

01162
29.3.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

**ANALISIS TEORICO-EXPERIMENTAL DE LAS
PRESIONES CAUSADAS POR SEPARACION DE
COLUMNA LIQUIDA**

Alejandro Sánchez Huerta

TESIS

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

FACULTAD DE INGENIERIA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA
(H I D R A U L I C A)**

**CIUDAD UNIVERSITARIA
1987**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta 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.

RESUMEN

Uno de los principales problemas en el análisis del flujo transitorio en conductos de agua a presión, es el estudio de las presiones cuando se produce la separación de la columna líquida. Esto puede deberse a la vaporización del agua dentro de la tubería o al ingreso de aire en la misma. En cualquiera de los dos casos pueden generarse sobrepresiones que ponen en peligro la integridad del sistema.

En esta tesis se presenta un estudio de las presiones registradas en un circuito experimental, donde se produce un transitorio con separación de columna por la vaporización del agua. Se muestra el desarrollo de un modelo numérico que, acoplado al método de las características, permite reproducir los registros de presión transitoria obtenidos experimentalmente. Adicionalmente, se presentan los casos de dos sistemas de bombeo en los cuales, al producirse el paro de las bombas por corte de energía, se presenta la separación de columna como resultado del ingreso de aire a la conducción. Se comparan los registros calculado y medido obteniéndose buenos resultados, sobre todo en la predicción de la máxima sobrepresión.

INDICE

0. Notación	1
1. Introducción	4
2. Antecedentes	7
2.1 Consideraciones relativas a la separación de columna por la vaporización del agua.	8
2.2 Estudios experimentales de separación de columna	13
2.3 Modelos numéricos de separación de columna	15
2.4 Problema de entrada de aire a la tubería	17
3. Estudio experimental	20
3.1 Descripción de la instalación experimental y del equipo	

de medición utilizado	20
3.2 Experimentos realizados	27
3.2.1 Descripción general de las pruebas	27
3.2.2 Descripción de una prueba tipo	29
3.2.3 Envoltentes de piezométricas máximas y mínimas	33
3.3 Normalización de los resultados	37
3.4 Relaciones experimentales	38
3.4.1 Relación entre los parámetros J_m y $h^*_{m\acute{a}x}$	43
3.4.2 Relación entre los parámetros J y $h^*_{m\acute{a}x}$	46
3.4.3 Criterio de aplicación de la relación J vs $h^*_{m\acute{a}x}$	49
3.5 Comentarios	50
4. Modelo numérico	52
4.1 Ecuaciones del flujo no permanente en conductos a presión	52
4.2 Método de las características	53
4.2.1 Ecuaciones características	54
4.2.2 Condiciones de frontera	59
4.3 Modelo puntual de separación de columna	61
4.3.1 Descripción del proceso de separación de columna	62
4.3.2 Hipótesis del modelo	63
4.3.3 Desarrollo del modelo	64
4.4 Algoritmo para la simulación de los transitorios analizados experimentalmente	68
4.5 Comparación del modelo con los resultados	

experimentales	71
4.5.1 Influencia del parámetro K	71
4.5.2 Comparación de los registros obtenidos a lo largo de la tubería	76
4.5.3 Verificación numérica de la relación J vs $h^*_{máx}$	80
5. Separación de columna por la entrada de aire	83
5.1 Análisis del transitorio hidráulico en el acueducto Armería-Manzanillo	83
5.2 Análisis del transitorio hidráulico en el acueducto Usapanapa-La Cangrejera	91
5.3 Comparación de los registros de presión transitoria con el modelo numérico	96
6. Conclusiones	102
Referencias	106
Agradecimientos	110

