

103
24j

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

REVISION DEL FUNCIONAMIENTO
HIDRAULICO DEL ACUEDUCTO
CHAPALA - GUADALAJARA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

HUGO FRANCISCO PARRA TABLA



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

| | | |
|----|--|----|
| 1. | INTRODUCCION | 5 |
| 2. | ANTECEDENTES | 9 |
| | 2.1 Descripción del Acueducto | 6 |
| | 2.2 Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión | 10 |
| 3. | MEDICIONES EN CAMPO | 13 |
| | 3.1 Mediciones en flujo establecido | 14 |
| 4. | ANALISIS DE LA OPERACION EN FLUJO ESTABLECIDO | 26 |
| | 4.1 Coeficiente de Rugosidad de la Tubería | 27 |
| | 4.2 Operación de la Válvula de Paso Anular | 32 |
| | 4.3 Operación en flujo establecido | 35 |
| 5. | ANALISIS DE LA OPERACION EN FLUJO TRANSITORIO | 46 |
| | 5.1 Operación de la válvula de descarga | 49 |
| | 5.2 Transitorio Hidráulico con Dos Equipos de Bombeo | 52 |
| | 5.3 Transitorio Hidráulico con Cinco Equipos de Bombeo | 57 |
| 6. | CONCLUSIONES | 70 |
| | 6.1 Funcionamiento en flujo establecido | 70 |
| | 6.2 Funcionamiento en flujo transitorio | 71 |
| | BIBLIOGRAFIA | 73 |
| | REFERENCIAS | 74 |
| | ANEXO | 75 |

1. INTRODUCCION

Como es sabido, las grandes ciudades son en si ya un problema por todo lo que representan, puesto que afrontan grandes problemas producto de los requerimientos de sus habitantes. El abastecimiento de agua potable es quizá el mayor de ellos y el más apremiante dado su carácter de indispensable. la ciudad de Guadalajara como otras grandes urbes no escapa a este cuadro.

En virtud de que el agua es un servicio primordia' para el adecuado desarrollo y crecimiento de esta ciudad, tanto las autoridades estatales como las federales dedicaron especial atención a identificar fuentes de abastecimiento de agua que reunieran las siguientes características para el mediano y largo plazo: calidad apropiada para el consumo humano.

volumen suficiente para garantizar una dotación media de 300 l/hab/día y un costo por metro cúbico relativamente bajo. Entre las diversas opciones estudiadas, la que más se apegó a tales características fue la laguna de Chapala, cuyo aprovechamiento requirió de un acueducto de 42 km de longitud.

En el año de 1984, el Instituto de Ingeniería de la UNAM colaboró con la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos en el diseño hidráulico del acueducto Chapala-Guadalajara. La participación del Instituto de Ingeniería se enfocó tanto al diseño hidráulico del acueducto, como al de las estructuras para el control del transitorio hidráulico provocado por el paro de emergencia de los equipos de bombeo. La solución adoptada consistió en el uso de una batería de cámaras de aire como dispositivo primario para el control del transitorio así como de un par de tanques unidireccionales como dispositivos secundarios.

En el capítulo 2 de este trabajo se hace una breve descripción de los elementos que conforman el acueducto, así como de las diferentes etapas que comprendieron su construcción. Adicionalmente, se exponen algunos conceptos básicos referentes a los fenómenos transitorios con la finalidad de que al abordar el capítulo 4 (análisis de la operación en flujo transitorio), no queden conceptos vacíos o poco claros, para así comprender cabalmente de lo que se está tratando.

En el capítulo 3, se presentan los resultados de las mediciones realizadas, tanto en flujo establecido como en flujo transitorio. En el primer caso consistieron en la medición de las presiones a lo largo de la conducción durante la operación de uno y dos de los equipos de bombeo, así como la medición de la pérdida de carga de las válvulas ubicadas en la descarga de las bombas, para diferentes grados de apertura. En el segundo caso, las mediciones consistieron en la obtención de los registros transitorios de presión, velocidad de giro de las bombas y movimiento de cierre de las válvulas de descarga, durante las maniobras de paro de emergencia de uno y dos de los equipos de bombeo.

En el capítulo 4 se muestra cómo las mediciones en flujo establecido arriba citadas permitieron determinar los valores de los coeficientes de pérdida de carga de la línea de

conducción así como los correspondientes a la válvula de paso anular localizada al inicio de la conducción.

En el capítulo 5 se aborda el flujo transitorio, donde se muestra cómo las mediciones permitieron caracterizar el funcionamiento de la válvula de descarga durante el paro de las bombas, además se comparan los registros transitorios medidos y calculados para la operación de dos equipos de bombeo. Adicionalmente se obtienen los registros calculados para la operación de cinco equipos.

Finalmente, en el capítulo 6 se analizan las conclusiones más importantes en relación al análisis del funcionamiento hidráulico del acueducto.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se presenta una breve descripción de los elementos que conforman el acueducto Chapala-Guadalajara, así como el programa que se siguió para llevar a cabo su construcción (sección 2.1). En la sección 2.2, se exponen algunos conceptos básicos referentes a los fenómenos transitorios.

En la figura 2.1 se presenta un croquis de la zona donde se localiza el acueducto anterior, el cual abastece actualmente a la ciudad de Guadalajara.

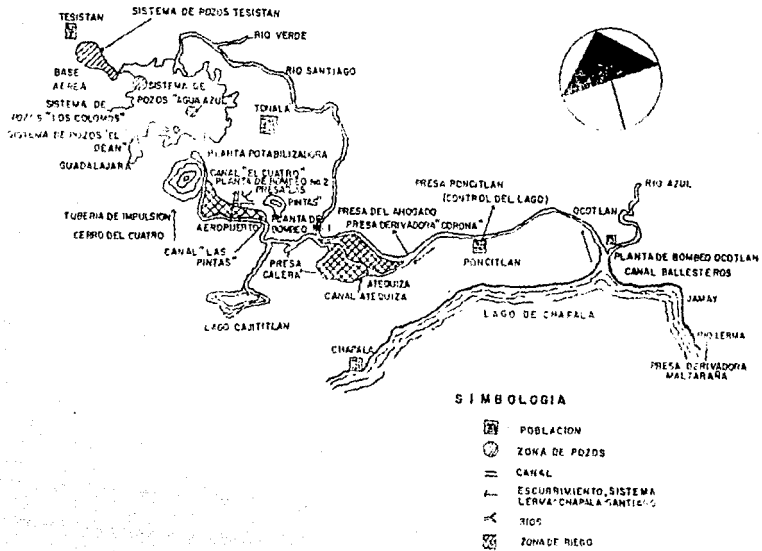


FIG.2. SISTEMA DE ABASTECIMIENTO ACTUAL.

2.1 Descripción del Acueducto

El acueducto Chapala-Guadalajara, comprende la construcción de dos líneas de conducción de concreto presforzado de 2.10 m de diámetro y de 42.6 km de longitud; la toma se ubica cerca del poblado de Santa Cruz de la Soledad, donde el agua tiene mejor calidad.

Este acueducto se localiza en la porción central del Estado de Jalisco y abarca los municipios de Chapala, Ixtlahuacán de los Membrillos, Tlajomulco y Tlaquepaque (ver figura 2.2).

El objetivo principal de esta obra es optimizar el aprovechamiento del agua del Lago de Chapala, no sólo para suministrar agua en bloque a la ciudad de Guadalajara, sino también a la zona metropolitana de esa capital, que comprende los municipios de Zapopan, Tlaquepaque y Tonalá.

La construcción comprende dos periodos; el primero permitirá suministrar 7.5 m³/s adicionales; sin embargo se prevé alcanzar una capacidad máxima de hasta 15 m³/s. Durante el primer periodo, la construcción y operación de una sola línea se realizará de acuerdo a las siguientes etapas:

Primera etapa. Se construirá hasta el kilómetro 14; el acueducto iniciará con un canal de llamada de 4 km de longitud (3 de los cuales se encontrarán dentro del Lago de Chapala), y una planta de bombeo con 12 equipos motor-bomba (ver figura 2.3), que se ejecutará en dos fases. En la primera se construirán totalmente el cárcamo y la mitad de la casa de máquinas con 6 equipos de bombeo, así como una subestación eléctrica de 18 MVA, con una línea de 20.5 km en doble circuito, desde el poblado de Atequiza hasta la planta de bombeo, mientras que en la segunda fase se instalarán los 6 equipos de bombeo restantes, y una subestación eléctrica.

La operación durante esta primera etapa será de la manera siguiente: el agua proveniente de la planta de bombeo se podrá derivar en el kilómetro 14 hacia el arroyo Los Sabinos para luego unirse con el canal de Atequiza y continuar por el sistema actual de abastecimiento.

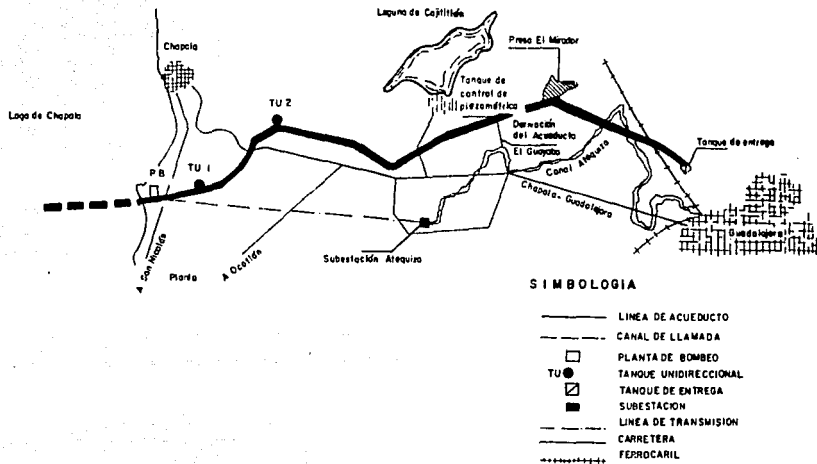


FIG. 2.2 ACUEDUCTO CHAPALA-GUADALAJARA.

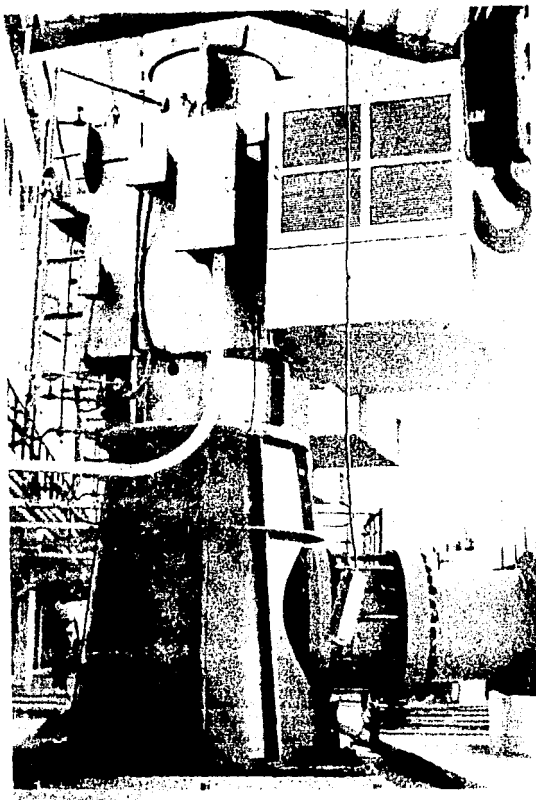


FIGURA 2.3 GRUPO MOTOR - BOMBA

Segunda etapa. Se construirá desde el kilómetro 14 hasta aproximadamente el kilómetro 30 donde se ubicará un tanque de descarga. A partir de este tanque el agua podrá ser conducida hacia la presa El Mirador, con la cual se logrará regularizar la operación del sistema y disponer de una reserva cuando se requiera dar mantenimiento al equipo de bombeo o al acueducto; esta presa tendrá una cortina de tierra de 14 metros de alto por 150 metros de largo, lo que permitirá lograr una capacidad de almacenamiento de aproximadamente tres millones de metros cúbicos.

En esta etapa la operación del acueducto será directa entre la planta de bombeo y la presa, teniéndose presente la posibilidad de derivar en el kilómetro 14 en caso necesario. Desde la presa se tendrá una derivación para unirse ahora con el canal de las Pintas e igualmente continuar por el sistema actual de abastecimiento.

Tercera etapa. Se construirá desde la presa hasta un tanque de entrega con una capacidad de 500 m³ y de ahí hasta la planta potabilizadora, en este caso, la operación del acueducto será ya independiente del sistema actual de abastecimiento.

Si bien el acueducto no ha entrado en operación, actualmente se tiene concluida la segunda etapa, por lo que ya es posible enviar un gasto de hasta 7.5 m³/s hasta la estructura de descarga del kilómetro 30.

2.2 Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión

Antes de abordar el tema de los transitorios hidráulicos, resulta conveniente dar algunas definiciones.

- **Flujo permanente:** Es aquel en el que las características hidráulicas, en una determinada sección del conducto, permanecen constantes para cualquier instante y no varían con el tiempo.
- **Flujo no permanente:** Es aquel en el que las características hidráulicas en una determinada sección del conducto, varían de un instante a otro.

- **Flujo transitorio:** Se define como el flujo no permanente intermedio que tiene lugar entre el permanente inicial y final en un conducto.

Los fenómenos transitorios en conductos a presión, se generan cuando el flujo en la conducción se altera debido al cambio ya sea intencional o accidental de las condiciones de operación.

Como previamente se definió, el estado intermitente del flujo, cuando las condiciones son cambiadas de un estado estacionario a otro, es llamado flujo transitorio. En otras palabras, las condiciones transitorias son iniciadas cuando las condiciones del estado estable son alteradas. Estas alteraciones pueden ser causadas por cambios, planeados o accidentales, al operar el sistema de control, por un mal diseño del sistema o por cambios de flujo en el sistema.

Ejemplos comunes de causas de transitorios son:

- Aperturas o cierres de válvulas en los acueductos.
- Arranque o paro de bombas.
- Arranque o paro de turbinas.

Los fenómenos no estacionarios o transitorios en las conducciones a presión, constituyen un aspecto que el proyectista y el operador de un acueducto no pueden dejar de conocer. La magnitud de las sobrepresiones que se generan pueden destruir la conducción y asimismo, las depresiones pueden reducir la presión interior al valor de la presión de vapor del agua a la temperatura ambiente. Una reducción en la presión interior de este orden, puede producir el colapso de la tubería. Todo ello obliga a que el técnico adquiera un buen conocimiento de estos fenómenos, más aun, si se toman en cuenta las enormes erogaciones que representan la construcción y posterior operación de estos sistemas, así como su valor estratégico, resulta no sólo conveniente, sino indispensable contar con una buena operación del sistema, así como dotarlo de dispositivos adecuados de control para aquellas circunstancias imprevistas que puedan provocar los fenómenos transitorios.

3. MEDICIONES EN CAMPO

Durante los días 20, 21 y 22 de septiembre de 1990, el grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó una campaña de mediciones en el acueducto Chapala-Guadalajara. Dicha campaña, tuvo la finalidad de llevar a cabo un conjunto de mediciones para el análisis de la operación del acueducto tanto en flujo establecido como en flujo transitorio. En este capítulo se presentan los resultados de dichas mediciones.

3.1 Mediciones en flujo establecido

El día 21 de septiembre se realizaron mediciones en flujo establecido para la operación con uno y dos de los equipos de bombeo (Nº 4 y Nº 6). Estas mediciones consistieron en la

obtención de las presiones manométricas a lo largo de la línea de conducción y los niveles de succión de las bombas para cada forma de operación.

