capacidad máxima prevista y/o probar otros elementos de atenuación en caso de ser necesario.

Es el objetivo de las pruebas de puesta en servicio del sistema de bombeo, efectuar la graduación de los mecanismos de protección del golpe de ariete en valores tales que la respuesta transitoria del sistema (presiones y velocidades de giro de las bombas) se encuentre dentro de los valores admisibles por los equipos; y, simultáneamente, realizar mediciones de los parámetros hidráulicos que permitan efectuar una calibración precisa de los modelos de cálculo de golpe de ariete en ese sistema de conducción, con el objetivo de predecir con mayor precisión el efecto probable de los ajustes que sean realizados en los elementos de protección durante la puesta en servicio. Cabe destacar que, antes de proceder a la graduación de los elementos de protección es necesario tener un modelo de cálculo representativo de la conducción, para así evitar una graduación que induzca sollicitaciones estructurales inadmisibles en el sistema. En este sentido, se han

tomado los resultados de las pruebas realizadas en el mismo sistema durante 1980 en la oportunidad de puesta en servicio inaugural del sistema Túy III, con dos bombas en cada estación.

II. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE ADUCCIÓN v III

En este punto del informe se destacan las características de los principales componentes del sistema de conducción Túy III, que resultan de interés para la comprensión de los resultados de las pruebas de bombeo, así como necesarias para la calibración de los modelos de cálculo del golpe de ariete.

11.1 Tuberías

El trazado de la conducción ha sido dividido en dos tramos; el primero entre la estación de bombeo N° 32 y el estanque de succión de la estación de bombeo N° 33, con una longitud aproximada de 7,7 km, y el segundo tramo entre la estación de bombeo N° 33 y los estanques de Baruta, con una longitud del orden de 10,5 km. La altimetría de la tubería ha sido obtenida de los planos de construcción, y los tramos de aducción se presentan en las figuras N° 11-1 y 11-2, respectivamente. La aducción tiene un diámetro interno de 2.540 mm (100"), y es fabricada en acero, con juntas soldadas, y de dos clases diferentes de material: acero ASTM A-36, con punto cedente no menor de 2.500 kgf/cm² y esfuerzo de ruptura no menor de 4.200 kgf/cm², y espesor 16 mm; y acero WELTEN-60, con punto cedente no menor de 4.550 kgf/cm² y esfuerzo de ruptura no menor de 5.600 kgf/cm², de espesor variable de 16 hasta 30 mm, dependiendo de las presiones de servicio. La celeridad de transmisión de las ondas de presión en las tuberías se ha estimado, en promedio, en 960 m/s, casi la velocidad del sonido en el medio líquido confinado.

Figura N° 11-1
Aducción Sistema Túy III - Tramo Estación de Bombeo 32 a Estación de Bombeo 33

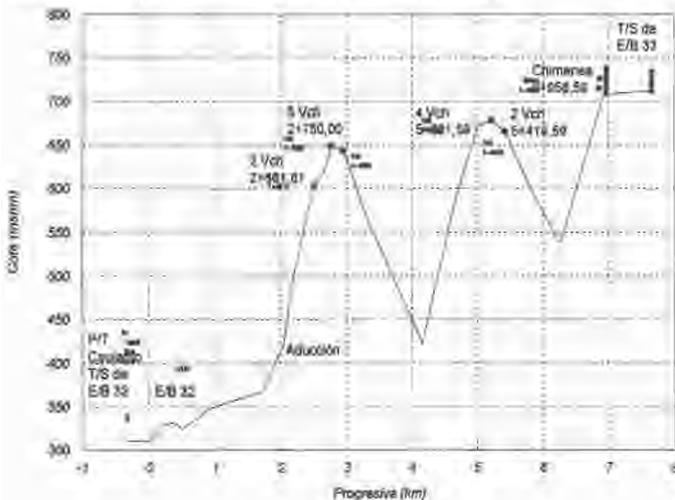
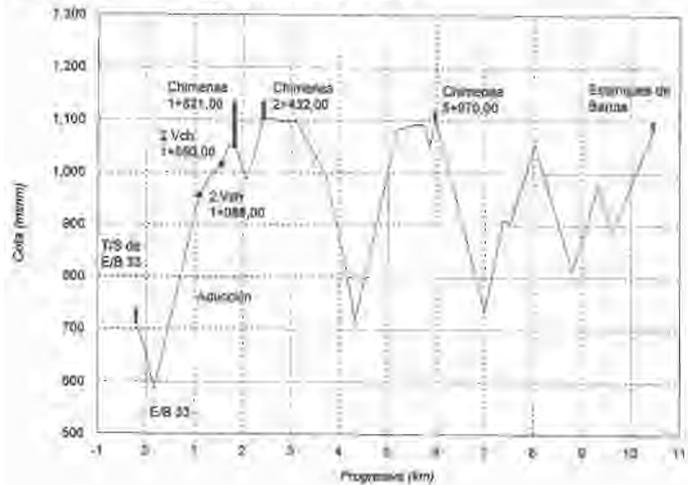


Figura N° 11-2
Aducción Sistema Túy III - Tramo E/B 33 a Estanques de Baruta



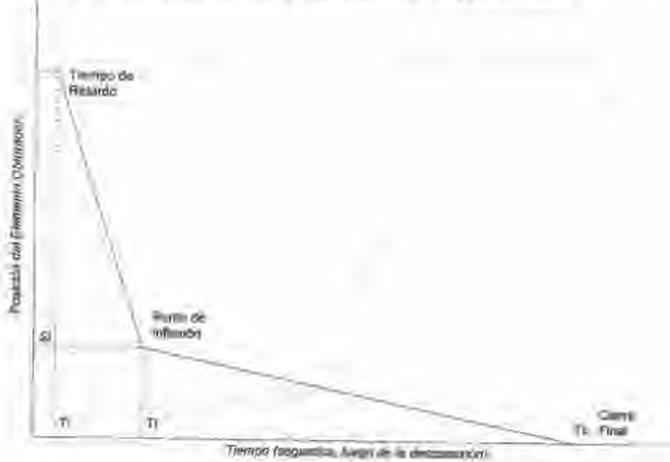
11.2 Moto-bombas

Para la representación del comportamiento de los grupos de bombeo en régimen permanente y transitorio, se usa la información proveniente de las pruebas realizadas en los prototipos, proporcionada por Sulzer de Venezuela. Las características de las bombas permiten determinar la altura de bombeo y torque en el eje para cada combinación de caudal y de velocidad de giro. La representación es adimensional, sobre la base de las características nominales de los equipos de bombeo, en su punto de mayor eficiencia; los cuales corresponden a una velocidad de giración de 1.790 rpm, un caudal de 3,25 m³/s y altura de bombeo 404 mca. En cada estación de bombeo se ha previsto la instalación de un máximo de (6+1) unidades, todas iguales entre sí.