0. NOTACION

- A** Área de sección transversal de la tubería (m^2) y diferencia de cargas entre el valor máximo de la sobrepresión y el valor mínimo alcanzado inmediatamente después de la llegada de la onda de depresión (m)
- B** diferencia entre la carga máxima de la sobrepresión calculada y el valor correspondiente a la presión de vaporización del agua (m)
- c** celeridad de las perturbaciones (m/s)
- Ca** constante del método de las características (m^2/s)
- Cn** parámetro en la ecuación de la característica negativa (m^3/s)
- Cp** parámetro en la ecuación de la característica positiva (m^3/s)
- D** diámetro interior de la tubería (m)
- E** módulo de elasticidad del material de la tubería (kg/m^2)
- Ea** módulo de compresibilidad volumétrica del agua (kg/m^2)
- f** factor de fricción en la fórmula de Darcy-Weisbach (adimensional)

- g aceleración debida a la gravedad (m/s^2)
- h carga piezométrica instantánea (m manométrica)
- ha carga piezométrica correspondiente a la presión atmosférica (m manométrica)
- ho carga piezométrica en el extremo de carga constante (m manométrica)
- hv carga piezométrica correspondiente a la vaporización del agua (m manométrica)
- Ha carga piezométrica correspondiente a la presión atmosférica (m absoluta)
- Ho carga piezométrica en el extremo de carga constante (m absoluta)
- J parámetro de severidad del transitorio (adimensional)
- Jm parámetro de Martin (adimensional)
- K parámetro del modelo puntual (adimensional)
- L longitud de la tubería (m)
- m masa de la burbuja (kg_m)
- p presión en la burbuja (kg/m^2)
- Q gasto instantáneo (m^3/s)
- Qo gasto a régimen establecido (m^3/s)
- R constante del gas ($kg\ m/kg_m\ ^\circ K$)
- Ri radio interior de la tubería (m)
- Ro radio exterior de la tubería (m)
- t tiempo (s)
- tc tiempo de cierre (s)
- T período de la tubería (s) y temperatura absoluta ($^\circ K$)
- Vo velocidad a régimen establecido (m/s)
- x coordenada que mide la distancia al origen de la tubería (m)

- γ peso específico del agua (Kg/m^3)
- λ factor de conversión en las ecuaciones características (s/m)
- ν viscosidad cinemática (m^2/s) y módulo de Poisson (adimensional)
- ρ densidad del agua ($\text{kg s}^2/\text{m}^4$)
- ψ parámetro en el cálculo de la celeridad (adimensional)
- Ψ volumen de la burbuja (m^3)

Subíndices

A, B y C puntos en el plano característico x-t

1. INTRODUCCION

El crecimiento de los grandes centros urbanos e industriales ha traído consigo el aumento de la demanda de agua, la cual normalmente debe ser transportada por medio de conductos a presión y en la mayoría de los casos bombeada para vencer grandes desniveles. Esto conduce a la necesidad de contar con sistemas de bombeo cada vez mayores, en donde los problemas técnicos asociados a ellos también son cada vez más importantes. Uno de los principales problemas que debe abordar el proyectista en la etapa de diseño, es el análisis de los sistemas cuando se produce el disparo esto es, la falla de los equipos de bombeo, lo que origina un transitorio hidráulico en la conducción.

Dependiendo del arreglo del equipo de bombeo y del perfil de la conducción, el descenso de presión producido por el transitorio hidráulico puede no tener ningún efecto grave en el sistema; sin

embargo, si el transitorio es muy severo es posible que se produzca el ingreso de aire a la conducción si existen válvulas de admisión de aire, o la vaporización del agua dentro de la tubería. En cualquiera de estos dos últimos casos se presenta la formación de una burbuja de gas (aire o vapor de agua) en el interior de la conducción que, en forma parcial o total, produce la separación de la columna líquida. La finalidad de esta tesis es la de contribuir al entendimiento del fenómeno de separación de columna lo que permitirá realizar análisis y diseños confiables de sistemas de bombeo que pueden estar expuestos a este fenómeno. Los estudios de separación de columna se aplican también a las tuberías de alta presión de sistemas hidroeléctricos, donde los transitorios se presentan por el rechazo o la demanda de carga.