Para la medición de las presiones se instalaron manómetros de Bourdon previamente calibrados. En la tabla 3.1 se indican los puntos elegidos para la ubicación de los manómetros, su intervalo de medición y ubicación en el acueducto.

TABLA 3.1: Características de los puntos de medición en flujo establecido

| Punto de medición (N°) | Ubicación | Cadenamiento (m) | Elevación (m) | Rango del manómetro (kg/cm ²) | División mínima (kg/cm ²) |
|------------------------|----------------|------------------|---------------|---|---------------------------------------|
| 1 | Descarga bomba | 0 | 1,528.1 | 0 - 14 | 0.5 |
| 2 | Cámara de aire | 30 | 1,528.3 | 0 - 20 | 1.0 |
| 3 | VAEA N° 4 | 2,477 | 1,544.5 | 0 - 11 | 0.2 |
| 4 | VAEA N° 7 | 4,143 | 1,604.5 | 0 - 4 | 0.2 |
| 5 | VAEA N° 10 | 5,616 | 1,585.5 | 0 - 4 | 0.2 |
| 6 | VAEA N° 13 | 9,004 | 1,608.5 | 0 - 2 | 0.1 |
| 7 | VAEA N° 15 | 11,095 | 1,609.3 | 0 - 4 | 0.2 |
| 8 | VAEA N° 19 | 14,808 | 1,608.9 | 0 - 2 | 0.1 |
| 9 | VAEA N° 22 | 18,700 | 1,586.5 | 0 - 7 | 0.2 |
| 10 | VAEA N° 25 | 22,730 | 1,549.7 | 0 - 11 | 0.2 |
| 11 | VAEA N° 28 | 25,720 | 1,553.7 | 0 - 11 | 0.2 |

VAEA = Válvula de admisión y expulsión de aire

Las mediciones se realizaron durante un período de aproximadamente dos horas, en la primera de las cuales se mantuvo la operación con el equipo de bombeo N° 6, mientras que en la segunda hora, se mantuvo la operación simultánea de los equipos N° 4 y N° 6.

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los valores de las cargas de presión medidas y los valores calculados correspondientes a las cargas piezométricas (recordar que: carga piezométrica = elevación + carga de presión). Las tablas muestran los valores obtenidos, una vez que se ha establecido el flujo en el acueducto, de las dos pruebas realizadas. Esto pudo llevarse a cabo debido a que en cada punto de medición, se ubicó una persona encargada de realizar lecturas de presión a cada 5 minutos.

TABLA 3.2: Mediciones durante la operación de un equipo de bombeo

| Punto Nº | Carga de presión (mca) | | | | C. Piezométrica (mca) |
|-------------|------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|
| | 16:10 | 16:15 | 16:20 | Promedio | |
| 1 | 124.7 | 125.0 | 125.3 | 125.0 | 1,653.1 |
| 2 | 80.9 | 80.2 | 80.9 | 80.7 | 1,609.0 |
| 3 | 63.7 | 63.7 | 63.7 | 63.7 | 1,608.2 |
| 4 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 1,609.0 |
| 5 | 22.4 | 22.4 | 22.4 | 22.4 | 1,607.9 |
| 6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ----- |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ----- |
| 8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ----- |
| 9 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 1,605.0 |
| 10 | 57.5 | 57.5 | 57.5 | 57.5 | 1,607.2 |
| 11 | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 49.9 | 1,603.6 |

TABLA 3.3: Mediciones durante la operación con dos equipos de bombeo

| Punto Nº | Carga de presión (mca) | | | | C. Piezométrica (mca) |
|-------------|------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|
| | 17:35 | 17:40 | 17:45 | Promedio | |
| 1 | 127.2 | 127.2 | 127.2 | 127.2 | 1,655.3 |
| 2 | 83.0 | 83.0 | 83.0 | 83.0 | 1,611.3 |
| 3 | 66.6 | 66.6 | 66.6 | 66.6 | 1,611.1 |
| 4 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 6.7 | 1,611.2 |
| 5 | 24.3 | 24.5 | 24.6 | 24.5 | 1,610.0 |
| 6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 1,608.9 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1,609.3 |
| 8 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 1,609.5 |
| 9 | 20.7 | 20.7 | 20.7 | 20.7 | 1,607.2 |
| 10 | 58.9 | 58.8 | 58.9 | 58.9 | 1,609.6 |
| 11 | 50.1 | 50.1 | 50.1 | 50.1 | 1,603.8 |

Como puede observarse en las tablas 3.2 y 3.3, en algunos puntos de medición se registró presión nula (equivalente a la presión atmosférica por tratarse de presiones manométricas), lo que significa que la tubería operaba parcialmente llena y que la carga piezométrica se ubicó en la superficie del flujo.

La figura 3.1 muestra los resultados de las mediciones de carga piezométrica a lo largo del acueducto.

Por otro lado se midió el nivel de succión de las bombas y se registró el porcentaje de apertura de la válvula de paso anular para cada forma de operación. El nivel de succión permaneció en la cota 1,519.2 m en ambas pruebas, mientras que los porcentajes de apertura de la válvula fueron 14 y 22% para las operaciones con una y dos bombas respectivamente.

El día 22, se realizaron mediciones del gasto y de la pérdida de carga correspondiente a la válvula de descarga del equipo N° 6 para diferentes grados de apertura (θ) de la misma. El objetivo de estas mediciones era determinar el valor del coeficiente de pérdida local de la válvula.

Para la determinación del gasto (Q) se utilizó un tubo de Pitot tipo annubar instalado en la descarga de la bomba. La diferencia de presión del annubar (h_a) se midió utilizando un manómetro diferencial de mercurio. La ecuación de calibración del annubar proporcionada por el fabricante es:

$$Q = 0.654 \sqrt{h_a} \quad (1)$$

en la cual h_a debe estar en milímetros de agua para obtener Q en m^3/s .

Para la determinación de la pérdida de carga en la válvula (h_v), se utilizó otro manómetro diferencial de mercurio. En la tabla 3.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en tales mediciones.

3.2 Mediciones en flujo transitorio

Los días 20 y 21 de septiembre se efectuaron las mediciones en flujo transitorio. Dichas mediciones consistieron en realizar el paro de emergencia del equipo N° 6 y el paro simultáneo de los equipos N° 4 y N° 6 provocado por el corte de energía eléctrica en los motores correspondientes.

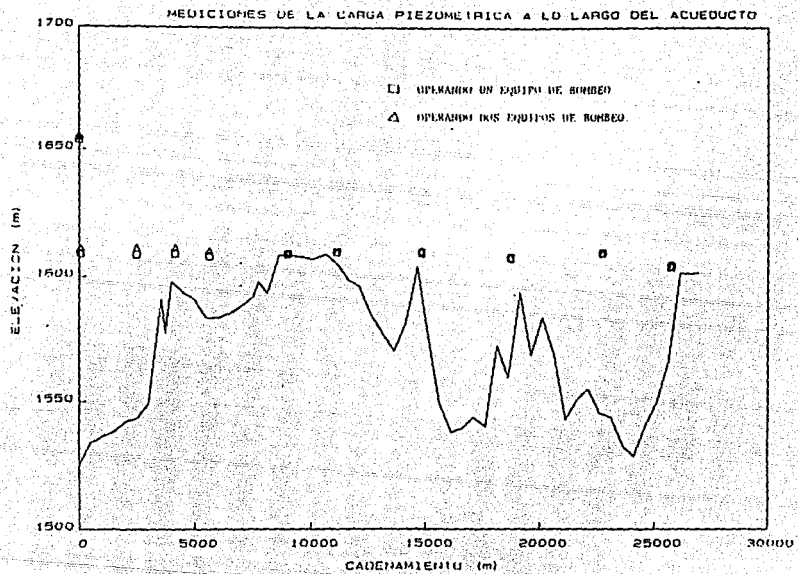


FIGURA 3.1. MEDICIONES DE LA CARGA PIEZOMETRICA A LO LARGO DEL ACUEDUCTO

TABLA 3.4: Mediciones en la válvula de descarga

| Prueba Nº | θ (grados) | h_s (mmH ₂ O) | Q (m ³ /s) | h_r (m) |
|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | 0.0 | 377 | 1.270 | 0.314 |
| 2 | 15.1 | 364 | 1.248 | 0.440 |
| 3 | 28.4 | 364 | 1.248 | 0.779 |
| 4 | 44.1 | 352 | 1.226 | 1.645 |
| 5 | 59.2 | 339 | 1.204 | 4.007 |
| 6 | 73.7 | 264 | 1.062 | 16.617 |

En cada una de las dos pruebas se obtuvieron los siguientes tipos de registro:

- Velocidad de rotación de la bomba
- Desplazamiento angular de la válvula de descarga
- Presión en la descarga de la bomba
- Presión aguas abajo de la válvula de descarga
- Presión en la conexión con la cámara de aire.

Para la medición de la velocidad de rotación de la bomba se utilizó un tacómetro electrónico, para la medición del desplazamiento de la válvula de descarga un medidor de desplazamiento angular y para la medición de las presiones se utilizaron transductores electrónicos de presión. Este grupo de sensores fue operado mediante un equipo de acondicionadores de señal, mientras que para el registro de las señales se utilizó un graficador de papel fotosensible.

Las figuras 3.2 a 3.6 muestran los registros obtenidos durante el paro del equipo Nº 6, mientras que las figuras 3.7 a 3.10 muestran los registros correspondientes al paro simultáneo de los equipos Nº 4 y Nº 6. El registro correspondiente al desplazamiento de la válvula resultó ser el mismo para las dos pruebas realizadas (figura 3.3) obteniéndose un tiempo de cierre de 16.1 segundos.

En los capítulos siguientes se discuten los resultados obtenidos, analizando las características de la operación del acueducto.