11.3 Válvulas de Accionamiento Controlado en las Estaciones de Bombeo

En los ramales de impulsión de las estaciones de bombeo se han instalado válvulas de cierre controlado, tipo paso anular, de diámetro 800 mm. El comportamiento hidráulico de las válvulas puede ser expresado como una pérdida localizada de energía, $dh = k V^2 / 2g$, en la cual el término k representa el coeficiente de pérdida de energía, en función de la posición del elemento obturador, variable en el tiempo según un diagrama similar al indicado en la figura N° 11-3. Las válvulas tienen mecanismos óleo-hidráulicos, auxiliados por contrapesos, que permiten un movimiento del elemento obturador en forma lineal, en dos etapas, con grado de libertad en cuanto a la fijación de los parámetros Si, Tc, Ti, indicados en la figura. El parámetro Tr es el tiempo de retardo en el accionamiento del mecanismo de control. En los cálculos, de acuerdo con las pruebas anteriormente realizadas en el sistema, y corroborado por las realizadas en enero y febrero de 1994, se ha toma-

Figura N° 11-2
Sistema Túy III - Perfil de Cierre de Válvulas de Control en Estaciones de Bombeo



do un valor de 1 segundo. La curva de resistencia hidráulica de las válvulas, en flujo normal e inverso, provienen de sus fabricantes.

11.4 Válvulas de Chorro

Estas válvulas se han instalado en línea como elementos de protección ante el golpe de ariete. Su función es permitir el ingreso del aire a la tubería cuando la presión interna tienda a ser menor que la atmosférica y, posteriormente, actuar como una válvula de alivio, mediante la graduación del tiempo de cierre de la válvula. La capacidad de descarga puede alcanzar valores de 10 a 20 m³/s, debido al número de válvulas instaladas. El fabricante ha suministrado las características del comportamiento de la válvula en sus fases de admisión y expulsión de aire, y durante la expulsión de agua; así como las características del cierre controlado del dispositivo, lineal en una etapa. Las válvulas de chorro tienen un diámetro de 20" (500 mm), y su número y ubicación se indican en los perfiles de la tubería, figuras N° 11-1 y 11-2.

11.5 Tanques de Succión

Cada estación de bombeo tiene un estanque de succión abierto a la atmósfera, cuya función principal es permitir flexibilidad en la operación normal del sistema, y, adicionalmente, actúa como amortiguador de los efectos transitorios. El estanque de la E/B 32 se encuentra aguas abajo de la planta de tratamiento de Caujarito, con cota de rebose 340,01 msnm y de fondo 335,24 msnm. El estanque de la E/B 33 tiene cota de fondo 711,61 msnm y de rebose 734,64 msnm. La ubicación de los tanques se indica en el perfil de la tubería, figura N° 11-1.

11.5 Chimeneas Abiertas

A lo largo de la conducción se han colocado cuatro chimeneas abiertas a la atmósfera, cuya función principal es la de atenuación de los efectos del golpe de ariete. El diámetro de las chimeneas es de 1.524 y 2.540 mm (60" y 100"), y su ubicación se muestra en los perfiles de la aducción, figuras N° 11-1 y 11-2.

11.7 Condiciones Piezométricas de Borde

Corresponden a los niveles del agua en algunos de los componentes del sistema que son independientes de las pruebas realizadas y de la evolución del régimen transitorio en la aducción. Estas condiciones están constituidas por las cotas del agua en el estanque de succión de la Estación de Bombeo 32, con un rango de variación entre 335,2 y 340,0 msnm, y por la cota del agua en las estanques de Baruta, comprendida entre 1083,6 y 1096,1 msnm. En algunos casos, ocurre una condición interna de borde, cuando la descarga del bombeo ocurre en la chimenea ubicada en la progresiva 5+970 del segundo tramo, con cota de fondo 1103,59 msnm. Estas condiciones, conjuntamente con los resultados de las mediciones de las pruebas de golpe de ariete, serán usadas para la calibración de los modelos de cálculo del régimen transitorio.

III PRUEBAS DE CAMPO Y MEDICIÓN DE PARÁMETRO HIDRÁULICOS

Durante los meses de enero y febrero de 1994 se llevaron a cabo las pruebas requeridas para la puesta en servicio del tercer grupo de bombeo en las estaciones N° 32 y 33 del sistema Túy III. Se contó con aparatos de medición apropiados para observar la respuesta transitoria del sistema: velocidad de giración de los motores; patrón de cierre de las válvulas de control; presiones en la succión y descarga de las estaciones de bombeo; y el caudal (cuyos valores resultaron poco confiables). Aunque el objetivo principal de las pruebas realizadas era el de ajustar los patrones de cierre de las válvulas de paso anular para permitir el servicio con tres grupos de bombeo, los resultados de las observaciones se han utilizado para calibrar los modelos de cálculo de golpe de ariete, para extrapolar la respuesta transitoria a condiciones de operación diferentes a las actuales, tales como la instalación de otros equipos de bombeo (hasta el máximo previsto), o la colocación de dispositivos adicionales de atenuación del golpe de ariete que sean requeridos. El motivo de la calibración simultánea de los modelos de cálculo era no realizar ajustes que pusieran en peligro la integridad estructural de los

componentes de la aducción Túy HI, ya que una falla en [as bombas o tubería reduciría el suministro de agua a Caracas a niveles críticos. Las mediciones de los parámetros hidráulicos fueron ejecutadas por la empresa MECOFLU, contratada para esa actividad por HIDROCAPITAL. Todas las actividades realizadas en las estaciones de bombeo fueron registradas por los instrumentos de medición, y se generaron unos 40 MB de información.

Las pruebas de golpe de ariete se efectuaron en las estaciones 32 y 33. durante y luego de un proceso de ajuste del patrón de cierre de las válvulas de cierre controlado del sistema, tanto en fas estaciones de bombeo como a 10 largo de la tubería. En ellas se simuló la detención en emergencia de (1), (2) y (3) grupos en operación (manteniendo la otra estación de bombeo en servicio continuo); la detención de (1) bomba estando otra en operación en la misma estación de bombeo; así como los arranques y paradas normales de los grupos moto-bomba. En cada prueba se contó con instrumentos de medición, que permitían la captación, transmisión. procesamiento y almacenamiento digital de la información. Las variables observadas fueron:

Velocidad de giración de las bombas, este parámetro se midió mediante un contador que recibía impulsos eléctricos de un emisor-receptor de rayos infrarojos, cuyo haz se reflejaba en láminas reflectantes adheridas a las partes giratorias de los equipos de bombeo_