La tesis inicia con la revisión de los antecedentes relacionados con el fenómeno de separación de columna por la vaporización del agua, tanto desde el punto de vista experimental como teórico. Además, se detalla el proceso de ingreso de aire a la conducción en un sistema de bombeo y se comentan los problemas que esto origina.

En el capítulo tres se presenta el estudio experimental realizado en la instalación de transitorios del Instituto de Ingeniería de la UNAM. El principal resultado de este estudio experimental es la obtención de una relación entre la máxima sobrepresión en flujo transitorio y un parámetro que permite clasificar el fenómeno. Dicha relación muestra que, por lo menos en el rango de experimentación, la máxima sobrepresión medida quedó comprendida entre una y dos veces el valor que predice la fórmula de Joukowsky.

El desarrollo de un modelo de cálculo numérico, apoyado en el método de las características, que permite reproducir el registro de presión transitoria en la instalación experimental es motivo del capítulo cuatro. Los resultados del modelo concuerdan bien con la mayor parte de las mediciones realizadas sobre todo en la predicción de la máxima sobrepresión.

En forma complementaria, en el capítulo cinco se realiza la comparación entre los resultados del modelo numérico y los registros de presión transitoria obtenidos en dos sistemas de bombeo donde se presenta el ingreso de aire a la conducción inmediatamente después de la falla de los equipos. Los resultados de esta comparación son muy buenos para la amplitud de las oscilaciones de presión y permiten generalizar la aplicación del modelo numérico a problemas de ingreso de aire a la conducción.

Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones relevantes y se hacen algunos comentarios adicionales sobre la tesis.

2. ANTECEDENTES

En la literatura técnica sobre transitorios hidráulicos existe una amplia gama de trabajos relacionados con los sistemas hidráulicos que trabajan con bajas cargas donde, adicionalmente, pueden producirse transitorios que generen caídas de presión [refs 1 a 15 y 22]. En estas condiciones, fenómenos como la entrada de aire a la línea de conducción o la vaporización del agua dentro de la misma pueden generar separación de la columna líquida. Debe advertirse que la condición más desfavorable para el sistema puede no ser la etapa de separación de columna, sino su posterior reintegración que puede generar severos incrementos de la presión, lo que a su vez puede provocar la falla de la tubería o de alguno de sus accesorios.

En este capítulo se comentan algunas de las consideraciones más relevantes relativas al fenómeno de separación de columna, se pretende

hacer una breve descripción de los estudios experimentales más importantes realizados en este campo y se muestra un resumen de los modelos numéricos de separación de columna que por su importancia destacan en la literatura. En la última sección de este capítulo se detallan algunos aspectos relacionados con el problema de la entrada de aire a la conducción.

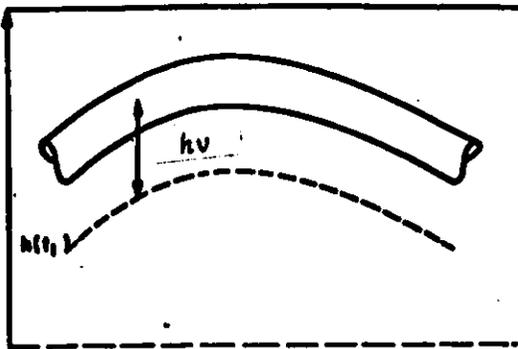
2.1 Consideraciones relativas a la separación de columna por la vaporización del agua