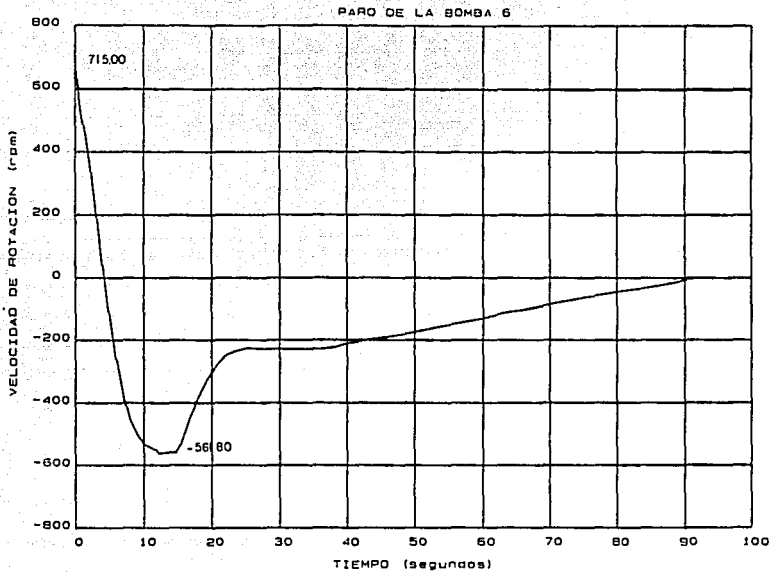


FIGURA. 3.2 VELOCIDAD DE ROTACION DE LA BOMBA

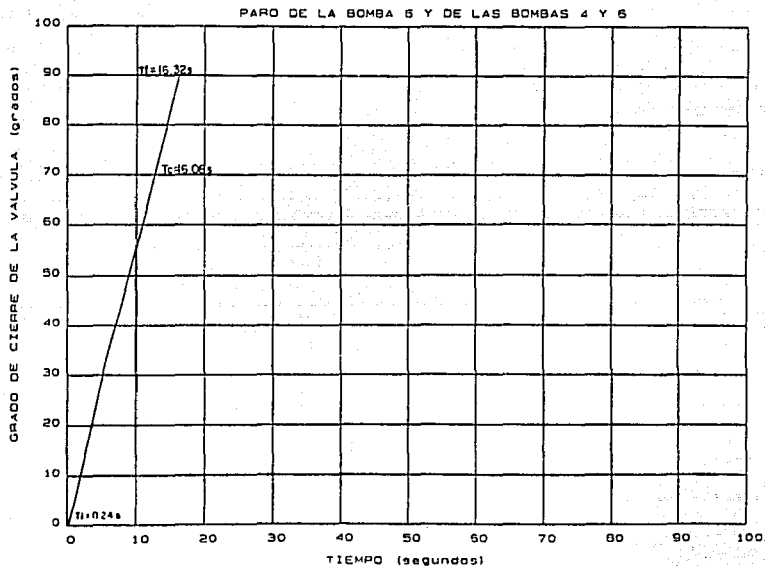


FIGURA 33 DESPLAZAMIENTO DE LA VALVULA DE DESCARGA

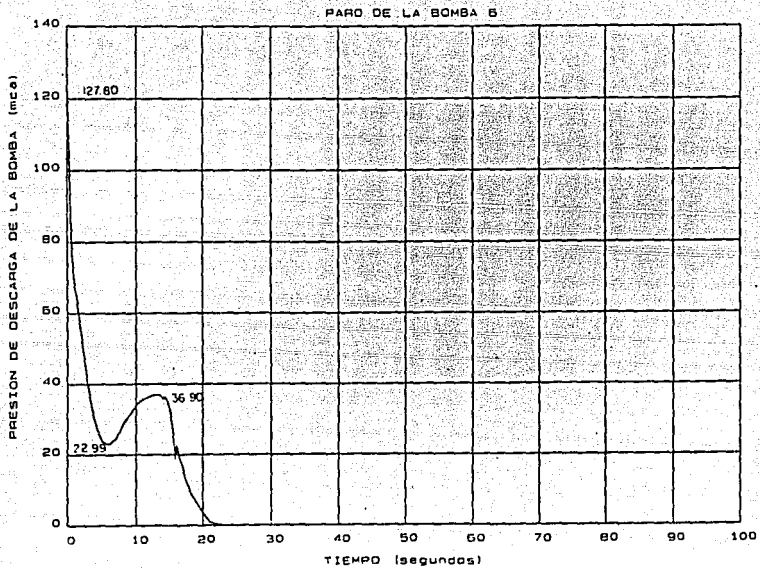


FIGURA 3 4 PRESION EN LA DESCARGA DE LA BOMBA

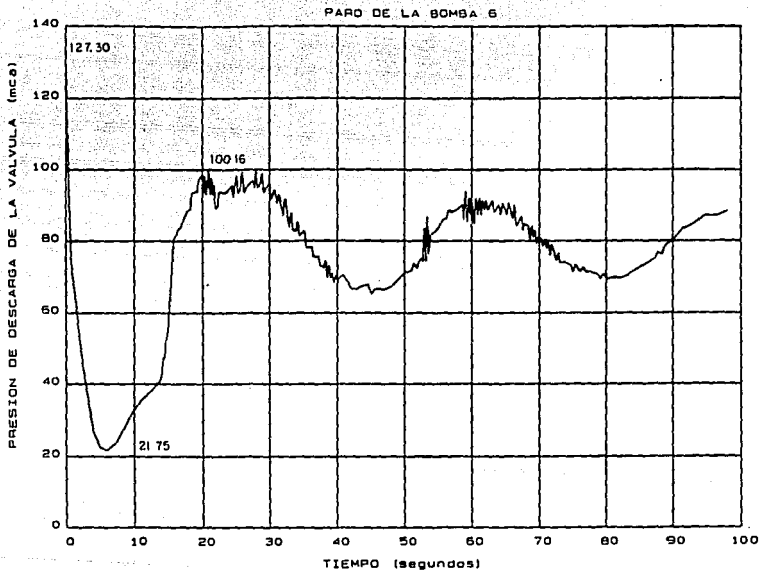


FIGURA 3.5 PRESION AGUAS ABAJO DE LA VALVULA DE DESCARGA

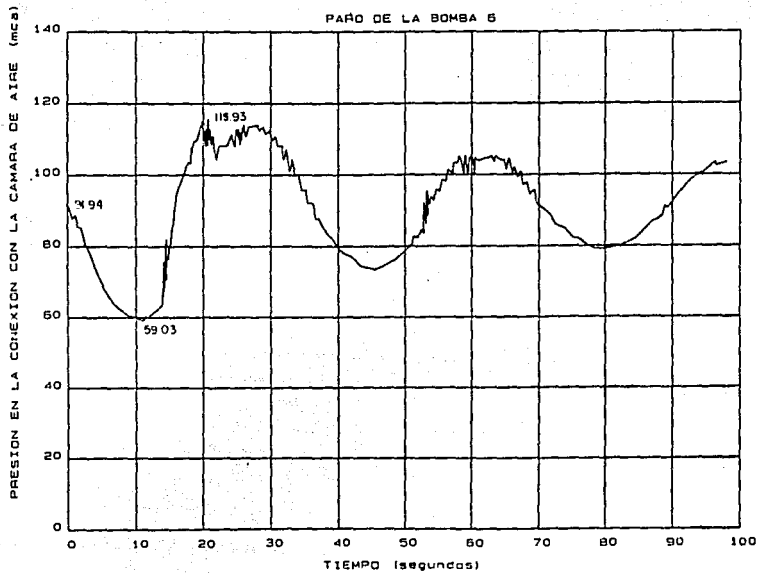


FIGURA 3.6 PRESION EN LA CONEXION CON LA CAMARA DE AIRE

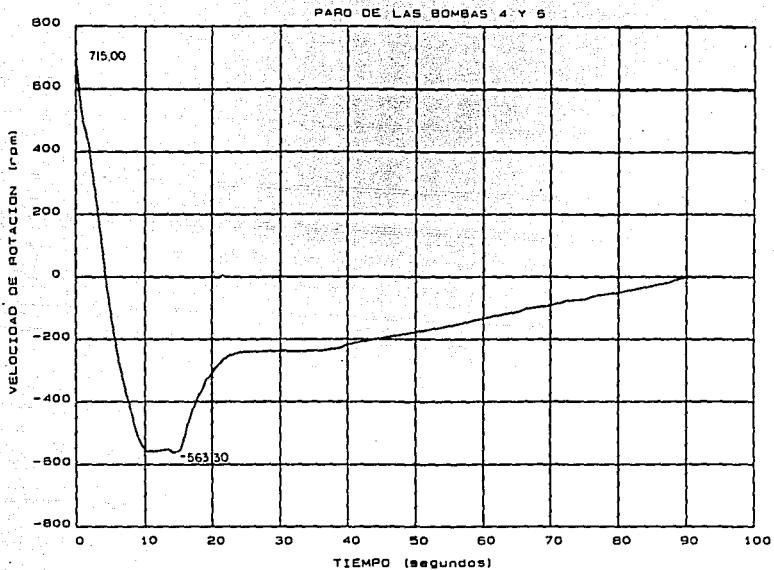


FIGURA 3.7 VELOCIDAD DE ROTACION DE LA BOMBA

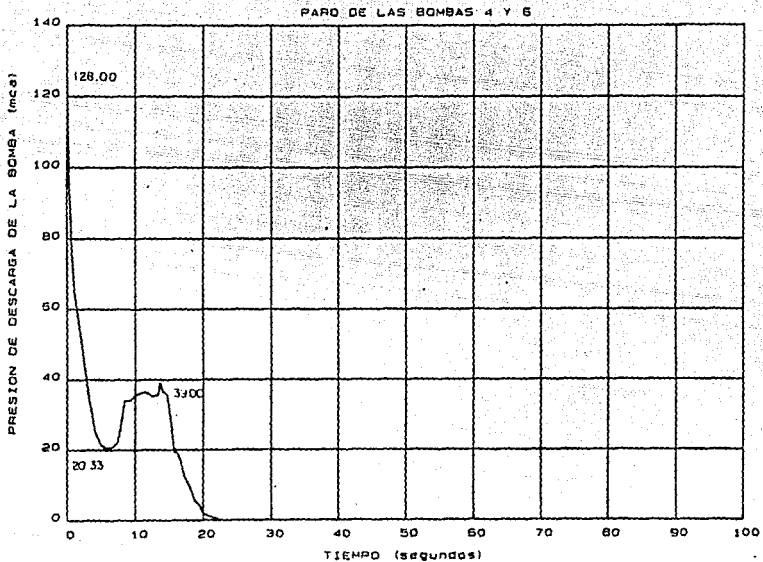


FIGURA.3.8 PRESION EN LA DESCARGA DE LA BOMBA

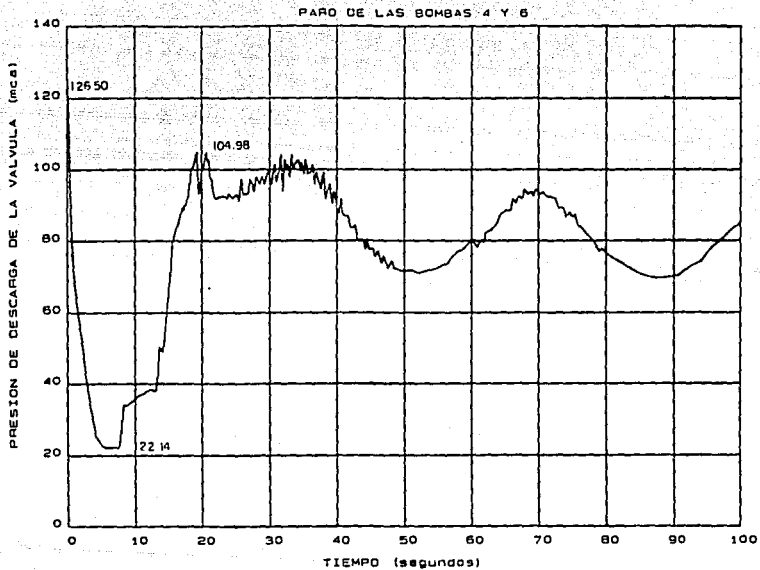


FIGURA.3.9 PRESION AGUAS ABAJO DE LA VALVULA DE DESCARGA

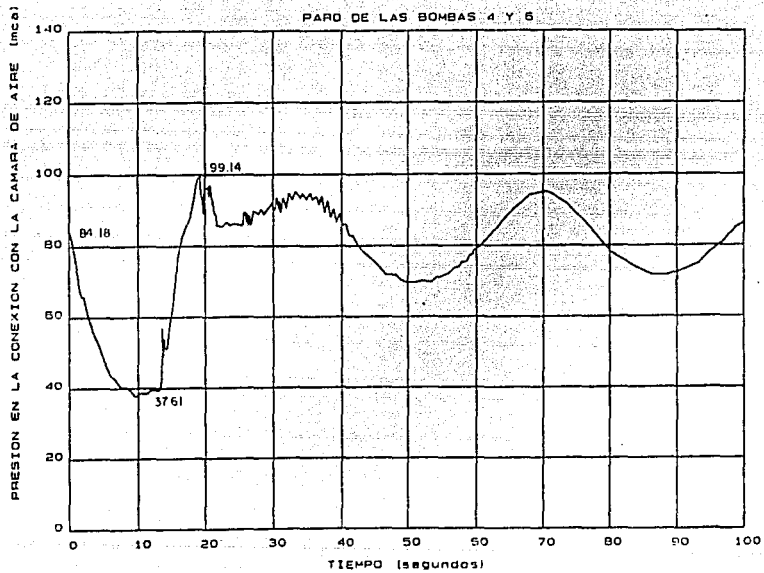


FIGURA 3.10 PRESION EN LA CONEXION DE LA CAMARA DE AIRE

4. ANALISIS DE LA OPERACION EN FLUJO ESTABLECIDO

En este capítulo se presenta un análisis de la operación en flujo establecido del acueducto, considerando tanto la información obtenida de las referencias [1] y [2] como los resultados de las mediciones expuestas en la sección 3.1 de este trabajo. En la sección 4.1 se calcula el coeficiente de rugosidad de la tubería de conducción a partir de las cargas piezométricas y del gasto bombeado. Posteriormente, en la sección 4.2 se analiza la pérdida de carga de la válvula de paso anular, para determinar los porcentajes de apertura requeridos en función del número de equipos en operación. Finalmente en la sección 4.3 se analiza el funcionamiento del acueducto en flujo establecido, determinando el gasto que debe bombear cada equipo para no superar el consumo nominal de sus motores, calculando además el consumo de energía por metro cúbico de agua bombeada como consecuencia de las cargas y eficiencias reales de las bombas.

4.1 Coeficiente de Rugosidad de la Tubería

Existen diversas fórmulas para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción a lo largo de una tubería, siendo las más comunes la de Darcy-Weisbach y la de Manning. En ambos casos es necesario conocer el valor del coeficiente de rugosidad de la tubería (f o n según el caso) que depende fundamentalmente del material del que está fabricado ésta. Así, partiendo de la fórmula de Darcy-Weisbach (2) es posible despejar el valor del coeficiente de rugosidad (f), de la siguiente manera:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

donde:

- f factor de fricción, sin dimensiones
- g aceleración de la gravedad, en m/s²
- h_f pérdida por fricción, en m
- D diámetro de la tubería, en m
- L longitud de la tubería, en m
- v velocidad media, en m/s.

Si S_f representa la relación entre la pérdida de energía y la longitud del tubo en que ésta ocurre (pendiente de fricción), la ecuación (2) también es:

$$S_f = \frac{h_f}{L} = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

si además $v = Q/A$ y $A = \pi D^2/4$, entonces la ecuación (3) se transforma en:

$$S_f = \frac{8 Q^2 f}{g \pi^2 D^5} \quad (4)$$

así, despejando f de (4) obtenemos:

$$f = \frac{g \pi^2 D^5 S_f}{8 Q^2} \quad (5)$$

por lo tanto, para la determinación del coeficiente de fricción es necesario conocer el valor tanto de la pendiente de fricción (S_f) como del gasto (Q) que circula por la tubería.

Para determinar el gasto bombeado por cada equipo se utiliza la curva carga-gasto de la figura 4.1 que caracteriza el comportamiento de cada una de las seis bombas instaladas, dicha curva se obtuvo mediante un análisis estadístico de las mediciones efectuadas en forma conjunta entre el personal de KSB (fabricante de la bomba), SARH y el II en febrero de 1989.

Tomando en cuenta las medidas de carga piezométrica en la descarga de las bombas (h_d) y el nivel de succión de las mismas (h_s), es posible determinar la carga dinámica total con la siguiente expresión:

$$H = h_d - h_s - \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

siendo $v^2/2g$ la carga de velocidad en la descarga de las bombas.

Debido a que la carga de velocidad es función del gasto bombeado, y que éste se obtiene de la curva carga-gasto, es necesario aplicar un procedimiento iterativo para calcular los valores de H y Q .

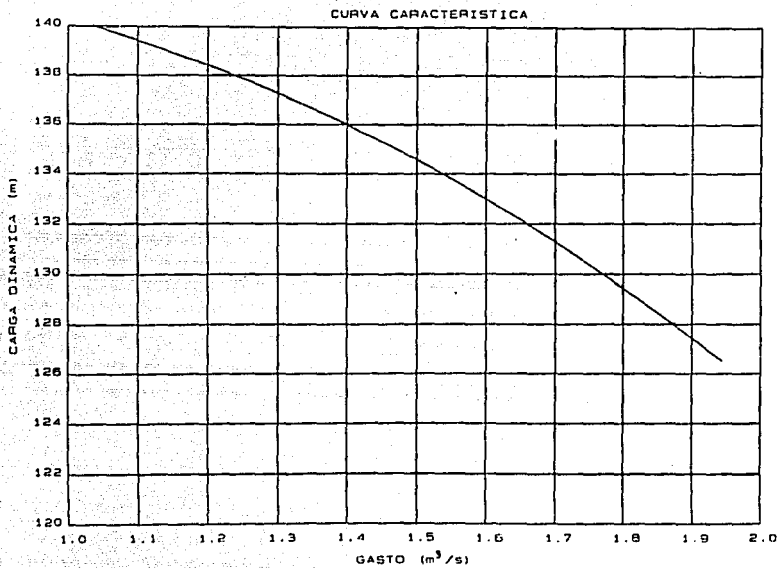


FIGURA 41 CURVA CARGA-GASTO DE LAS BOMBAS DEL ACUEDUCTO

Considerando los datos registrados en las tablas 3.2 y 3.3 para la carga en la descarga de las bombas (punto N° 1), el nivel de succión y el diámetro de la tubería de descarga (36"), en la tabla 4.1 se presentan H y Q para las dos pruebas realizadas en flujo establecido.

TABLA 4.1: Valores de carga y gasto para las pruebas realizadas

| PRUEBA | h_s (m) | h_d (m) | H (m) | Q (m ³ /s) |
|-----------|--------------|--------------|----------|--------------------------|
| 1 equipo | 1,653.1 | 1,519.2 | 134.2 | 1.526 |
| 2 equipos | 1,655.3 | 1,519.2 | 136.3 | 2.752 |

Para la determinación de la pendiente de fricción se realizó un ajuste lineal por mínimos cuadrados, de los valores de la carga piezométrica medida durante la operación con dos equipos de bombeo. La prueba con un equipo de bombeo fue descartada para estos efectos ya que, como se indicó en la sección 3.1, un tramo considerable del acueducto operaba parcialmente lleno. En el ajuste se eliminó el punto N° 1 (ver tablas 3.1, 3.2 y 3.3), ya que dicho punto corresponde a la medición realizada en la descarga de las bombas y por lo tanto se ubica aguas arriba de la válvula de paso anular. En la figura 4.2 se muestran graficados los valores medidos para la carga piezométrica, así como la línea de ajuste. De dicho ajuste el valor de la pendiente de fricción resultó ser:

$$S_f = 0.000224$$

Finalmente, con la ecuación (5) y los datos medidos para la operación de dos equipos, se obtuvo el valor del factor de fricción (f)

$$f = 0.0146$$

cuyo equivalente en la fórmula de Manning, a partir de un razonamiento análogo es:

$$n = 0.0123$$

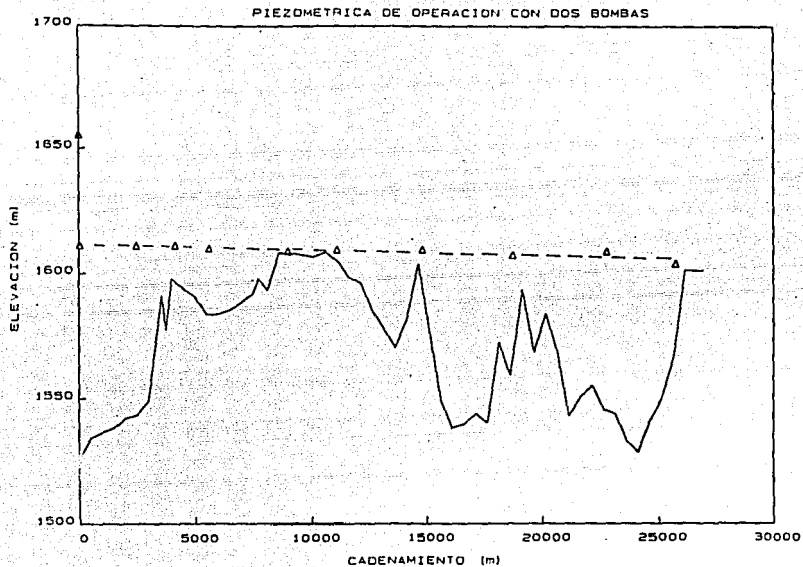


FIGURA 42 PIEZOMETRICA DE OPERACION CON DOS EQUIPOS DE BOMBEO

Del diagrama universal de Moody y para las variables de la prueba realizada ($f = 0,0146$ y $Re = 1,7 \times 10^6$), se tiene una curva de rugosidad relativa (e/D) de 0,00022 que corresponde a una rugosidad absoluta (e) de 0,46 mm (ver figura 4.3). Además dicha curva se encuentra ubicada en la zona de franca turbulencia, por lo que el valor encontrado para f se puede tomar como constante para todo el rango de operación del acueducto.