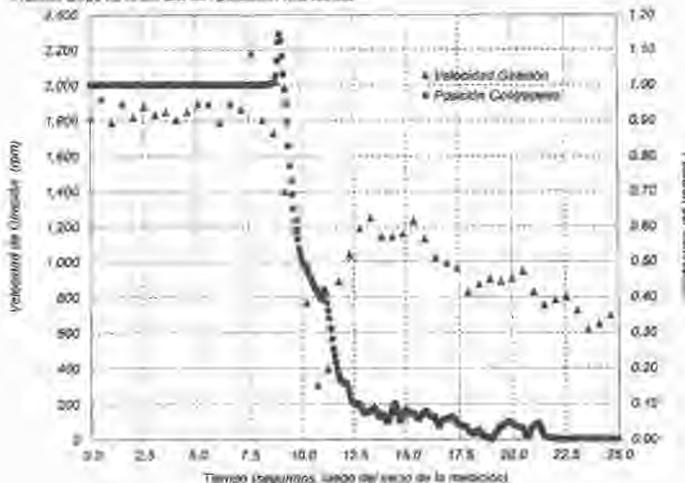
Posición angular del brazo del contrapeso que mueve el pistón de las válvulas de cierre controlado (paso anular) en las estaciones de bombeo, este parámetro se midió con un potenciómetro que mide movimiento circular, que emite una señal eléctrica lineal de 4 a 20 mA, que permite la transformación del movimiento angular del brazo del contrapeso de la válvula a un movimiento lineal registrado.

- Presión en el múltiple de succión y descarga de la estación de bombeo; este parámetro se midió con un transductor de presiones cuya señal es conducida hasta los tableros de control de cada estación de bombeo. de donde fue registrada.

Caudal en el múltiple de succión de la estación de bombeo, pero la lectura del medidor resultó poco confiable debido a que estaba instalado en una zona de flujo muy inestable. Por esta razón no se contó con este parámetro en la calibración de los modelos de cálculo.

En las figuras III-1 y 111-2 se presenta un registro característico de los datos captados. El registro corresponde ala detención en emergencia del grupo 4 de la

Figura N° III-1
Pruebas Golpe de Ariete EB 33 - Detención Una Bomba



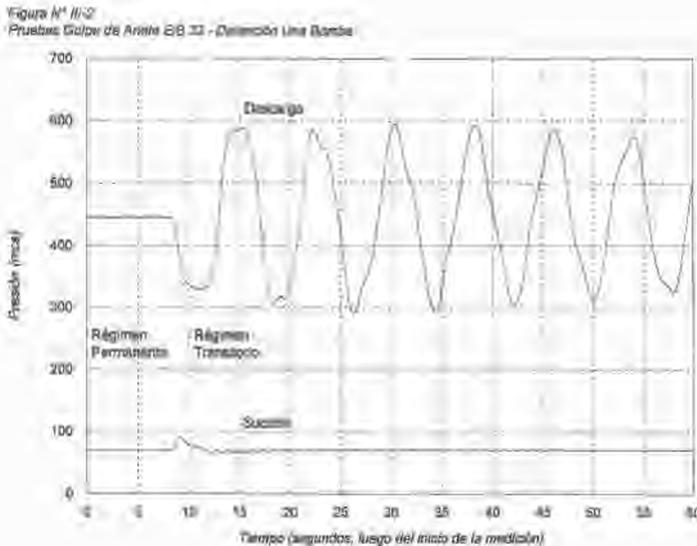
estación de bombeo N° 33, luego de la operación de (1+1) grupos en ambas estaciones; el otro grupo de bombeo en la estación 33, así como la estación 32 permanecen en servicio. En la figura III-1 se muestra la evolución de la velocidad de giración de la bomba y la posición del brazo del contrapeso de la válvula de paso anular. Sobre la figura pueden hacerse algunas observaciones:

La dispersión de los valores de la velocidad de giración durante las condiciones permanentes del flujo. En efecto, durante los primeros segundos de medición, y antes de que ocurra la detención de la bomba, la lectura de velocidad debería ser constante e igual a la de sincronismo, 1.790 rpm. Los valores observados en todos los registros captados oscilan alrededor de ese valor, con una desviación estándar, que se encuentra en el rango de 30 a 90 rpm. Admitiendo entonces que el valor real se encuentra en la media y $\pm 2s_{rpm}$, se tiene un error de medición de la velocidad de giración comprendido entre el 3% y el 10% de la velocidad de sincronismo. Las mediciones de velocidad se presentan en valores positivos, por lo cual debe estimarse el momento en el cual se inicia la giración inversa de las bombas.

El tiempo de retardo en el movimiento del pistón de la válvula de paso anular, puesto de manifiesto en las primeras fases de la caída de energía. En los registros tomados, el tiempo en el cual el brazo del contrapeso baja de su posición original oscila entre 0,8 y 1,2 segundos; valores similares a los observados durante las pruebas realizadas en 1980 en las mismas estaciones de bombeo.

- Las pequeñas oscilaciones en el registro del movimiento del contrapeso. debido al propio desgaste de los mecanismos oleo-hidráulicos y a las vibraciones sobre el brazo del contrapeso.

En la figura 111-2 se presentan los registros de presión en la descarga y succión de la estación de bombeo. En ella se observa la naturaleza cíclica del régimen transitorio, y un fenómeno muy particular de amplificación de la presión en el múltiple de descarga, que luego se amortigua. En las condiciones de prueba no operan las válvulas de chorro que han sido instaladas recientemente (1993) en el tramo E/B 33-Estanques de Baruta, en las progresivas 1+088 y 1+560. Cabe destacar que los registros tomados en 1980, en las pruebas iniciales de puesta en servicio, mostraron un comportamiento similar. Por otra parte, los registros de presión en la succión muestran su marcada atenuación y, posteriormente, el incremento del nivel en el tanque de succión de la estación. En otros registros, que corresponden al golpe de ariete derivado de la detención de (2) y (3) grupos de bombeo, se observa que desaparece la amplificación de la presión en la descarga y la atenuación de las presiones transitorias es considerablemente más rápida, debido al accionamiento de las válvulas de chorro instaladas en la conducción.