En una conducción a baja presión las condiciones del flujo transitorio pueden provocar que la presión descienda en algún punto de la conducción a tal grado que se alcance la presión de vaporización del agua a la temperatura ambiente. Por ejemplo, como puede verse en la referencia 19, a 20°C la presión absoluta de vaporización del agua es de 0.25 mca. En estas condiciones, se inicia el desarrollo de burbujas o cavidades de vapor de agua en el seno del flujo. El crecimiento de estas burbujas depende de la tensión superficial, la presión parcial del gas dentro de la burbuja y de las mismas condiciones del flujo transitorio, entre otros factores. A este fenómeno se le denomina en la literatura cavitación transitoria [ref 1,2 y 3]. Si la condición de baja presión persiste y dependiendo del perfil de la conducción, las burbujas de vapor pueden crecer y unirse unas a otras hasta formar una gran burbuja que divida parcial o totalmente al líquido originando la separación del mismo. Es en este momento en que se produce el fenómeno que se denomina separación de columna.

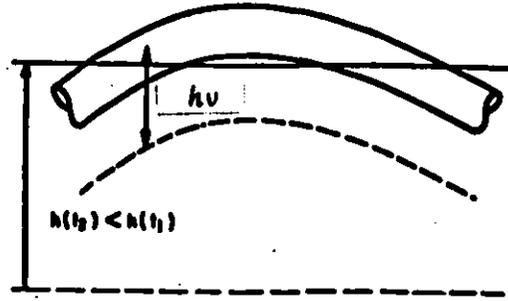
El viaje de las perturbaciones u ondas de presión transitoria continua en todo el conducto hasta alcanzar los extremos. La presencia de fronteras (como tanques de carga constante) hacen que las ondas sean reflejadas como ondas de sobrepresión y depresión que actúan sobre la burbuja de separación, originando su compresión y consecuentemente su colapso, fenómeno conocido como reintegración de la columna que a su vez produce incrementos muy severos de presión que pueden incluso producir la rotura de la tubería. En la figura 2.1 se muestra gráficamente el proceso antes descrito. Un estudio fotográfico desarrollado por Safwat [ref 4] ilustra ampliamente el caso del cierre rápido de una válvula ubicada en el extremo aguas arriba de una tubería.

El proceso de separación de columna descrito fue presentado como un problema local; sin embargo, puede ocurrir en varios puntos a lo largo de la conducción. Evidentemente, esto dependerá del esquema y geometría de la conducción, así como de las causas y severidad del flujo transitorio. Es entonces interesante discutir algunos casos en los cuales se puede producir la separación de columna.

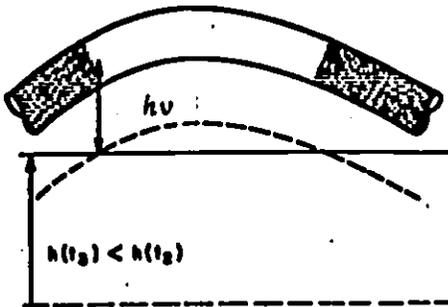
a) Sistema de bombeo. En un sistema de bombeo como el mostrado en la figura 2.2.a puede producirse el disparo o falla del equipo de bombeo, generándose una onda de presión negativa que viaja en dirección aguas abajo. Si la carga de bombeo es baja y su momento de inercia es pequeño, es posible que en ciertas zonas del perfil de la conducción se alcance la presión de vaporización del agua y se produzca la separación de columna.



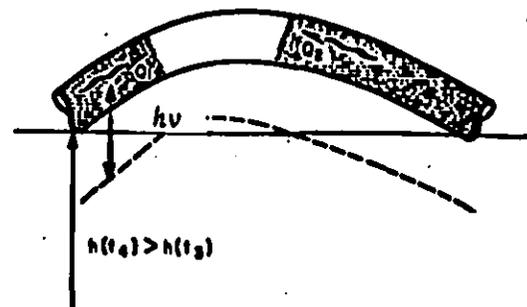
(a) $t=t_1$, la presión comienza a descender