4.2 Operación de la Válvula de Paso Anular

A partir de las mediciones de flujo establecido, se puede revisar el comportamiento de la válvula de paso anular localizada al inicio de la línea de conducción. De las tablas 3.2 y 3.3 pueden obtenerse los valores de la pérdida de carga de la válvula como la diferencia de las cargas piezométricas entre los puntos de medición 1 y 2. La tabla 4.2 muestra dichos valores para las dos pruebas realizadas.

TABLA 4.2: Porcentaje de apertura-pérdida de carga

| Prueba | Gasto bombeado (m ³ /s) | Porcentaje de apertura (%) | Pérdida de carga (m) |
|-----------|------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 equipo | 1.526 | 14 | 44.1 |
| 2 equipos | 2.752 | 22 | 44.0 |

Por otra parte, la información proporcionada por el fabricante de la válvula [2] correspondiente a la pérdida de carga para diferentes porcentajes de apertura es la que se presenta en la tabla 4.3.

Suponiendo que la pérdida de carga de la válvula (h_v) es función del cuadrado del gasto que fluye a través de ella, entonces:

$$h_v = k Q^2 \quad (7)$$

Despejando el valor de k de la ecuación (7) y considerando los datos de la tabla 4.3, para cada porcentaje de apertura y para cada gasto, se obtienen los valores de k de la tabla 4.4.

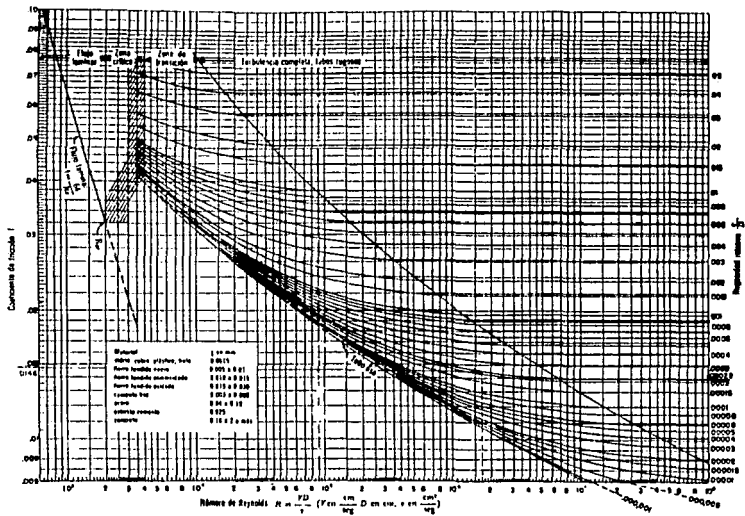


FIGURA 4.3 DIAGRAMA UNIVERSAL DE MOODY

TABLA 4.3 Pérdida de carga de la válvula de paso anular (m)

| % de apertura | Gasto (m ³ /s) | | | | |
|---------------|---------------------------|--------|--------|----------|----------|
| | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 | 7.5 |
| 10 | 84.70 | 315.00 | 714.00 | 1,253.00 | 1,972.00 |
| 20 | 15.40 | 57.20 | 130.00 | 229.00 | 359.00 |
| 30 | 5.39 | 20.00 | 45.40 | 80.10 | 126.00 |
| 40 | 2.38 | 8.84 | 20.00 | 35.40 | 55.40 |
| 50 | 1.30 | 4.81 | 10.90 | 18.20 | 30.20 |
| 60 | 0.84 | 3.12 | 7.08 | 12.50 | 19.60 |
| 70 | 0.70 | 2.52 | 5.72 | 10.10 | 15.80 |
| 80 | 0.47 | 1.74 | 3.95 | 6.97 | 10.90 |
| 90 | 0.39 | 1.43 | 3.24 | 5.72 | 8.96 |
| 100 | 0.31 | 1.17 | 2.66 | 4.68 | 7.33 |

TABLA 4.4: Coeficiente de pérdida de carga de la válvula de paso anular

| % de apertura | Gasto (m ³ /s) | | | | |
|---------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1.5 | 3.0 | 4.5 | 6.0 | 7.5 |
| 10 | 37.644 | 35.000 | 35.259 | 34.806 | 35.058 |
| 20 | 6.884 | 6.356 | 6.420 | 6.361 | 6.382 |
| 30 | 2.396 | 2.222 | 2.242 | 2.225 | 2.240 |
| 40 | 1.058 | 0.982 | 0.988 | 0.983 | 0.985 |
| 50 | 0.578 | 0.534 | 0.538 | 0.506 | 0.537 |
| 60 | 0.373 | 0.347 | 0.350 | 0.347 | 0.348 |
| 70 | 0.311 | 0.280 | 0.282 | 0.281 | 0.281 |
| 80 | 0.209 | 0.193 | 0.195 | 0.194 | 0.194 |
| 90 | 0.173 | 0.159 | 0.160 | 0.159 | 0.159 |
| 100 | 0.138 | 0.130 | 0.131 | 0.130 | 0.130 |

Como se puede apreciar en la tabla 4.4, el coeficiente de pérdida de carga es función sólo del porcentaje de apertura, pues es prácticamente independiente del gasto que circula por la válvula.

Mediante una regresión lineal aplicada a los logaritmos del porcentaje de apertura y del coeficiente de pérdida de carga se obtiene.

$$k = 9.346 \alpha^{-2.467} \quad (8)$$

en la figura 4.4 puede apreciarse dicha correlación.

A manera de verificación de la información proporcionada por el fabricante, en la figura 4.5 se han superpuesto a la curva de pérdida de carga-porcentaje de apertura, los dos datos medidos en campo y registrados en la tabla 4.2. Las diferencias que se aprecian no son mayores que las incertidumbres propias de la medición, por lo que podrá tomarse como buena la información del fabricante.

4.3 Operación en flujo establecido

Resulta conveniente recordar que las condiciones de operación de un sistema de bombeo están dadas por la intersección, en un plano carga-gasto, de la curva característica de las bombas y la curva del sistema hidráulico. La curva característica de las bombas tendrá como único parámetro el número (N) de equipos que se encuentren operando, mientras que la curva del sistema tendrá como parámetros principales el coeficiente de rugosidad de la línea de conducción, el porcentaje de apertura de la válvula de paso anular y el nivel de succión de las bombas (ver figura 4.6). Así

$$H_d = h_s + H(N, Q) - h_v(\alpha, Q) - h_f(Q) \quad (9)$$

donde:

- h_s elevación del punto de entrega ($h_s = 1.605.0$ m)
- h_s elevación de la superficie libre del cárcamo de succión
- H carga dinámica de las bombas en función del gasto y del número de equipos en operación
- h_v pérdida de carga en la válvula de paso anular
- h_f pérdida de carga en la tubería.

De la fórmula de Darcy-Weibach y con los datos del acueducto, tenemos:

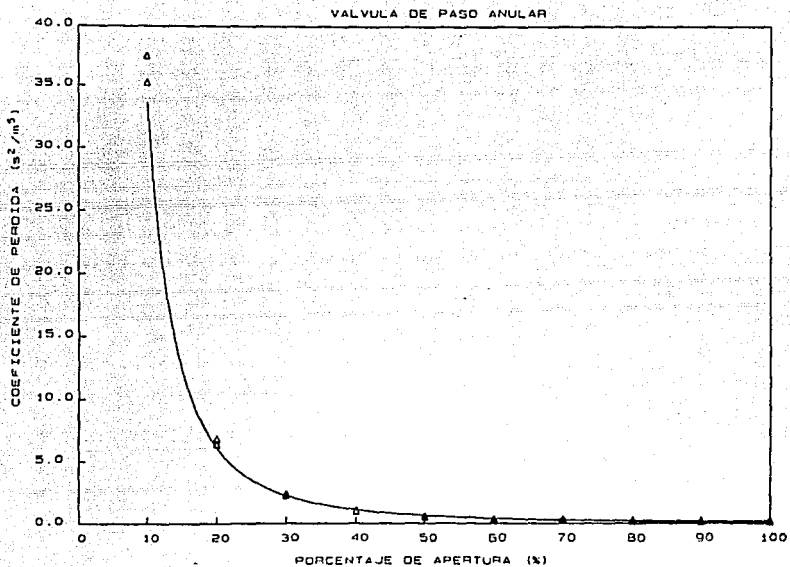


FIGURA 44 COEFICIENTE DE PERDIDA DE CARGA DE LA VALVULA DE PASO ANULAR

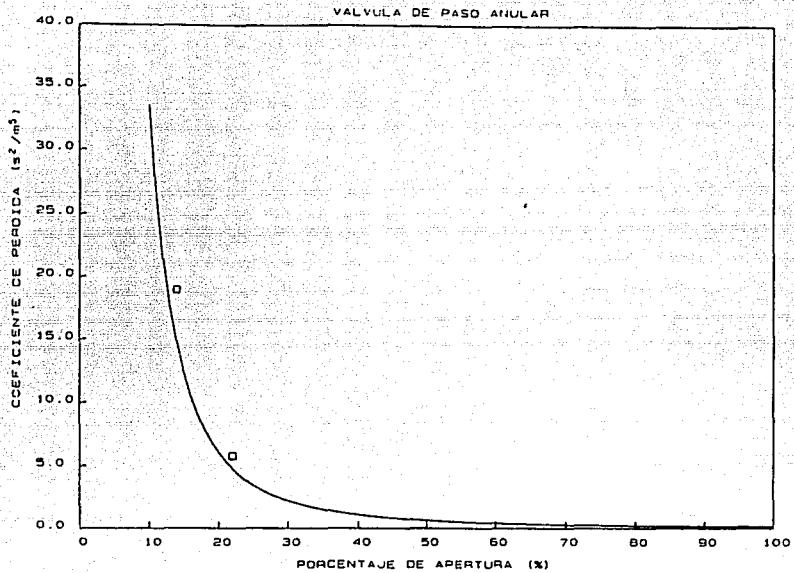


FIGURA 45 MEDICION DE LA PERDIDA DE CARGA DE LA VALVULA DE PASO ANULAR

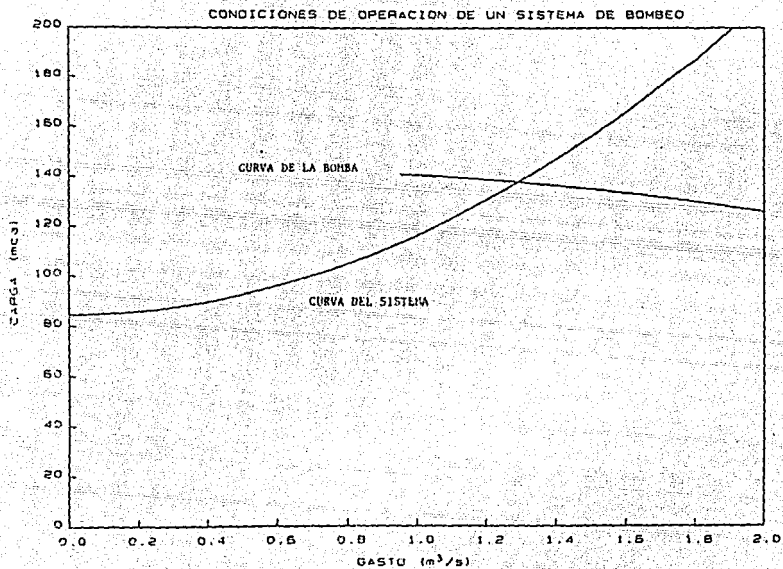


FIGURA 46 CONDICIONES DE OPERACION DE UN SISTEMA DE BOMBEO

$$h_f = \frac{fL}{2gDA^2} Q^2 = \frac{0.0146 \times 25720}{19.26 \times 2.10 \times 3.4636^2} Q^2 = 0.7597Q^2$$

Resolviendo la ecuación (9) para α se puede determinar el porcentaje de apertura de la válvula de paso anular para diferentes condiciones de operación del acueducto. Con este fin, en la figura 4.7 se presenta tanto la curva real de operación de las bombas como la ofrecida por el fabricante. Cada una de estas curvas puede representarse por las expresiones:

real:

$$H = 141.39 + 5.904 \left(\frac{Q}{N}\right) - 6.971 \left(\frac{Q}{N}\right)^2 \quad (10)$$

ofrecida:

$$H = 128.32 + 56.04 \left(\frac{Q}{N}\right) - 33.23 \left(\frac{Q}{N}\right)^2 \quad (11)$$

Las anteriores expresiones representan bien la carga dinámica de la bomba sólo para gastos mayores que 1.0 m³/s.

En la tabla 4.5, se presentan tanto para la curva real como para la ofrecida, los porcentajes de apertura de la válvula de paso anular en función del número de bombas en operación, calculados para el nivel medio de succión $h_s = 1,520.5$ m.

Así, en la tabla 4.5 se puede apreciar que a pesar de las diferencias existentes entre la curva real y la ofrecida de la bomba, es posible que el sistema opere con los gastos de diseño. Sin embargo para un análisis completo, resulta indispensable calcular el consumo de energía por bomba en cada forma de operación.

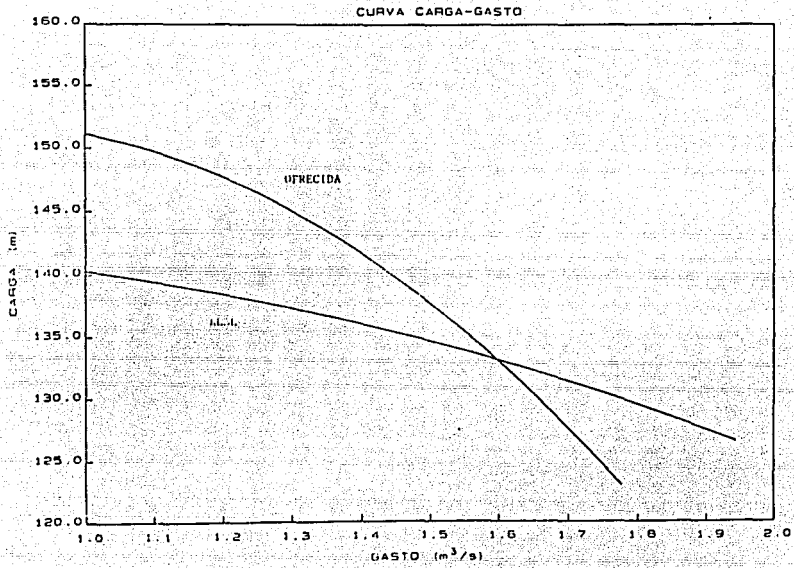


FIGURA 47 CURVAS CARGA-GASTO

En la figura 4.8 se presentan las curvas eficiencia-gasto real y ofrecido de las bombas, la curva real se obtuvo mediante un análisis estadístico de las mediciones efectuadas en forma conjunta entre el personal de KSB, SARH y el II en febrero de 1989. Dichas curvas se pueden representar como:

real:

$$\epsilon_b = 0.8133 \left(\frac{Q}{N}\right) - 0.2100 \left(\frac{Q}{N}\right)^2 \quad (12)$$

ofrecida:

$$\epsilon_b = -0.2944 + 1.6340 \left(\frac{Q}{N}\right) - 0.5637 \left(\frac{Q}{N}\right)^2 \quad (13)$$

La potencia consumida se calcula como el cociente de la potencia hidráulica entre el producto de las eficiencias de la bomba y del motor eléctrico. Los motores instalados en el acueducto tienen una $\epsilon_m = 0.955$, por lo que la potencia consumida en kilowatts se obtiene como:

$$P = \frac{9.81 Q H_b}{0.955 \epsilon_b}$$

Para obtener la potencia en HP se divide la potencia en kW entre 0.746. En la tabla 4.5 se han registrado los valores calculados para la potencia consumida por cada forma de operación.