IV. AJUSTE DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DEL GOLPE DE ARIETE Y PRUEBAS REALIZADAS

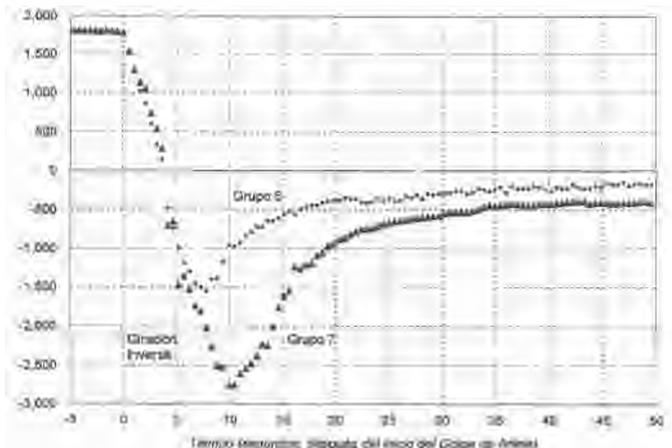
Las pruebas de golpe de ariete y puesta en servicio del sistema se iniciaron en la estación de bombeo 32, el día 15 de enero de 1994, luego de preparar y calibrar los instrumentos de medición necesarios, y preparar los equipos de trabajo: MECOFLU, encargada de la fabricación, almacenamiento, procesamiento y preparación de los valores medidos de los parámetros hidráulicos, a cargo del Ing. José Alejandro Sánchez; GRUPO PROFESIONAL 8086, a cargo de la operación de la estación de bombeo y el ajuste de mecanismos internos de los elementos de protección del golpe de ariete, a cargo del Ing. Luis Carlos Navarro; y CALTEC

en la coordinación de actividades, desarrollo y calibración de los modelos de cálculo, evaluación de la respuesta transitoria del sistema y selección de las graduaciones de los elementos de atenuación del golpe de ariete, a cargo de los Ings. Manuel Vicente Méndez y Horacio Luis Velasco en la prueba inicial y posteriormente a cargo del Ing. Velasco. Igualmente se verificó el accionamiento de los mecanismos asociados al arranque y desconexión normales o programados, en las estaciones de bombeo. Durante todo el proceso estuvieron presentes ingenieros de HIDROCAPITAL, y se contó con el apoyo de la empresa suplidora de las válvulas de chorro instaladas en el sistema.

La primera secuencia de actividades consistió en evaluar la respuesta transitoria del tramo de aducción entre las estaciones 32 y 33, tal como se encontraba operando en el momento, con dos unidades en operación, en las posiciones 5 y 7 del patio de bombas, G5 y G7. Se realizó la detención en emergencia de los grupos 5 y 7 operando de forma aislada y posteriormente la detención en emergencia de ambos grupo en simultáneo. Los registros y observaciones indicaron dos aspectos importantes:

- Diferencias en los tiempos de cierre de las válvulas de cierre controlado (del tipo paso anular) entre los grupos 5 y 7 de la estación de bombeo 32, como se indica en la figura N° 1-2. Los registros de velocidad de giro de esa prueba se muestran en la figura 1-4. La válvula del grupo 5 cierra más rápidamente que la del grupo 7, y trae como consecuencia que la velocidad de giro inversa del grupo 7 sea sustancialmente mayor que la del grupo 5, y sea mayor que la máxima admisible de 2.160 rpm, alcanzando valores de 2.700 rpm por poco tiempo. El motivo es que hay menor resistencia al flujo inverso en el grupo 7, debido a que la válvula está más abierta que la del grupo 5, y, por lo tanto, una mayor fracción del caudal en sentido inverso por la tubería pasa a través de esa bomba y la obliga a girar a mayor velocidad en el sentido inverso.

Figura 114-1
Aducción Sistema Tuj III - Estación de Bombeo 32 - Detención en Emergencia Grupos 5 y 7 en Simultáneo

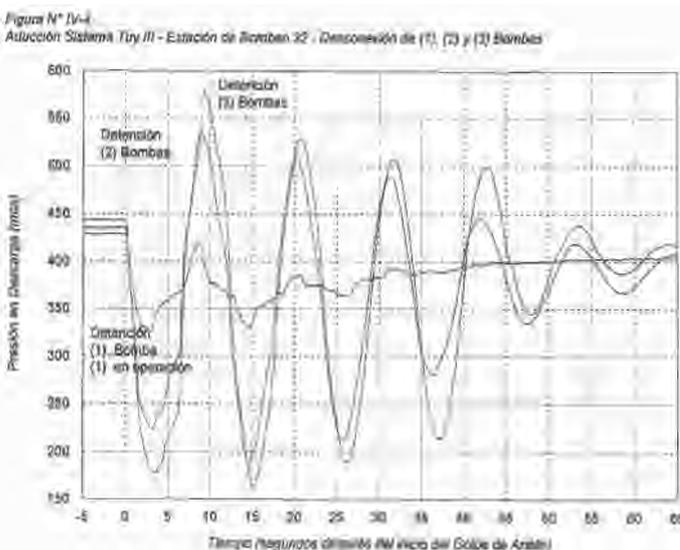
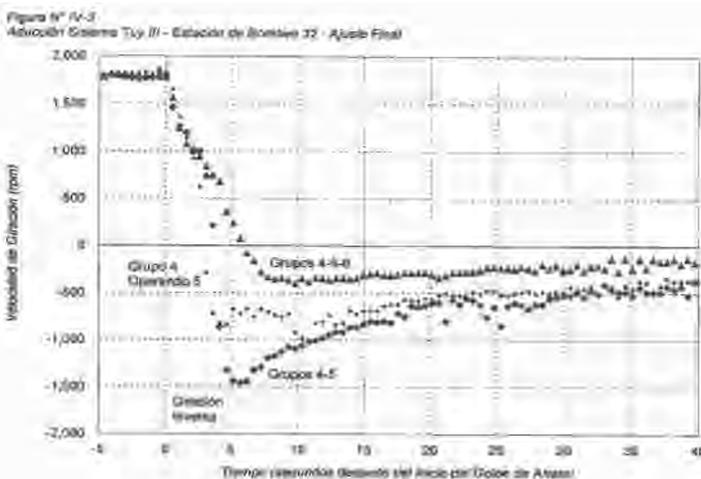
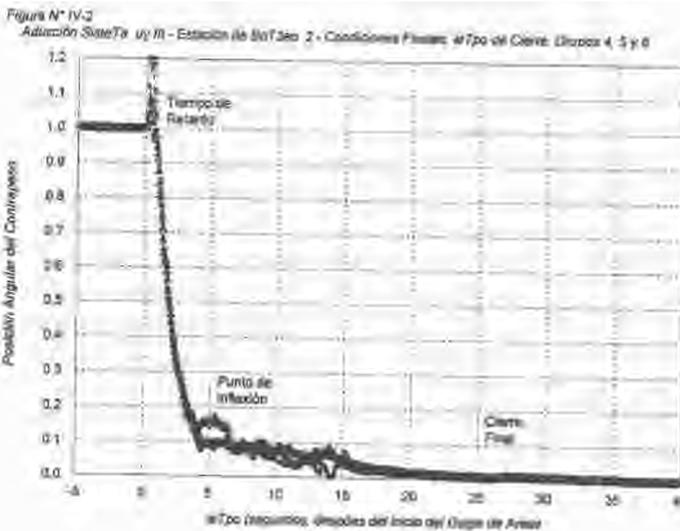


La operación de las válvulas de chorro es errática; algunas válvulas no abren; otras abren y cierran en su tiempo programado; y otras abren pero no cierran automáticamente, y se deben cerrar manualmente.