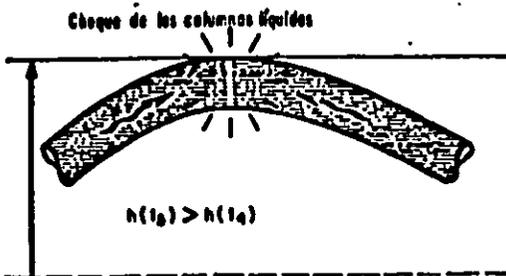
(b) $t=t_2$, la presión sigue descendiendo



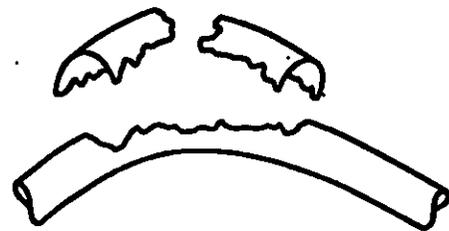
(c) $t=t_3$, se forma la burbuja de vapor



(d) $t=t_4$, crece la presión se reduce la burbuja

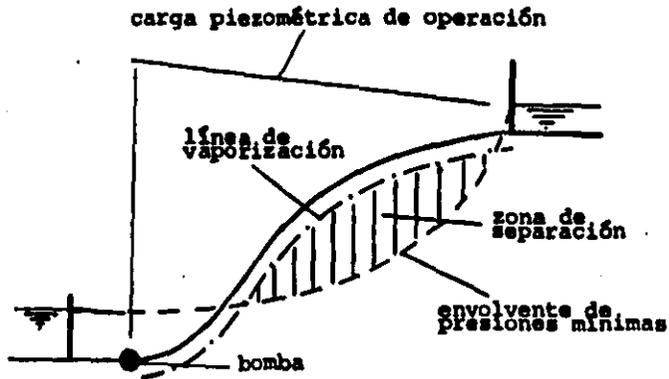


(e) $t=t_5$, la burbuja desaparece

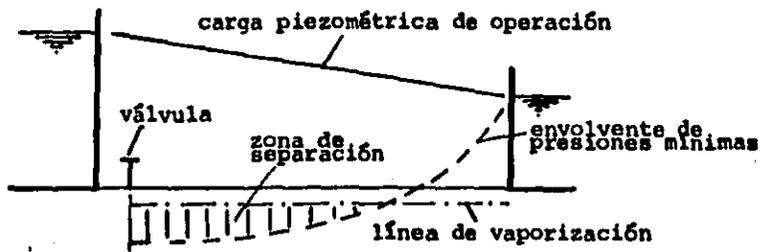


(f) $t=t_6$, retora de la tubería por sobrepresión

FIGURA 2.1 Proceso de separación y reintegración de la columna [ref 19]



a) Sistema de bombeo



b) Sistema con válvula aguas arriba



c) Sistema con válvula aguas abajo

FIGURA 2.2 Sistemas donde es posible que se presente separación de columna

b) Sistemas a gravedad con válvula de seccionamiento en el extremo aguas arriba. En este caso el fenómeno es semejante al anterior, solo que la onda de depresión es generada por el cierre rápido de la válvula. Si la presión en el extremo aguas arriba no es muy grande y la depresión causada por el cierre de la válvula es muy fuerte, será inmediatamente aguas abajo de la válvula donde, en forma casi instantánea, se alcanzará la presión de vaporización del agua y consecuentemente la separación de columna (fig 2.2.b).

c) Sistemas a gravedad con válvula de seccionamiento en el extremo aguas abajo. A diferencia de los dos casos anteriores, el cierre rápido de la válvula aguas abajo produce una onda de sobrepresión (golpe de ariete). Esta onda viaja hacia aguas arriba del sistema alcanzando al tanque de carga constante y reflejándose como onda de depresión restableciendo, aproximadamente, la presión original. Cuando esta onda alcanza la válvula, que ya se encuentra cerrada, se genera una nueva depresión cuya magnitud puede ser tal que origine la separación de columna (fig 2.2.c).