Resulta importante observar que para bombear 1.5 m³/s por bomba, la potencia consumida en cada motor es de 3,738.4 HP y ésta es superior a la potencia nominal de los motores (3,500 HP). Por lo anterior, se recomienda reducir el gasto bombeado con la finalidad de que la potencia consumida no sea mayor a 3,500 HP.

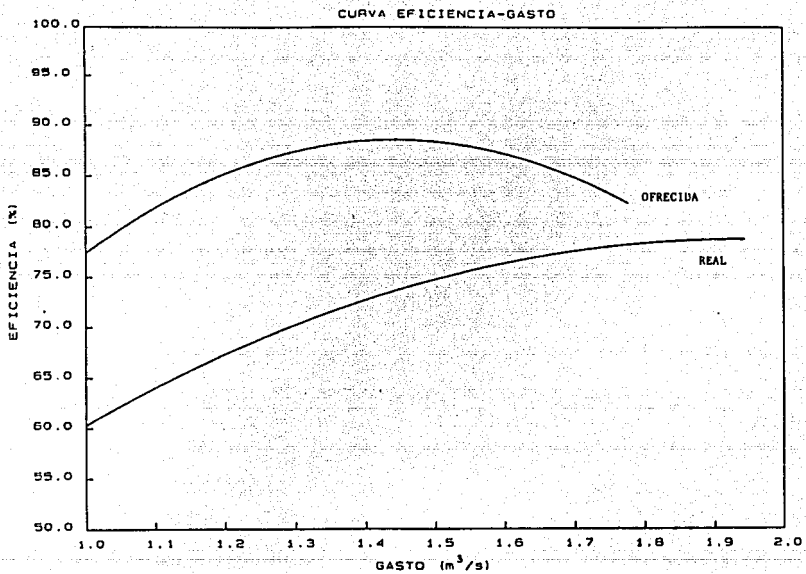


FIGURA 48 CURVAS EFICIENCIA-GASTO

TABLA 4.5: Porcentaje de apertura y potencia consumida

| Nº de equipos | Q (m³/s) | Porcentaje de apertura | | Potencia con HP | |
|---------------|----------|------------------------|----------|-----------------|----------|
| | | Real | Otrecido | Real | Otrecida |
| 1 | 1.5 | 12.0 | 11.7 | 3,738.4 | 3,257.4 |
| 2 | 3.0 | 22.0 | 21.4 | 7,476.8 | 6,514.7 |
| 3 | 4.5 | 33.4 | 32.3 | 11,215.3 | 9,772.1 |
| 4 | 6.0 | 50.1 | 47.6 | 14,953.7 | 13,029.5 |
| 5 | 7.5 | 95.0 | 82.5 | 18,692.2 | 16,286.9 |

En la figura 4.9 se encuentra graficado, en función del gasto bombeado, la potencia real consumida por los motores y la potencia que deberían consumir según las curvas de carga y eficiencia otrecidas. Se observa que para 1.293 m³/s la potencia consumida es de 3,500 HP.

En la tabla 4.6 se muestra el gasto bombeado y el porcentaje de apertura de la válvula para un consumo de 3,500 HP por equipo.

TABLA 4.6: Gasto bombeado y apertura de la válvula para un consumo de 3,500 HP por equipo

| Nº equipos | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Q (m³/s) | 1.293 | 2.586 | 3.879 | 5.172 | 6.465 |
| α | 10.3 | 18.7 | 27.6 | 38.4 | 54.8 |

Así pues, es posible concluir que a pesar de que las diferencias entre el comportamiento otrecido y el real de las bombas no impiden la operación del acueducto, ésta quedará limitada en los gastos a bombear y el consumo de energía por metro cúbico bombeado será mayor. Considerando que según lo otrecido el acueducto trabajaría a 1.5 m³/s por bomba y de acuerdo con la tabla 4.5, el consumo de energía por m³ bombeado debería ser:

$$C = 0.450 \text{ kWhr./m}^3$$

{14}

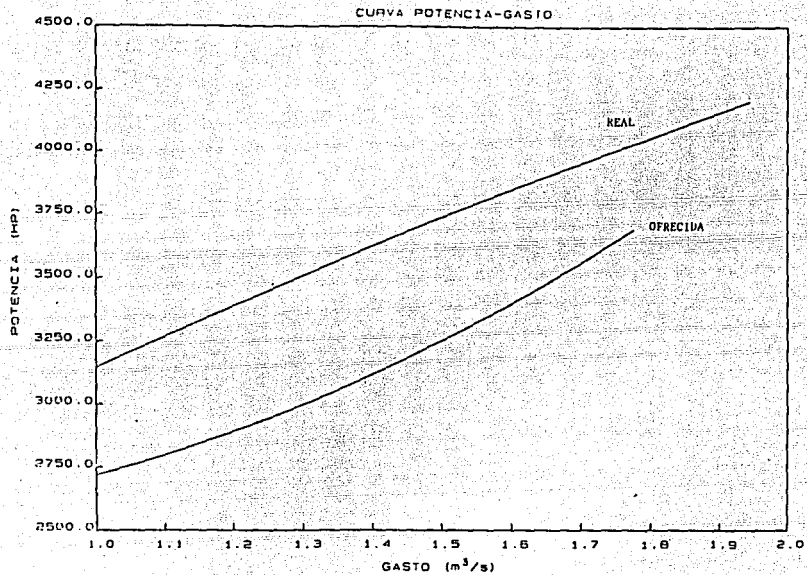


FIGURA 4.9 CURVAS POTENCIA-GASTO

no obstante, de acuerdo a la tabla 4.6 el consumo será:

$$C = 0.561 \text{ kWhr/m}^3 \quad (15)$$

lo que representa un 24.7% más.

Finalmente en la tabla 4.7 se presentan, como una función del nivel en el lago y de acuerdo a los porcentajes de apertura consignados en la tabla 4.6, los gastos totales y consumos de energía por equipo para las diferentes condiciones de operación. Tomando en cuenta que la influencia del nivel del lago en los gastos bombeados no es significativa, entonces no es necesario establecer un porcentaje de apertura para cada nivel de operación, por lo que podrán utilizarse los valores registrados en la tabla 4.6.

TABLA 4.7: Gastos y consumos de energía para distintas condiciones de operación

| Nivel (m) | N° equipos | | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|--------------------------|-----------|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | Q (m ³ /s) | P (HP) | Q (m ³ /s) | P (HP) | Q (m ³ /s) | P (HP) | Q (m ³ /s) | P (HP) | Q (m ³ /s) | P (HP) |
| 1,516 | 1.24 | 3,443 | 2.49 | 3,442 | 3.73 | 3,443 | 4.98 | 3,443 | 6.22 | 3,443 |
| 1,517 | 1.25 | 3,456 | 2.51 | 3,445 | 3.77 | 3,456 | 5.02 | 3,456 | 6.28 | 3,456 |
| 1,518 | 1.26 | 3,469 | 2.53 | 3,468 | 3.80 | 3,465 | 5.06 | 3,469 | 6.33 | 3,469 |
| 1,519 | 1.27 | 3,482 | 2.55 | 3,481 | 3.83 | 3,481 | 5.11 | 3,461 | 6.38 | 3,481 |
| 1,520 | 1.28 | 3,494 | 2.57 | 3,493 | 3.86 | 3,494 | 5.15 | 3,494 | 6.44 | 3,494 |
| 1,521 | 1.29 | 3,506 | 2.59 | 3,506 | 3.89 | 3,506 | 5.19 | 3,506 | 6.49 | 3,506 |
| 1,522 | 1.30 | 3,519 | 2.62 | 3,518 | 3.93 | 3,519 | 5.24 | 3,519 | 6.54 | 3,519 |
| 1,523 | 1.31 | 3,531 | 2.64 | 3,531 | 3.94 | 3,531 | 5.28 | 3,531 | 6.58 | 3,531 |
| 1,524 | 1.32 | 3,543 | 2.66 | 3,542 | 3.99 | 3,543 | 5.34 | 3,543 | 6.65 | 3,543 |
| 1,525 | 1.34 | 3,555 | 2.68 | 3,555 | 4.02 | 3,555 | 5.36 | 3,555 | 6.70 | 3,555 |

5. ANALISIS DE LA OPERACION EN FLUJO TRANSITORIO

En el presente capítulo, se analiza el comportamiento de los dispositivos de control del fenómeno transitorio creado en la línea de conducción al detenerse, por paro accidental, los equipos de bombeo del acueducto (ver figura 5.1).

Primeramente, se analizará el comportamiento de las válvulas de descarga de las bombas con base en las mediciones presentadas en la sección 3.1 (ver figura 5.2). Posteriormente, se realizará la comparación entre los resultados del programa de cálculo del transitorio hidráulico y las medidas realizadas durante el paro de dos de los equipos de bombeo (sección 3.2). Finalmente, se presentan los resultados de la simulación del transitorio hidráulico que eventualmente podrá producirse en el caso extremo del paro de los cinco equipos de bombeo.

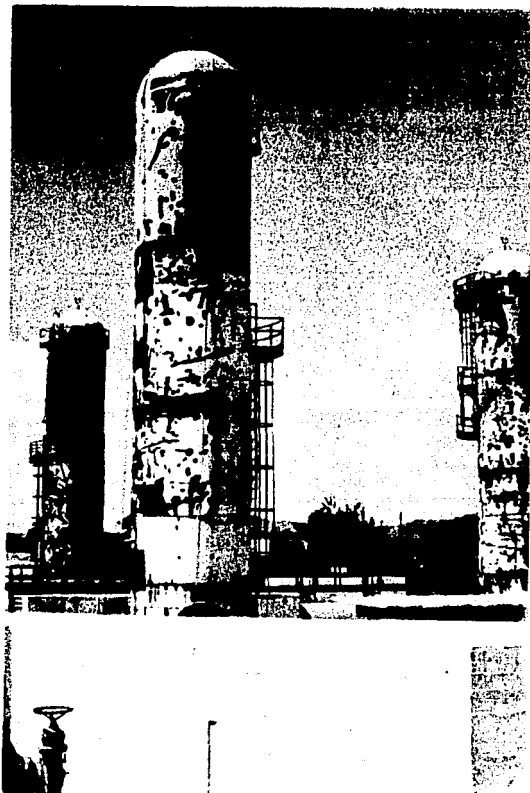


FIGURA 5.1 DISPOSITIVO DE CONTROL
FENOMENOS TRANSITORIOS (TANQUES UNIDIRECCIONALES)

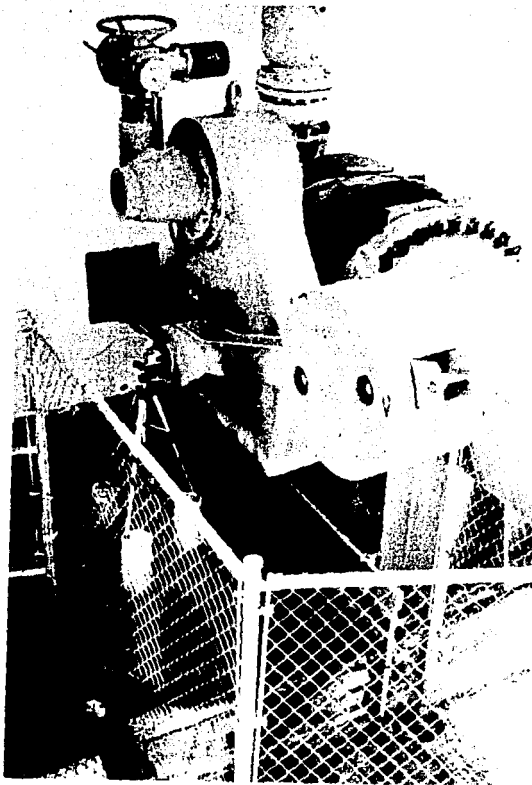


FIGURA 5.2 VALVULA DE DESCARGA DE LA BOMBA

5.1 Operación de la válvula de descarga

En la sección 3.1 se han presentado los resultados de las mediciones de los gastos y de la pérdida de carga correspondiente a la válvula de descarga del equipo N° 6 para diferentes grados de apertura (θ) de la misma. La finalidad de estas mediciones, es determinar una relación funcional entre el valor del coeficiente de pérdida local de la válvula y su grado de apertura (en la tabla 3.4 se presentan los resultados obtenidos en dichas mediciones).

El valor del coeficiente k de pérdida de carga local de la válvula se definirá como:

$$k = \frac{H_v}{Q^2} \quad (15)$$

donde h , es la pérdida de carga que produce la válvula.

Si se desprecia el efecto de las fuerzas viscosas, se puede esperar que el coeficiente k sea función solamente del grado de apertura de la válvula, es decir:

$$k = k(\theta) \quad (16)$$

En la tabla 5.1 se presenta un resumen de los resultados del cálculo del coeficiente k para las pruebas realizadas, asimismo en la figura 5.3 se ha graficado la relación entre k y θ .

TABLA 5.1: Mediciones en la válvula de descarga

| Prueba (N°) | θ (grados) | Q (m ³ /s) | h , (m) | k (s ² /m ⁶) |
|-------------|-------------------|-------------------------|-----------|---------------------------------------|
| 1 | 0.0 | 1.270 | 0.314 | 0.195 |
| 2 | 15.1 | 1.248 | 0.440 | 0.283 |
| 3 | 28.4 | 1.246 | 0.779 | 0.500 |
| 4 | 44.1 | 1.226 | 1.645 | 1.094 |
| 5 | 53.2 | 1.204 | 4.007 | 2.764 |
| 6 | 73.7 | 1.062 | 16.617 | 14.733 |

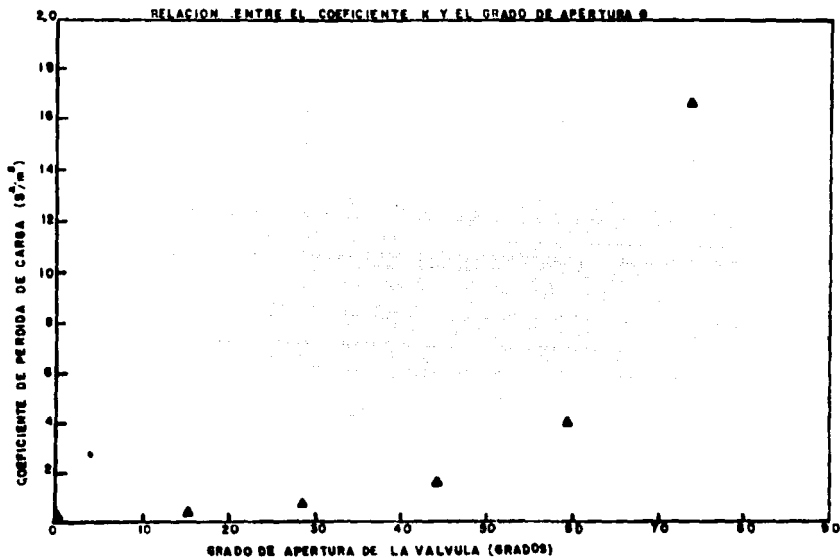


FIGURA 5.3 RELACION ENTRE EL COEFICIENTE K Y EL GRADO DE APERTURA θ

El programa de cálculo numérico del transitorio hidráulico en conductos a presión, desarrollado en el Instituto de Ingeniería [3], permite realizar la simulación del funcionamiento en flujo transitorio de una válvula de cierre controlado, para lo cual es necesario contar con una relación de la forma:

$$\log \left(\frac{k}{k_0} \right) = a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^2 + a_3 \tau^3 + a_4 \tau^4 + a_5 \tau^5 \quad (17)$$

donde:

k_0 coeficiente de pérdida de la válvula totalmente abierta (para este caso $k_0 = 0.195$)

τ parámetro adimensional que indica la fracción de apertura de la válvula ($\tau = 1$ válvula totalmente abierta, $\tau = 0$ válvula totalmente cerrada)

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 y a_5 , coeficientes a determinar.