Estas observaciones indujeron a un proceso previo del ajuste de los tiempos de cierre de las válvulas de paso anular en la estación de bombeo, para lograr un patrón de cierre similar en todas las bombas instaladas; y a la graduación de los mecanismos de control de las válvulas de chorro, para lograr el cierre automático de las válvulas en el tiempo especificado, de unos 30 segundos. En el ajuste de los mecanismos de protección de las bombas, se encontró un desgaste diferente de los mecanismos oleo-hidráulicos de las válvulas de paso anular, que obligó a un proceso de ensayo y error para el ajuste de cada válvula, así como la posibilidad de graduar únicamente los tiempos de cierre de la válvula, sin alterar la fracción de apertura en el punto de inflexión (ver punto II, figura II-3). Con el modelo de cálculo de golpe de ariete, calibrado con mediciones obtenidas en 1980 y las realizadas recientemente, se identificó un rango razonable de patrones de cierre y se procedió a ajustar los mecanismos de control para poder reproducirlos. A tal efecto, y para evitar ciclos excesivos de accionamiento/desconexión, y para mantener en servicio el suministro de agua a Caracas, se aisló cada bomba del sistema y se simuló la carga del contrapeso en vacío, hasta lograr una concordancia razonable en los patrones de cierre de las tres bombas instaladas en la estación. Este proceso tomó varios días repartidos en tres semanas, y, al final de cada sesión de trabajo se debía dejar un patrón de cierre similar en las tres bombas operativas, para evitar los problemas derivados de cierres diferentes durante paradas de emergencia de dos bombas.

Todo el proceso fue registrado con los instrumentos de medición, y en la figura N° IV-2 se muestran las condiciones finales establecidas del patrón de cierre controlado. Antes de proceder con las pruebas finales de golpe de ariete, se realizó una parada de emergencia de una bomba, con el objeto de comparar el patrón de cierre de la válvula de paso anular en vacío con el obtenido en operación normal. Una vez realizados los ajustes finales, se procedió a la prueba definitiva, el día 8 de febrero de 1994. La secuencia final comenzó con dos bombas en funcionamiento permanente, y se procedió a la detención en emergencia de (1) bomba manteniendo la otra en servicio; al comparar los registros tomados con los esperados del modelo de simulación se observó una buena correlación, y se procedió al accionamiento de otra bomba y se dejó alcanzar el régimen permanente, para realizar posteriormente la detención simultánea en emergencia de las (2) bombas en operación. Al procesar los registros, resultaron, de nuevo, muy similares a los valores obtenidos con él

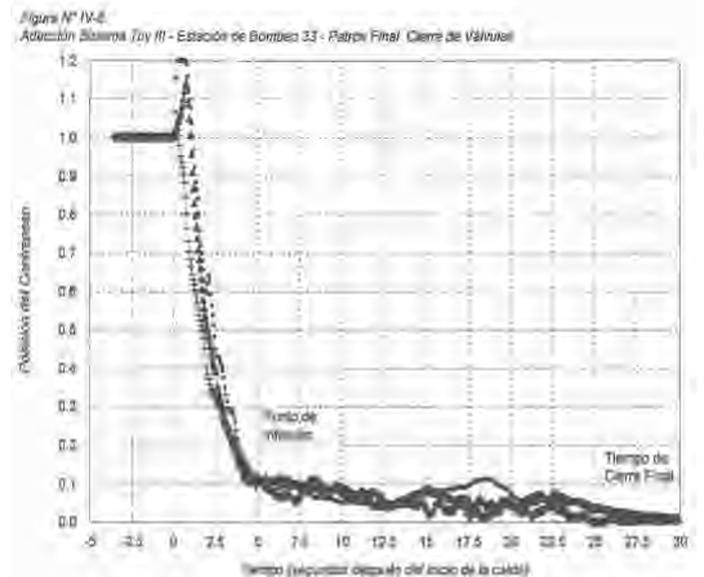
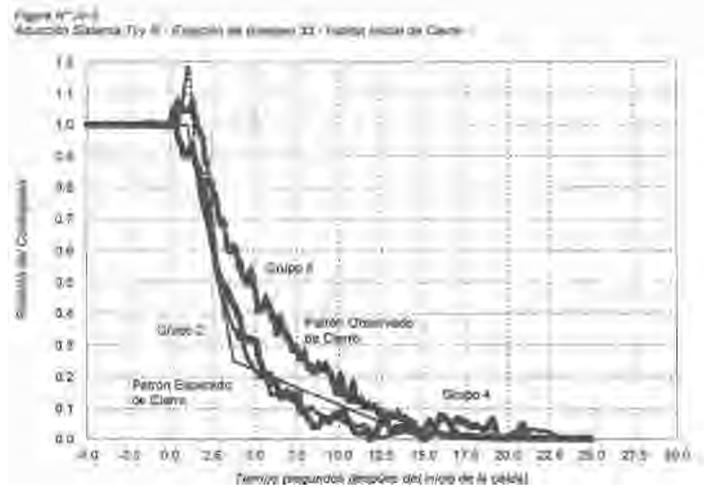
modelo de cálculo. Finalmente se tomó la decisión de proceder con la detención en emergencia simultánea de las (3) bombas en operación. Los cambios y las mejoras en la respuesta transitoria del sistema se observan en las figuras N° IV-3, donde se presenta la velocidad de giro de las bombas; y en la figura N° IV-4, en



la cual se muestra la evolución temporal de la presión transitoria en la descarga de la estación de bombeo. En las das figuras anteriores se presentan los registros obtenidos para la detención en emergencia de (1 con otra en operación), (2) y (3) bombas en simultáneo. La velocidad máxima de giro inversa alcanza valores de 1500 rpm, mientras que la presión máxima en la descarga es de 580 mea; ambos valores dentro de los límites admisibles por el sistema. Al comparar con registros obtenidos antes del ajuste de los elementos de control, como se observa en las figuras N° 1-2 y 1-3, se observa una reducción de la velocidad máxima inversa y de la presión máxima transitoria. Los resultados obtenidos, presión en la descarga y velocidad de giración inversa en las bombas, se consideraron satisfactorios y el patrón de cierre de las válvulas de paso anular en la estación 32 se ha mantenido hasta el presente, válido para la operación con tres bombas.