Los casos anteriores cubren toda la gama posible de sistemas en los cuales puede producirse el fenómeno de separación de columna, ya que en general es posible reducir cualquier otro caso a alguno de estos tres. En el trabajo de Brown [ref 5] se muestran los resultados de las mediciones realizadas en dos sistemas de bombeo donde se presenta el fenómeno descrito en el inciso a). Vreugdenhil [ref 6] presenta mediciones del flujo transitorio en un sistema de este tipo. Los

sistemas tipos b y c han sido más bien estudiados experimentalmente [cap 3 y refs 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13]. En la siguiente sección se comentan los resultados de los estudios experimentales más relevantes.

2.2 Estudios experimentales de separación de columna

Como se comentó al final de la sección anterior, la gran mayoría de los estudios experimentales sobre separación de columna se han desarrollado en sistemas simples tomados con una tubería de diámetro constante limitada en sus extremos por tanques de carga constante. Estas instalaciones difieren en la ubicación de la válvula que permite el seccionamiento rápido de la tubería. La mayoría de los estudios experimentales utilizan agua como fluido de trabajo, excepto en el caso de Driels [ref 11] quien trabaja con queroseno. Dentro de los estudios experimentales donde se realiza el cierre de la válvula ubicada en el extremo aguas arriba (sistemas tipo b), destacan los trabajos de Safwat [ref 4 y 10] y de Wiggert y Sundquist [ref 2]. En el trabajo de Safwat se muestra con detalle el proceso de separación de columna al producirse el cierre de la válvula gracias a un cuidadoso estudio fotográfico en el extremo aguas abajo de la misma, punto donde también registra la presión transitoria [ref 4]. De este trabajo interesa destacar que la burbuja de separación no se conforma totalmente en el momento de producirse el cierre de la válvula, que tarda 1.2 segundos, sino que el desarrollo de la burbuja se observa mejor en el ciclo posterior, cuando por segunda ocasión se produce la separación de columna. En su trabajo Wiggert y Sundquist muestran

también el registro de presión transitoria aguas abajo de la válvula de seccionamiento y observan la influencia que tiene la cantidad de gas disuelto en el agua. Para lo anterior, realizaron varias pruebas para la misma velocidad y cargas en flujo establecido, variando el contenido de gas (dióxido de carbono) disuelto en el agua.

El estudio experimental de Wiggert y Sundquist se complementa con maniobras de cierre en el extremo aguas abajo (sistema tipo c), donde observan que la influencia del gas disuelto es menor que en el caso del sistema tipo b. Otros trabajos con sistemas de este tipo son los estudios experimentales de Baltzer [ref 7], Kalkwijk y Kranenburg [ref 9], Weyler et al [ref 8] y Martín [ref 12]. En todos estos trabajos, excepto en el caso de Martín, las condiciones de presión y velocidad en flujo establecido fueron tales que produjeron transitorios con separación de columna en condiciones muy severas (ver sección 3.4.2). Bajo estas circunstancias, en ningún caso se observan presiones que excedan la sobrepresión originada en el instante en que cierra la válvula (primer golpe) que puede ser calculada con la ecuación de Joukowsky. En este sentido destaca el trabajo de Martín, ya que en él se puede ver que la máxima presión transitoria puede alcanzarse en el siguiente ciclo de sobrepresión (segundo golpe) y exceder el valor que predice Joukowsky. Curiosamente esto sucede para condiciones de presión y gasto que no son las más severas, es decir existe, una condición intermedia que produce una amplitud máxima de la presión transitoria mayor que el valor calculado con la ecuación de Joukowsky. Cabe aclarar que aunque Martín utiliza agua cuyo contenido de gas es limitado, la misma situación se presenta al utilizar agua sin

desgasificar (sección 3.4.2).

En el capítulo 3, se realiza un estudio en un sistema tipo c utilizando agua cuyo contenido de gas no es controlado y que pretende analizar experimentalmente la influencia de las condiciones del flujo establecido en el valor de la máxima presión transitoria.