La relación entre el parámetro τ y el grado de apertura θ es:

$$\tau = 1 - \frac{\theta}{\theta_0} \quad (18)$$

donde:

θ_0 es el ángulo de cierre de la válvula (90°)

En la tabla 5.2 se presentan los valores calculados para las variables de interés.

TABLA 5.2 Valores calculados para τ y $\log(k/k_0)$

| Prueba (Nº) | θ (grados) | τ | $\log(k/k_0)$ |
|-------------|-------------------|--------|---------------|
| 1 | 0.0 | 1.000 | 0.000 |
| 2 | 15.1 | 0.832 | 0.162 |
| 3 | 28.4 | 0.664 | 0.409 |
| 4 | 44.1 | 0.510 | 0.749 |
| 5 | 59.2 | 0.342 | 1.152 |
| 6 | 73.7 | 0.161 | 1.675 |

Realizando un ajuste minimizando el cuadrado de los errores, se obtuvieron los siguientes valores para la relación (17)

| | |
|---------|------------|
| $a_0 =$ | 4.11023 |
| $a_1 =$ | - 19.81791 |
| $a_2 =$ | 54.41927 |
| $a_3 =$ | - 62.70281 |
| $a_4 =$ | 61.72531 |
| $a_5 =$ | - 17.73327 |

En la figura 5.4 se muestra la relación entre los parámetros τ y $\log(k/k_0)$ para las pruebas realizadas y el ajuste correspondiente a la ecuación (17) con los parámetros antes listados.

5.2 Transitorio Hidráulico con Dos Equipos de Bombeo

En la sección 3.2 de este trabajo se presentaron los resultados de la medición del transitorio hidráulico provocado por el paro simultáneo de los equipos N° 4 y N° 6. En esta sección se comparan dichas mediciones con los resultados arrojados por la simulación numérica.

En el anexo, se presenta detalladamente el archivo de datos utilizado para la simulación del transitorio hidráulico. En dicho archivo se indican todas las condiciones en flujo establecido previas a la realización del paro simultáneo de los dos equipos de bombeo.

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran la comparación entre los valores de las presiones medidas y calculadas aguas abajo de la válvula de descarga del equipo N° 6 y en la conexión con la cámara de aire respectivamente, asimismo en la figura 5.7, se muestra la comparación de las velocidades de rotación correspondientes a la bomba N° 6. En dichas figuras se puede observar que los resultados arrojados por el programa numérico se aproximan bastante a los registros de presión medidos, no siendo así en los respectivos a la velocidad de rotación de la bomba.

Las envolventes de las cargas piezométricas máxima y mínima a lo largo de la línea de conducción se muestran en la figura 5.8. En dicha figura se puede observar que la envolvente de presiones máximas queda por debajo de la línea de resistencia de la tubería, y por ende no existirán problemas de sobrepresión que pudieran poner en peligro a la línea. En cuanto a la

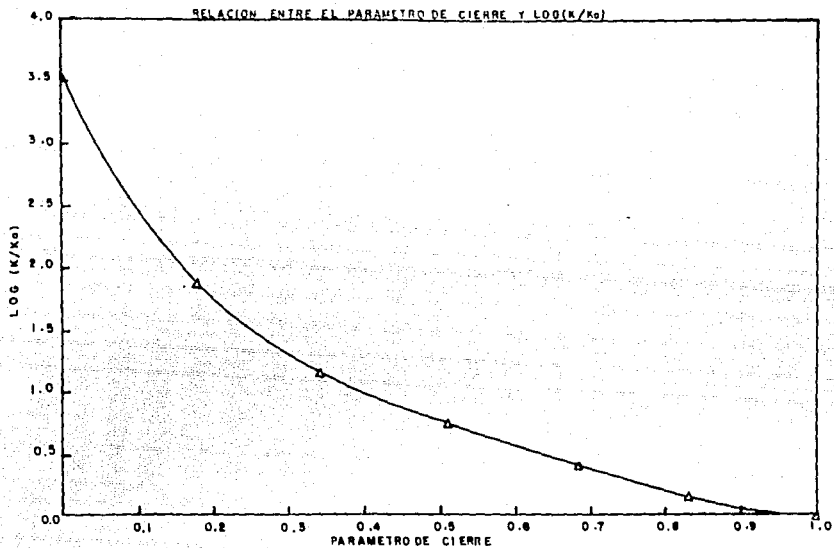


FIGURA 5.4 RELACION ENTRE EL PARAMETRO DE CIERRE Z Y LOG (K/Ko)

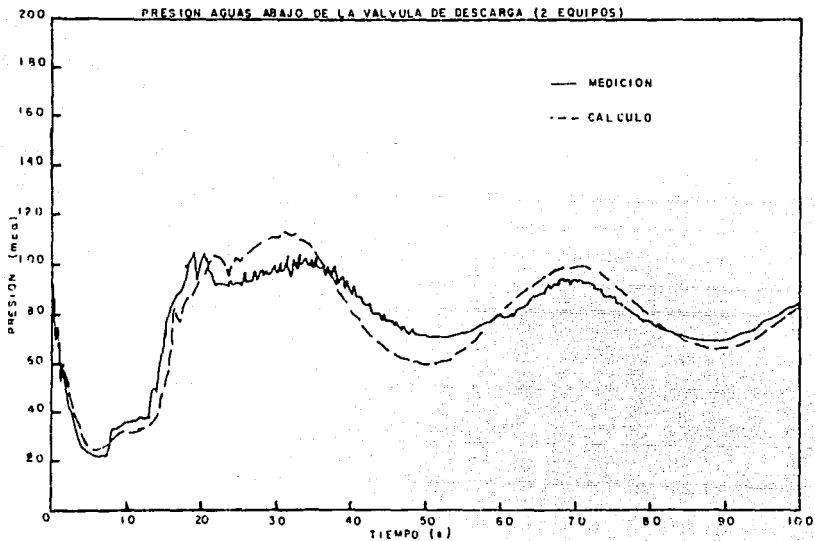


FIGURA 5.5 PRESION TRANSITORIA AGUAS ABAJO DE LA VALVULA DE DESCARGA

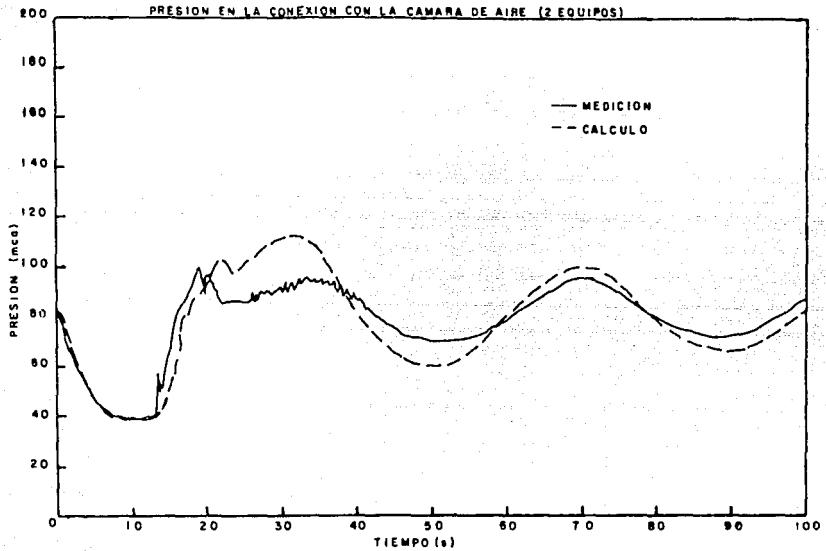


FIGURA 5.6 PRESION TRANSITORIA EN LA CONEXION CON LA CAMARA DE AIRE

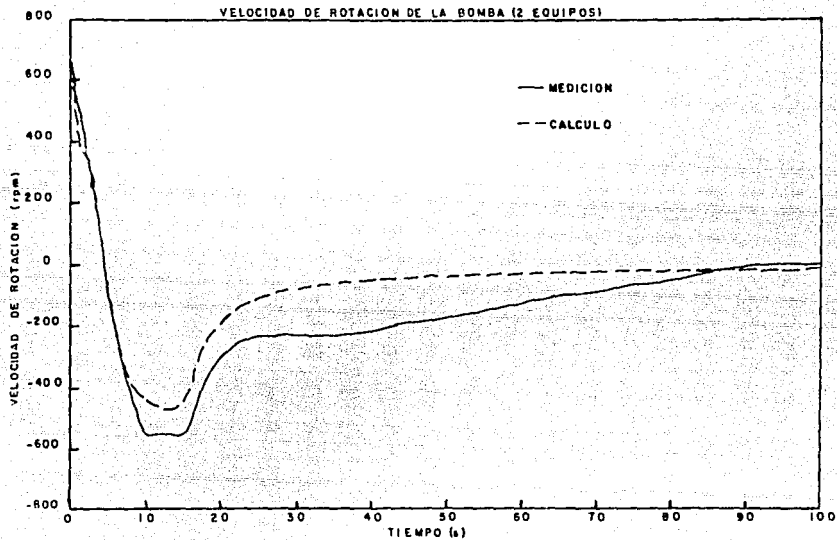


FIGURA 5.7 VELOCIDAD DE ROTACION TRANSITORIA DE LA BOMBA

línea de presiones mínimas, se puede observar que ésta se instala, a lo largo de un tramo, muy próxima al perfil de la tubería, lo que significa que se presentarán presiones cercanas al valor de la atmosférica.

Finalmente, en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 se presentan las variaciones de los niveles en la cámara de aire y en los tanques unidireccionales. En éstas, se indican además los valores límites para dichos niveles. Como puede observarse, en ningún momento resultan superados por los niveles calculados.

5.3 Transitorio Hidráulico con Cinco Equipos de Bombeo

De las secciones anteriores, en la que se realizaron comparaciones entre las mediciones y los valores arrojados por el modelo matemático utilizado para simular los fenómenos transitorios, se ha podido comprobar la confiabilidad del modelo matemático, en particular en cuanto a la simulación del funcionamiento de los dispositivos de control del flujo transitorio, así como de las válvulas de descarga de las bombas.

Esta calibración del programa numérico, permite verificar el comportamiento del acueducto para la condición más desfavorable en cuanto a flujo transitorio. Dicha condición se presentará cuando se produzca el paro simultáneo de los cinco equipos de bombeo. En el anexo se presenta el archivo de datos correspondiente, donde se indican las condiciones para las que se realizó la simulación.

En la figura 5.12 se muestran las envolventes de cargas piezométricas máximas y mínimas a lo largo de la línea de conducción. En dicha figura la línea de resistencia de la tubería queda arriba de la envolvente de presiones máximas, así que no se presentarán problemas de sobrepresión. En cuanto a la envolvente de presiones mínimas, ésta queda en todo momento sobre el perfil de la conducción y por ende toda la tubería estará trabajando con presiones superiores a la atmosférica.

Las figuras 5.13 y 5.14 muestran las presiones calculadas aguas abajo de las válvulas de descarga y en la conexión con la cámara de aire respectivamente, mientras que en la figura