Los ensayos y pruebas realizados en la estación 33 se iniciaron el día 12 de febrero de 1994, luego de la instalación de los instrumentos de medición. Debido a las experiencias obtenidas en el ajuste de los mecanismos de la estación 32, se supuso que los mecanismos de protección de la estación estarían graduados diferentes entre sf y, por lo tanto, se evitó realizar pruebas iniciales de golpe de ariete y se procedió de inmediato a ajustar el patrón de cierre en vacío de las válvulas de paso anular en la estación de bombeo, hasta lograr un patrón de cierre similar en todos los equipos; igualmente se procedió a verificar el estado y graduación de [os mecanismos de control de las válvulas de chorro instaladas entre la estación 33 y los estanques de Baruta, y proceder al ajuste requerido de tiempo de cierre. El proceso de ajuste de parámetros se realizó más rápido. en unas dos semanas. gracias a las experiencias adquiridas. En la figura N° IV-5 se muestran las condiciones iniciales del patrón de cierre de las válvulas de paso anular en la estación 33, en los cuales se observa una gran diferencia, similar a la obtenida en las condiciones iniciales de la estación 32. Con el modelo de cálculo, mejorado con los registros obtenidos previamente en la estación 32, se seleccionó un patrón de cierre adecuado para la protección de la estación 33, y adaptado a las limitaciones observadas en el mecanismo oleo-hidráulico de accionamiento. Los resultados finales del ajuste del patrón de cierre de las válvulas en la estación de bombeo se indican en la figura N° I1V-6.

Una vez efectuados los ajustes pertinentes, se procedió a realizar las pruebas controladas de golpe de ariete, con la detención en emergencia de (1), (2) y (3) bombas en operación permanente. Al igual que la secuencia final en la estación 32, la detención en emergencia de (2) bombas simultáneas fue precedida de una comparación entre los resultados del modelo de cálculo y los registros tomados en la detención de (1) bomba



(con otra bomba en operación), y se tomó la decisión luego de observar la buena correlación entre los cálculos y los registros. (ver figuras N° V-1, V-3 y V-4, punto V, Calibración del Modelo de Cálculo). Antes de realizar la última prueba, detención de (3) bombas a la vez, el día 24 de febrero de 1994, se corrieron los modelos de cálculo con ligeras variantes en el patrón de cierre seleccionado, y todos los cálculos indicaron que la presión máxima en la descarga de la estación sería menor a la obtenida luego de la detención de (2) bombas. Se procedió con el arranque de las tres bombas, hasta alcanzar el régimen permanente, y luego se realizó la detención en emergencia de los tres equipos. Los registros tomados confirmaron las predicciones de los modelos de cálculo, en efecto, la presión máxima transitoria para la detención de (3) bombas es menor que la asociada a la desconexión de (2) bombas. El motivo es una muestra de las particularidades del fenómeno transitorio y los elementos de atenuación instalados en la tubería, las válvulas de chorro; estas válvulas sólo abren cuando la presión interna tiende a ser menor que la

atmosférica y luego cierran de forma automática, permitiendo un alivio de presiones; en el sitio donde fueron instaladas, solamente con la detención de (3) o más bombas se alcanzan presiones menores a la atmosférica, con lo cual las válvulas actúan como elemento de atenuación; por eso la presión máxima transitoria se reduce con respecto a la obtenida con la detención de (2) bombas, en 1ª cual no operan las válvulas de chorro. Los registros típicos finales del fenómeno transitorio en la estación 33 se muestran en las figuras N° IV-7, velocidad de giro de las bombas; y IV-8, presión en el múltiple de descarga de la estación. Las figuras contienen los registros típicos luego de la desconexión en emergencia de (1), (2) y (3) bombas. Los resultados obtenidos para la presión máxima en la descarga y velocidad máxima inversa en las bombas se consideraron satisfactorios, y el patrón de cierre seleccionado se ha mantenido hasta el presente.

Figura N° IV-7
Aducción Sistema Túy III - Estación de Bombeo 33 - Detención de (1), (2) y (3) Bombas

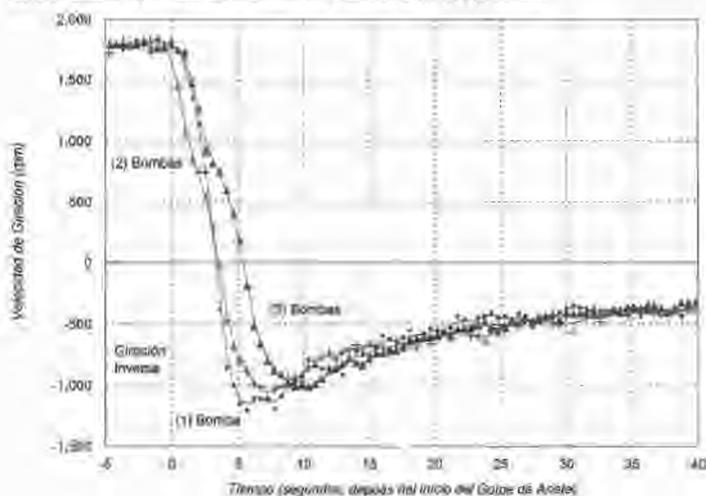
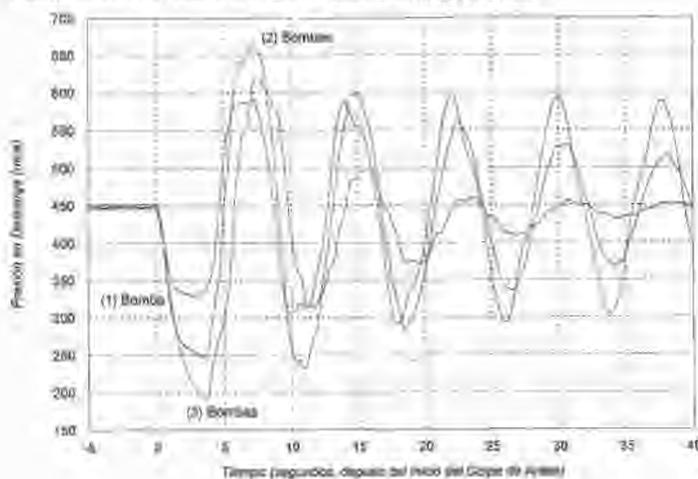


Figura N° IV-8
Aducción Sistema Túy III - Estación de Bombeo 33 - Detención de (1), (2) y (3) Bombas



Luego del proceso de ajuste y graduación de los mecanismos de protección y atenuación del golpe de ariete en las estaciones 32 y 33 del sistema Túy III, el día 25 de febrero de 1994, el sistema ha estado operando de forma casi continua hasta el presente con (3) equipos de bombeo en cada estación, lo cual permitió incrementar el suministro de agua a Caracas en unos 3 m³/s.

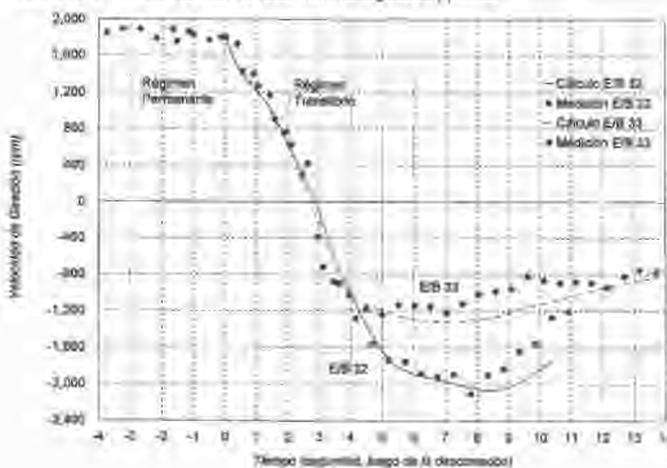
V. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE CÁLCULO

Utilizando los registros captados en las diversas pruebas realizadas se procedió a la verificación y ajuste de los diversos modelos de cálculo que fueron implementados para simular las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas, detención en emergencia de (1) o todos grupos en una estación de bombeo manteniendo la otra en servicio, con la operación de las válvulas de chorro instaladas en la tubería, así como el accionamiento y desconexión programadas de los equipos de bombeo. Para el proceso de calibración se cuenta además, con la información contenida en la referencia [2], que incluye la calibración de un modelo de cálculo con los registros tomados en 1980. En base a toda esta información se ajustaron los parámetros que describen el comportamiento transitorio del sistema, se mejoró el tratamiento matemático del funcionamiento de las válvulas de chorro, de la estación y grupos de bombeo que permanece en servicio, del movimiento de los mecanismos de control, y se trató de lograr una descripción única del sistema que se adaptara razonablemente bien al golpe de ariete por la detención de (1), (2) y (3) bombas, y a los arranques y paradas programadas. La calibración del modelo de cálculo procedió en paralelo con los ajustes realizados en los elementos de protección del golpe de ariete instalados en el sistema de aducción.

El proceso de calibración de los modelos de cálculo se inicia con la descripción precisa del fenómeno transitorio, para tratar de reproducir, sobre la base de la integración de las ecuaciones diferenciales del movimiento no permanente del fluido, los valores obtenidos en las pruebas realizadas. El fenómeno es cíclico, un tren de ondas de presión que se desplaza a lo largo de las aducciones y se refleja en diversos puntos. Por ese motivo, es de especial importancia el tiempo de viaje de las ondas, que puede ser caracterizado por la celeridad promedio de traslación de las ondas de presión en la tubería. Al estimar correctamente la celeridad de la onda, puede reproducirse el patrón base de oscilaciones, y hacer coincidir los tiempos en los cuales ocurren los máximos y mínimos valores de presión en la tubería.

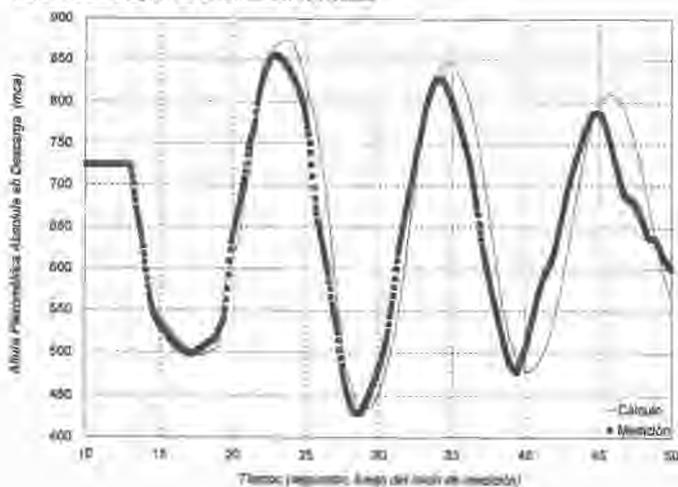
En la figura N° V-1 se muestran los resultados de la correlación entre los valores observados y calculados de velocidad de giración de los equipos de bombeo en las estaciones 32y 33; se obtienen diferencias de 10 a 30 rpm entre las valores calculados y observados de la velocidad máxima de giración inversa, equivalentes a diferencias menores al 2%, con un desfase entre los máximos de 0,5 a 1,0 segundos. En uno de los registros se usó la detención de una bomba aislada, mientras que en el otro se usaron los registros obtenidos de la detención de una bomba manteniendo otra en operación en la misma estación de bombeo.

Figura N° V-1
Sistema Túy III - Estación de Bombeo 32 - Detención en Emergencia de (1) Bomba



Por otra parte, en las figuras N° V-2 a V-6 se muestra la comparación entre las presiones observadas y calculadas en la sección de descarga de las estaciones de bombeo 32 y 33; las diferencias entre los cálculos y mediciones de la presión en el múltiple de descarga es del orden de 20 a 30 mca, menor al 5% de los valores observados, y un desfase del orden de 0,5 a 1,0 segundos en los tiempos de ocurrencia de máximos y mínimos; en estas figuras se usaran los registros correspondientes a varias modalidades de detención de

Figura N° V-2
Aducción Sistema Túy III - Est. 32 - Detención de (2) Bombas



los equipos de bombeo, para mostrar la flexibilidad y robustez de los modelos de cálculo utilizados. Cabe destacar que, en todos los cálculos realizados, se usó una sola descripción de los parámetros de comportamiento físico del sistema, y de sus equipos, accesorios y elementos de atenuación del golpe de ariete.

Figura N° V-3
Aducción Sistema Túy III - Estación de Bombeo 33 - Detención de (1) Bomba

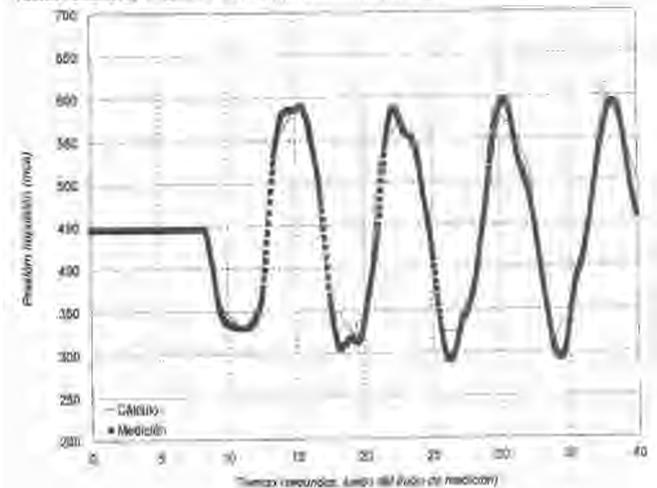


Figura N° V-4
Aducción Sistema Túy III - Estación de Bombeo 33 - Detención de (2) Bombas