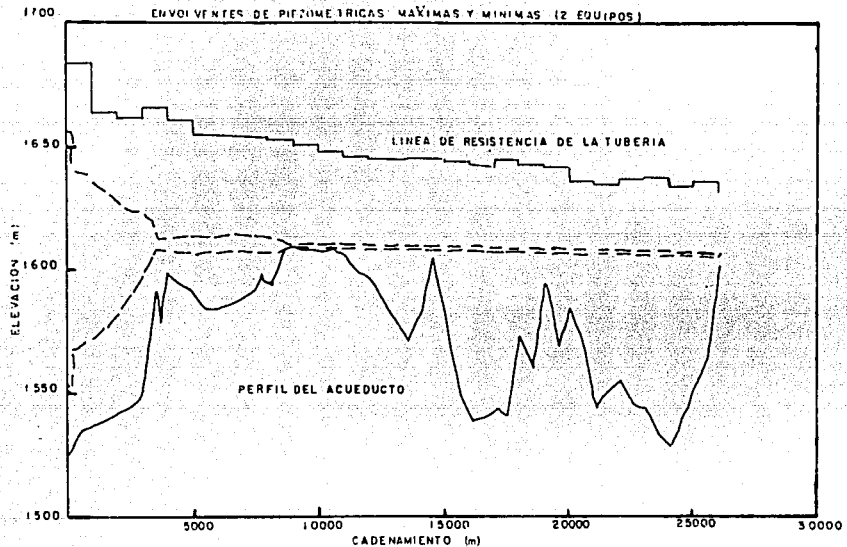


FIGURA 5.8 ENVOLVENTES DE PIEZOMETRICAS MAXIMAS Y MINIMAS

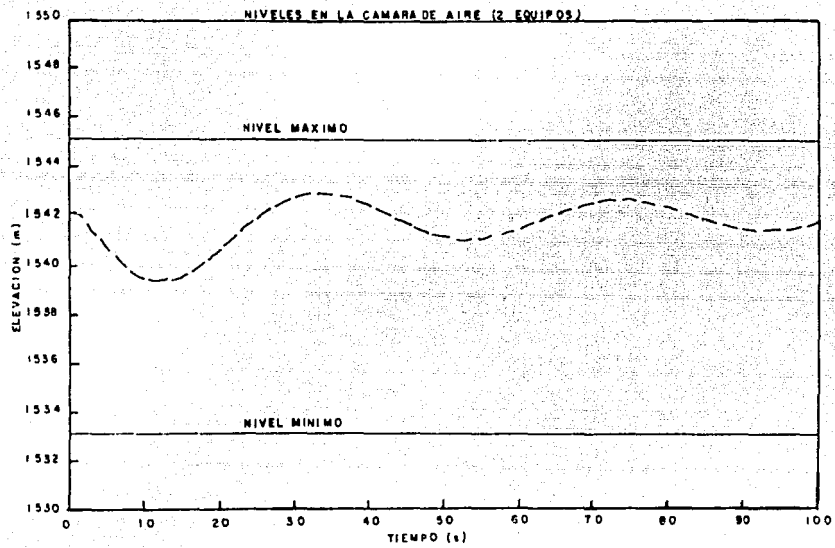


FIGURA 5.9 VARIACION DEL NIVEL EN LA CAMARA DE AIRE

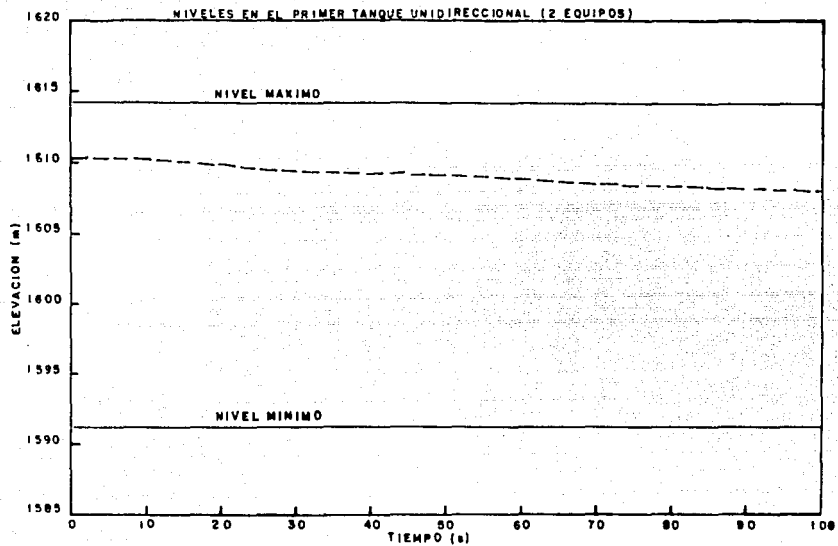


FIGURA 5.10 VARIACION DEL NIVEL EN EL TUI

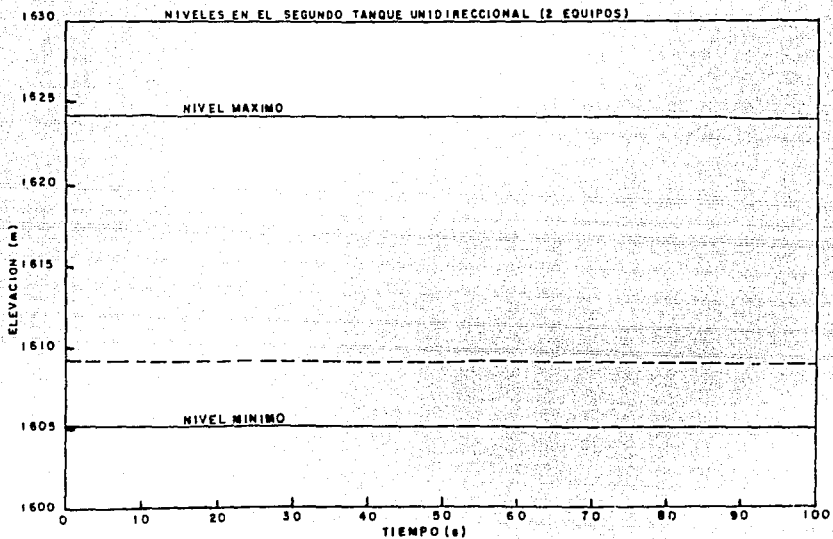


FIGURA 5.II VARIACION DEL NIVEL EN EL TU 2

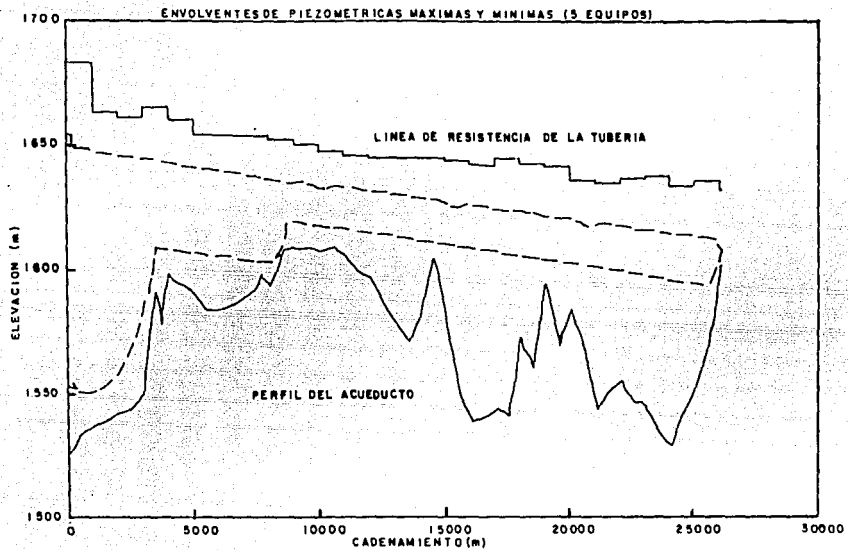


FIGURA 5.12 ENVOLVENTES DE PIEZOMETRICAS MAXIMAS Y MINIMAS

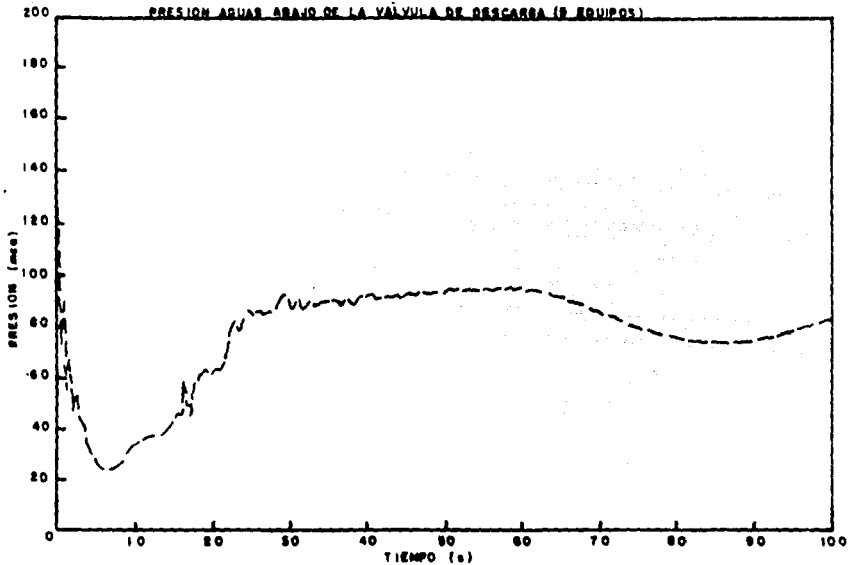


FIGURA 5.13 PRESION TRANSITORIA AGUAS ABAJO DE LA VALVULA DE DESCARGA

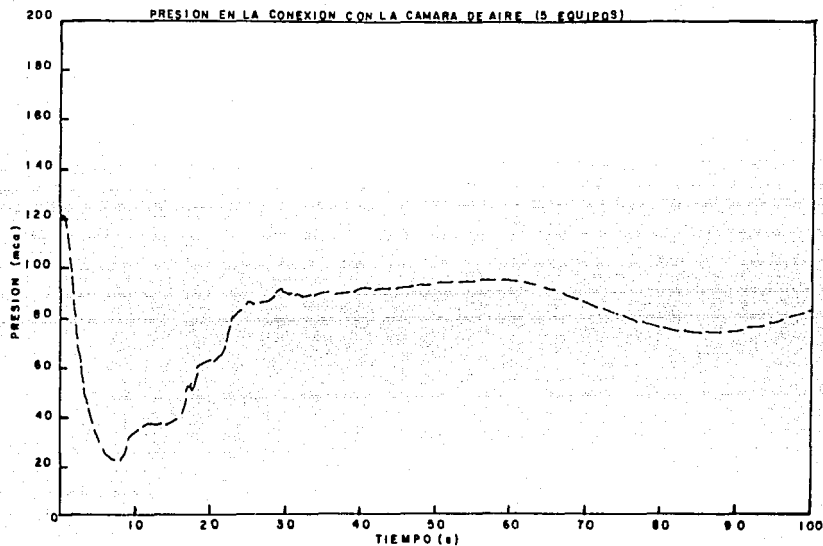


FIGURA.5.14 PRESION TRANSITORIA EN LA CONEXION CON LA CAMARA DE AIRE

5.13 se muestra la velocidad de rotación correspondiente a cada una de las bombas. Esta última gráfica coincide prácticamente con la calculada para el caso del paro de dos equipos de bombeo (ver figura 5.7), por lo que a pesar de la diferencia observada entre las velocidades mínimas medidas y calculadas, es de esperarse que la mínima velocidad real en el caso del paro de cinco equipos sea igual a la registrada durante el paro de dos equipos, es decir -563 rpm (ver figura 3.2).

Por último, en las figuras 5.16, 5.17 y 5.18 se muestran las variaciones de los niveles en la cámara de aire y en los tanques unidireccionales. Como puede observarse, tampoco en este caso los niveles máximos y mínimos resultan superados por los niveles calculados, aunque resulta oportuno aclarar que, en el caso del segundo tanque unidireccional, se requiere tener el máximo nivel posible antes que se produzca el transitorio.

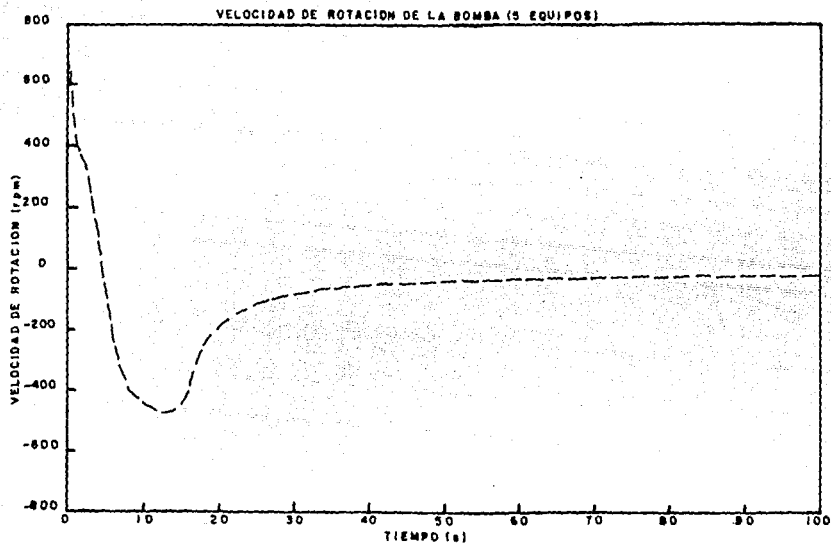


FIGURA. 5.15 VELOCIDAD DE ROTACION TRANSITORIA DE LA BOMBA

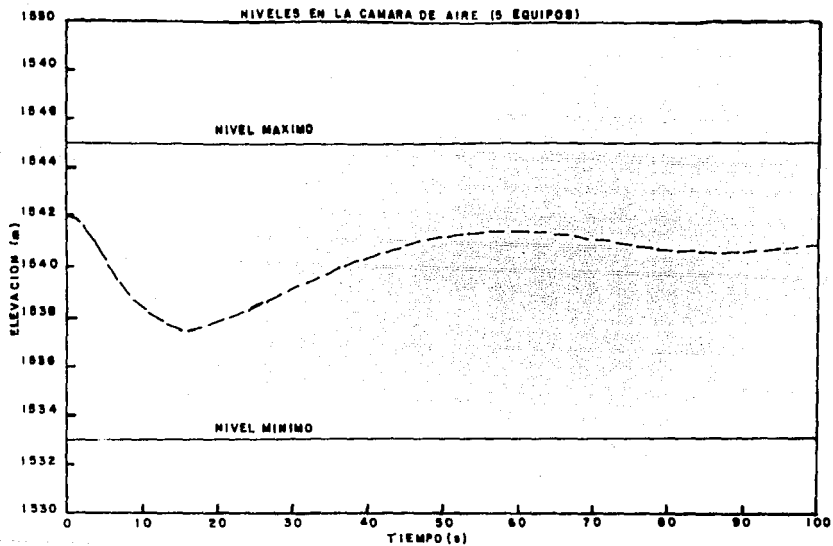


FIGURA 5.16 VARIACION DEL NIVEL EN LA CAMARA DE AIRE

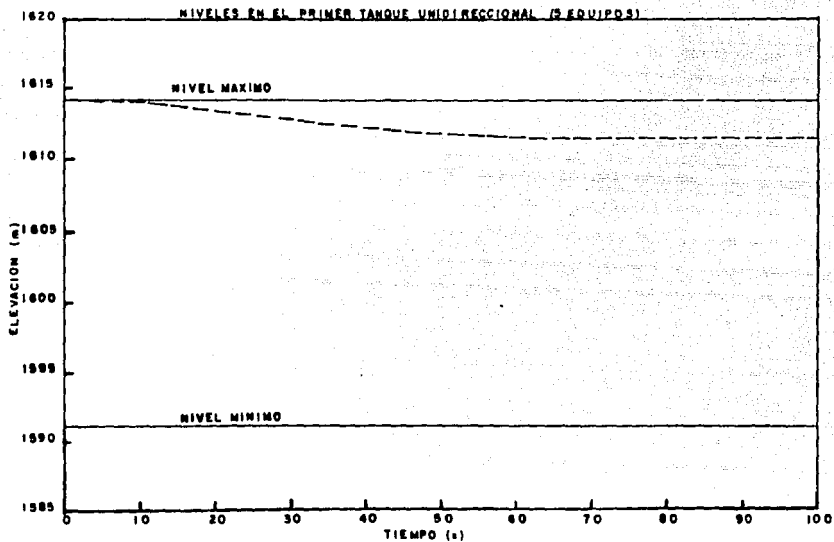


FIGURA .5.17 VARIACION DEL NIVEL EN EL TUI

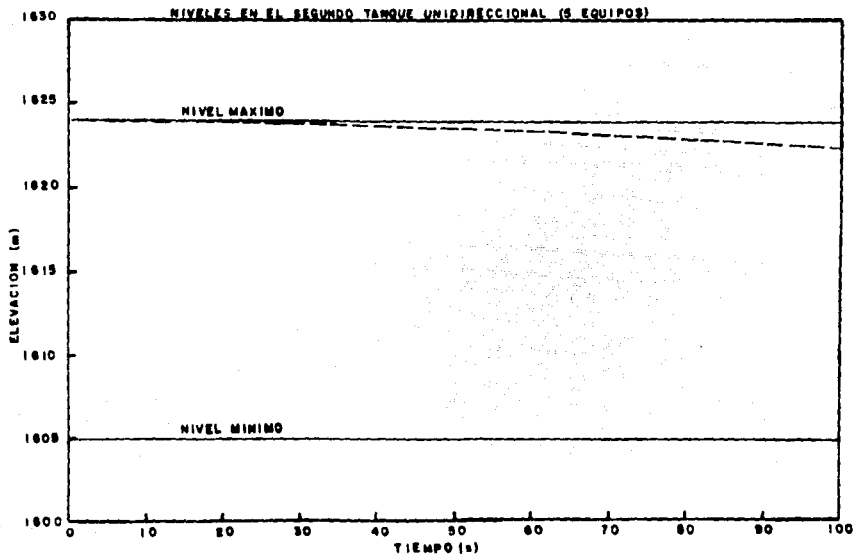


FIGURA.5.18 VARIACION DEL NIVEL EN EL TU2

6. CONCLUSIONES

A continuación se dan a conocer los aspectos más importantes en relación al análisis del funcionamiento hidráulico del acueducto Chapala-Guadalajara realizado en el presente trabajo.