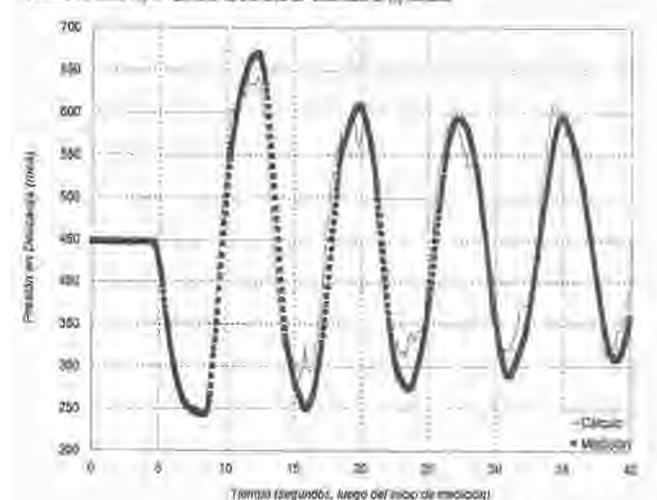


Figura N° V-5
Sistema Túy III - Estación de Bombeo 32 - Detención de (1) Bomba

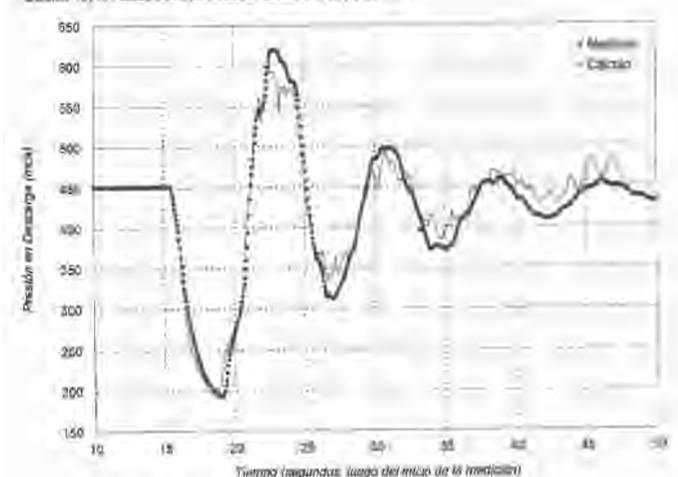
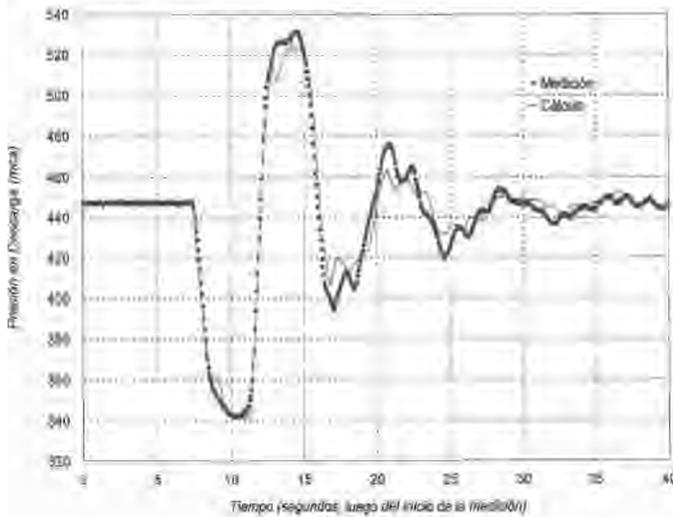


Figura N° 11-6
Aducción Túpuy III - Estación de Bombeo 33 - Detección de (1) Bombeo con aire en Operación



VI. EN CONCLUSIÓN

Las pruebas de puesta en servicio y golpe de ariete para la tercera línea del Túy III fueron exitosas, y han permitido la operación continua de tres bombas en cada estación de bombeo del sistema, 32 y 33, a partir de febrero de 1994, con un incremento de unos 3 m³/s de suministro de agua al Área Metropolitana de Caracas. Durante el proceso se realizaron diversas actividades, tales como instrumentación y medición de parámetros hidráulicos en las estaciones de bombeo, ajuste y graduación de los mecanismos de control para la atenuación del golpe de ariete, y la elaboración y calibración de modelos matemáticos para el cálculo del golpe de ariete. Todas estas actividades se llevaron a cabo con instrumentos adecuados y personal capacitado, de las empresas MECOFLU, GRUPO PROFESIONAL 8086 y CALTEC, contratadas por HIDROCAPITAL para el proceso.

Por otra parte, las mediciones y observaciones realizadas permitieron confirmar el desgaste y desajuste de los mecanismos de control, probados y graduados durante la puesta en servicio inicial del sistema, en 1980, de tal forma que la protección ante los efectos transitorios no era la más adecuada. Debido a la severidad del golpe de ariete, que puede ocasionar falla estructural en las tuberías o en las bombas, es de especial importancia la revisión y ajuste periódicos del estado y de la graduación de los mecanismos de cierre controlado en los elementos de atenuación del golpe de ariete en éste y otros sistemas de aducción.

VII. REFERENCIAS

1. Oficina de Ingeniería CALTEC, S.A., 'Estudio del Golpe de Ariete, Sistema Túy III', INOS, 1978.
2. Méndez, M.V. y Sacchini, M., 'Verificación del Golpe de Ariete, Sistema Túy III, Información Obtenida de los Documentos de Construcción', INOS, 1980
3. Suter, P 'Representation of Pump Characteristics for Calculation of Water-Hammer', Revista Técnica Sulzer, 1966.
4. Wylie, B., Streeter, V., 'Fluid Transients', McGraw-Hill.
5. American Water Works Association, 'Steel Pipe: A Guide for Design and Installation', Manual M-11, 1987.
6. Chaudry, M. H., 'Applied Hydraulic Transients', Van Nostrand-Reinhold.
7. Méndez, M. V., Sánchez, J. A., 'Sistema Tuy IV. Aducción Taguaza-Caujarito. Estudio del Régimen Transitorio', Dirección General de Proyectos, INOS, 1982.
8. Méndez, M. V., Sacchini, M., 'Envolventes Piezométricas por Cierre Instantáneo de Válvulas', IX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Mérida, 1980.
9. Méndez, M. V., 'Algunas Consideraciones para el Diseño Hidráulico de Chimeneas de Equilibrio', II Jornadas Nacionales de Ingeniería Hidráulica, Mérida, Venezuela, 1978.
10. Oficina de Cálculos Técnicos e Hidráulicos CALTEC, S.C., 'Estudio del Golpe de Ariete en el Sistema Túy III, Tramo E/B 32-E/B 33-Estanques de Baruta', Hidrocapital, 1994.
11. MECOFLU, 'Medición de Transitorios Hidráulicos en el Sistema Túy III', Hidrocapital, 1994.