6.1 Funcionamiento en flujo establecido

Del análisis del funcionamiento en flujo establecido desarrollado en el capítulo 5 y partiendo de la información vaciada en los capítulos 3 y 4 se puede concluir lo siguiente:

- a) El coeficiente de pérdida de carga de la tubería o conducción en la fórmula de Darcy-Weisbach, resultó ser de 0.0146 que corresponde a un flujo turbulento desarrollado, por lo que el factor encontrado resulta aplicable para todo el rango de operación del acueducto.
- b) A través de las mediciones realizadas se confirmó la información, con respecto a la pérdida de carga de la válvula de paso anular, que proporciona el fabricante.
- c) Del análisis de la operación en flujo establecido, se desprende que la potencia real consumida por los equipos de bombeo es superior a la ofrecida por el fabricante, puesto que se supera el valor nominal de 3,500 HP para el gasto de diseño ($Q = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$). Para lograr que la potencia consumida esté cerca de la de diseño, será necesario disminuir el gasto a un valor del orden de $1.293 \text{ m}^3/\text{s}$, esto se puede lograr si se sigue la política de operación consignada en la tabla 4.6 y analizada en la 4.7.
- d) De las mediciones realizadas en el acueducto cuando éste se encontraba funcionando con una sola de sus bombas, se puede apreciar que un tramo importante de la línea operaba a presión atmosférica, lo que implica que en dicho tramo se podrá presentar flujo a tubo parcialmente lleno. La operación a superficie libre no es recomendable, así que se tendrá que operar con más de un equipo.

6.2 Funcionamiento en flujo transitorio

Para llegar a las conclusiones que en esta sección se presentan, al igual que en la sección precedente, es necesario partir de los capítulos anteriores y hacer un análisis minucioso de ellos, así pues a continuación se presentan las conclusiones más importantes en cuanto a flujo transitorio:

- a) Partiendo de las mediciones realizadas durante el flujo transitorio provocado por el paro no programado de uno y dos de los equipos de bombeo, se observa que en ningún tramo se alcanzan presiones superiores a la resistencia de la tubería ni interiores a la

atmosférica, por lo que en caso de presentarse el fenómeno la tubería no sufriría daño alguno.

- b) La simulación del transitorio hidráulico provocado por el paro simultáneo de cinco equipos de bombeo, al igual que en el paro de dos equipos, no presenta problemas en cuanto a la presión ya que no se alcanza la resistencia de la tubería ni la presión atmosférica. Para que se mantengan éstas condiciones deberán operar por lo menos dos de las cámaras de aire.
- c) En la simulación numérica del fenómeno, se puede observar que los resultados en cuanto a la velocidad de rotación en reversa de las bombas no son tan precisos como los obtenidos para las presiones, esto se debe probablemente a la incertidumbre en el conocimiento de las curvas de cuatro cuadrantes y los momentos de inercia de los grupos motor-bomba.
- d) El tiempo de cierre de la válvula de descarga que se midió fue de 16.1 segundos, y por lo comentado en los puntos anteriores no tendrá que ser cambiado.

BIBLIOGRAFIA

1. Chaudry, M.H., "Applied Hydraulic Transients", Van Nostrand Reinhold, 1979.
2. Sotelo, G., "Hidráulica General", LIMUSA, México, 1974.
3. Mancebo, U., "Teoría del Golpe de Ariete", LIMUSA, México, 1987.
4. Parmakian, A., "Waterhammer Analysis", Dover, 1963.
5. Berrones, R., "Acueducto Chapala Guadalajara", Ingeniería Hidráulica en México, abril de 1987.

6. Guarga R., Sánchez J., Carmona R., Aguilar L., "Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión", Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaborado para la SARH, México, 1985.
7. Sánchez A., Carmona R., "Estudio del Funcionamiento Hidráulico y Puesta en Operación del Acueducto Chapala-Guadajajara". Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaborado para la CNA, México, 1991.

REFERENCIAS

1. Guarga R., Sánchez J., Aguilar L., Carmona R., Solorio A., Carmona L., "Acueducto Chapala-Guadajajara Diseño Hidráulico", Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaborado para la SARH, 1984.
2. KSB Mexicana S.A., "Información Técnica Sobre la Válvula de Regulación de Emboto a Paso Anular para el Acueducto Chapala-Guadajajara".
3. Guarga R., Sánchez J., Carmona R., Aguilar L., "Diseño y Operación de Conductos de Agua a Presión", Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, 1985.

ANEXO

PARO DE DOS EQUIPOS DE BOMBEO

NUMERO DE TUBOS: 5
 NUMERO DE DIV EN EL ULTIMO TUBO: 91
 IMPRESION CADA: 1 DT
 GASTO EN OPERACION: 2.752 m³/s
 TIEMPO DE SIMULACION: 100.000 s
 SINGULARIDAD INICIAL: -2
 POSICION DEL TANQUE DE SUCCION: 0.000 m
 NIVEL DE SUCCION: 1519.200 m

NUMERO DE BOMBAS EN PARALELO: 2
 NUMERO DE VALVULAS QUE NO CIERRAN: 0

VALVULAS ESFERICAS EN LA DESCARGA
 CVO = .1950 TO = 16.0800 SEG TOAN = .0000 GRADOS

COEFICIENTE PARA EL AJUSTE DEL CIERRE DE LA VALVULA ESFERICA

C0 = 4.11023
 C1 = - 19.81791
 C2 = 54.41927
 C3 = - 82.70280
 C4 = 61.72531
 C5 = - 17.73327

NUMERO DE PUNTOS EN LA CURVA CARACTERISTICA = 55
 INTERVALO ANG. PARA ALMAC. DE LA CURVA CARAC. = 5
 GASTO DE REFERENCIA = 1.5000 m³/s
 PRESION DE REFERENCIA = 134.2100 m
 VELOCIDAD DE REFERENCIA = 715.0000 rpm
 EFICIENCIA DE LA BOMBA = .7474
 MOMENTO DE INERCIA = 662.5000 kg-m²

PRESION CARACTERISTICA

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| .400 | .377 | .343 | .275 | .160 | .000 | .157 | .299 | .399 | .501 |
| .602 | .699 | .750 | .895 | .998 | 1.095 | 1.150 | 1.184 | 1.197 | 1.200 |
| 1.190 | 1.175 | 1.150 | 1.120 | 1.088 | 1.060 | 1.025 | .992 | .945 | .908 |
| .875 | .848 | .819 | .768 | .755 | .723 | .690 | .656 | .619 | .583 |
| .555 | .531 | .510 | .502 | .500 | .505 | .520 | .539 | .565 | .593 |
| .615 | .634 | .640 | .638 | .630 | | | | | |

MOMENTO CARACTERISTICO

| | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| .350 | .474 | .180 | .062 | .037 | .135 | .228 | .320 | .425 | .500 |
| .548 | .588 | .612 | .615 | .600 | .569 | .530 | .479 | .440 | .402 |
| .373 | .350 | .340 | .340 | .350 | .380 | .437 | .520 | .605 | .683 |
| .750 | .802 | .845 | .872 | .873 | .878 | .860 | .823 | .780 | .725 |

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| .660 | .580 | .490 | .397 | .310 | .230 | .155 | .065 | .018 | -.052 |
| -.123 | -.220 | -.343 | -.490 | -.680 | | | | | |

| # DE TUBO | LONGITUD (m) | DIAM (m) | VEL. DE ONDA (m/s) | FACTOR DE FRIC. | TIPO DE SING. |
|-----------|--|-------------|-----------------------|-----------------|---------------|
| 1 | 200.0 | 2.10 | 1000.0 | .014 | -11 |
| | TIEMP. DE CIERRE DE LA VALVULA: | | | | 100.0000 s |
| | COMIENZA A CERRARSE EN: | | | | 200.0000 s |
| | ESTA CERRADA: | | | | .0000 GRADOS |
| | COEFICIENTE PARA EL AJUSTE DE LA CURVA | | | | |
| | DE CIERRE DE LA VALVULA DE MARIPOSA: | | | | 5.810 |
| | | | | | .000 |
| | | | | | .000 |
| | | | | | .000 |
| | | | | | .000 |
| | | | | | .000 |
| | | | | | .000 |
| | | | | | .000 |

| | | | | | |
|--------------|-------|-----------|--------|-------------|-------------|
| 2 | 200.0 | 2.10 | 1000.0 | .0145 | -3 |
| K.SAL V.AIRE | AREA | H.AGUA | K.ENT. | LONG.CONEX. | DIAM.CONEX. |
| .500 30 9000 | 9.620 | 1542.0500 | 5.0000 | .0000 | 2.1000 |

| | | | | | | |
|-----------|-----------|---------|--------|------------|--------------|--------------|
| 3 | 3358.0 | 2.10 | 1000.0 | .0145 | 1 | |
| #RET. CGO | DESPLANTE | AREA | ALTURA | #LLEN. CFO | LONG.CONEX | DIAM. CONEX. |
| 4 | .1280 | 1591.00 | 113.04 | 19.17 2 | 32.50 70.000 | 2 1000 |

| | | | | | | |
|-----------|-----------|--------|--------|------------|--------------|--------------|
| 4 | 5178.0 | 2.10 | 1000.0 | .0145 | 1 | |
| #RET. CGO | DESPLANTE | AREA | ALTURA | #LLEN. CFO | LONG.CONEX. | DIAM. CONEX. |
| 4 | .1280 | 1605.0 | 254.34 | 4.02 2 | 32.50 80.000 | 2 1000 |

| | | | | | |
|---|---------|------|--------|-------|----|
| 5 | 18007.0 | 2.10 | 1000.0 | .0145 | -1 |
|---|---------|------|--------|-------|----|

INCREMENTO DE TIEMPO: 198 s

| # DEL TUBO | AJUSTE VEL. DE ONDA (m/s) |
|------------|------------------------------|
| 1 | 1010.7 |
| 2 | 1010.7 |
| 3 | 998.2 |
| 4 | 1006.4 |
| 5 | 1000.0 |

PRESIONES AL INICIO DE CADA TUBO:

1655.068000 1610.963000G 1610.9190000 1610.1730000
 1609.0220000

HSUC = 1519.200 m

HRES = 1605.022 m

| # DEL TUBO | PRESION MAX. m | PRESION MIN. m |
|------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 1655.0 | 1553.1 |
| 2 | 1641.9 | 1566.9 |
| 3 | 1641.2 | 1566.6 |
| 4 | 1611.4 | 1607.6 |
| 5 | 1609.7 | 1608.6 |

- PARO DE CINCO EQUIPOS DE BOMBEO

NUMERO DE TUBOS: 5
 NUMERO DE DIV EN EL ULTIMO TUBO: 87
 IMPRESION CADA: 1 DT
 GASTO EN OPERACION: 2.752 m³/s
 TIEMPO DE SIMULACION: 100.000 s
 SINGULARIDAD INICIAL: -2
 POSICION DEL TANQUE DE SUCCION: 0.000 m
 NIVEL DE SUCCION: 1519.200 m

NUMERO DE BOMBAS EN PARALELO: 5
 NUMERO DE VALVULAS QUE NO CIERRAN: 0

VALVULAS ESFERICAS EN LA DESCARGA
 CVO = .1950 TO = 16 0800 SEG TOAN = .0000 GRADOS

COEFICIENTE PARA EL AJUSTE DEL CIERRE DE LA VALVULA ESFERICA
 C0 = 4.11023
 C1 = - 19.81791
 C2 = 54.41927
 C3 = - 82.70280
 C4 = 61.72531
 C5 = - 17.73327

NUMERO DE PUNTOS EN LA CURVA CARACTERISTICA = 55
 INTERVALO ANG. PARA ALMAC. DE LA CURVA CARAC. = 5
 GASTO DE REFERENCIA = 1.5000 m³/s

ESTA TESTS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

PRESION DE REFERENCIA = 134.2100 m
 VELOCIDAD DE REFERENCIA = 715.0000 rpm
 EFICIENCIA DE LA BOMBA = .7474
 MOMENTO DE INERCIA = 662.5000 kg-m²

PRESION CARACTERISTICA

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| .400 | -.377 | -.343 | -.275 | -.160 | .000 | .157 | .299 | .399 | .501 |
| .602 | .699 | .790 | .895 | .998 | 1.095 | 1.150 | 1.184 | 1.197 | 1.200 |
| 1.190 | 1.175 | 1.150 | 1.120 | 1.088 | 1.060 | 1.025 | .992 | .945 | .908 |
| .875 | .848 | .819 | .788 | .755 | .723 | .690 | .656 | .619 | .583 |
| .555 | .531 | .510 | .502 | .500 | .505 | .520 | .539 | .565 | .593 |
| .615 | .634 | .640 | .638 | .630 | | | | | |

MOMENTO CARACTERISTICO

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| -.350 | -.474 | -.180 | -.062 | .037 | .135 | .228 | .320 | .425 | .500 |
| .548 | .588 | .612 | .615 | .600 | .569 | .530 | .479 | .440 | .402 |
| .373 | .350 | .340 | .340 | .350 | .380 | .437 | .520 | .605 | .683 |
| .750 | .802 | .845 | .872 | .873 | .878 | .860 | .823 | .780 | .725 |
| .660 | .580 | .490 | .397 | .310 | .230 | .155 | .085 | .018 | -.052 |
| -.123 | -.220 | -.343 | -.490 | -.680 | | | | | |

| # DE TUBO | LONGITUD (m) | DIAM (m) | VEL. DE ONDA (m/s) | FACTOR DE FRIC. | TIPO DE SING. |
|-----------|--------------|----------|--------------------|-----------------|---------------|
| 1 | 200.0 | 2.10 | 1000.0 | .014 | -11 |

TIEMP. DE CIERRE DE LA VALVULA: 100.0000 s
 COMIENZA A CERRARSE EN: 200.0000 s
 ESTA CERRADA: .0000 GRADOS
 COEFICIENTE PARA EL AJUSTE DE LA CURVA
 DE CIERRE DE LA VALVULA DE MARIPOSA: 5.810

| | | | | | | |
|-------|---------|-------|-----------|--------|-------------|--------------|
| 2 | 200.0 | 2.10 | 1000.0 | .0145 | -3 | |
| K.SAL | V.AIRE | AREA | H.AGUA | K.ENT. | LONG.CONEX. | DIAM. CONEX. |
| .500 | 30.9000 | 9.620 | 1542.0800 | 5.0000 | .0000 | 2.1000 |

| | | | | | | | | |
|-------|--------|-----------|--------|--------|------------|-------------|--------------|--------|
| 3 | 3158.0 | 2.10 | 1000.0 | .0145 | 1 | | | |
| #RET. | CGO | DESPLANTE | AREA | ALTURA | #LLEN. CFO | LONG.CONEX. | DIAM. CONEX. | |
| 4 | .1280 | 1591.00 | 113.04 | 19.17 | 2 | 32.50 | 70.000 | 2.1000 |

| | | | | | | |
|-----------|----------------|--------|------------|--------------|--------------|--------|
| 4 | 5178.0 | 2.10 | 1000.0 | | .0145 | 1 |
| #RET. CGO | DESPLANTE AREA | ALTURA | #LLEN. CFO | LONG. CONEX. | DIAM. CONEX. | |
| 4 | .1280 | 1605.0 | 254.34 | 4.02 | 2 | 32.50 |
| | | | | | | 80.000 |
| 5 | 17377.0 | 2.10 | 1000.0 | | .0145 | -1 |

INCREMENTO DE TIEMPO: .200 s

| # DEL TUBO | AJUSTE VEL. DE ONDA (m/s) |
|------------|---------------------------|
| 1 | 1001.3 |
| 2 | 1001.3 |
| 3 | 998.2 |
| 4 | 997.1 |
| 5 | 1000.0 |

PRESIONES AL INICIO DE CADA TUBO:

| | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1655.0080000 | 1610.9630000 | 1610.9190000 | 1610.2170000 |
| 1609.0670000 | | | |

HSUC = 1519.200 m

HRES = 1605.206 m

| # DE TUBO | PRESION MAX. m | PRESION MIN. m |
|-----------|----------------|----------------|
| 1 | 1655.0 | 1553.1 |
| 2 | 1641.0 | 1567.6 |
| 3 | 1640.4 | 1567.3 |
| 4 | 1612.3 | 1607.8 |
| 5 | 1609.8 | 1608.4 |