2.3 Modelos numéricos de separación de columna

En la literatura existen numerosos trabajos dedicados a la modelación numérica del fenómeno de separación de columna. Muchos de estos trabajos son aplicaciones particulares a resultados experimentales y aunque casi todos llegan a predecir buenos resultados, son en su mayoría muy complejos de calibrar y, sobre todo, su aplicación a sistemas reales es muy difícil de realizar. En lo que sigue se hará una breve descripción de los trabajos más relevantes, los cuales se apoyan en el método de las características (sección 4.2).

Streeter y Wylie [ref 14] y Safwat y Van Den Polder [ref 10] consideran que la separación de columna ocupa toda la sección transversal del tubo en el momento en que la presión alcanza el valor de la presión de vapor. En ese instante inicia el desarrollo de una burbuja cuyo volumen es calculado con la ecuación de continuidad, usando las velocidades a cada lado de la burbuja. Cuando el volumen de la burbuja se hace cero, se restablece la continuidad de la columna líquida y se aplica el método de las características, como en el resto del sistema. Brown [ref 5] agrega a este modelo la ecuación

de estado del gas ideal para un proceso politrópico, entre isotérmico y adiabático, considerando arbitrariamente un volumen inicial del gas en los puntos donde supone se alcanza la condición de separación de columna. Baltzer [ref 7] considera la formación de una cavidad delgada en la parte superior de la tubería y analiza el flujo por debajo de esta burbuja con las ecuaciones del flujo no permanente a superficie libre. Weyler et al [ref 8] contribuyen a estos modelos con el desarrollo de una fórmula semiempírica que permite adicionar al término de pérdida de carga por fricción la debida al esfuerzo cortante generado por la región que contiene a la burbuja.

Otra contribución importante es el trabajo de Kranenburg [ref 3], quién presenta un modelo matemático que analiza el transitorio con separación de columna considerando tres regiones, denominadas; región de golpe de ariete normal, región de cavitación transitoria y franca separación de columna. En su trabajo, Kranenburg deriva las ecuaciones para cada caso y muestra un esquema de diferencias finitas para su solución. Entre las contribuciones más recientes destaca el trabajo de Safwat [ref 15] que muestra una metodología de cálculo que generaliza el método de las características al análisis de transitorios hidráulicos que involucren secciones vacías en el interior de una tubería; es decir, el modelo de Safwat permite analizar tanto problemas de separación de columna por la vaporización del agua como por la entrada de aire al sistema.

Finalmente, destaca el trabajo de Carmona et al [ref 13] en el cual se muestra un modelo numérico que considera a la separación de columna

como un fenómeno de frontera variable; el movimiento de la frontera es relacionado con el de la burbuja de separación a lo largo de la conducción y marca el límite de aplicación del método de las características. Este modelo es muy pesado en su parte computacional y de muy difícil calibración, lo que lo hace poco práctico. Sin embargo, este modelo puede simplificarse considerando que la separación de columna se concentra en un punto de la tubería, por ejemplo en el lado aguas arriba de una válvula para un sistema tipo c. Los detalles de este último modelo, su calibración y la comparación de sus resultados con mediciones experimentales serán motivo de análisis del capítulo 4.

2.4 Problema de entrada de aire a la tubería

El problema de entrada de aire a la tubería de conducción de un sistema de bombeo puede dar origen a la separación de columna en su extremo inicial. Para entender esto considérese el caso de un sistema de bombeo como el mostrado en la figura 2.3. Al desconectar la bomba se genera una onda de depresión que puede cortar el eje de la tubería como se muestra en la figura 2.3.a. Esta onda de depresión viaja hacia el tanque de carga constante y es reflejada como onda de sobrepresión, que al llegar al extremo aguas arriba encuentra una válvula de retención ya cerrada. Esto produce una sobrepresión que puede estimarse con la expresión de Joukowsky cQ_0/gA , donde c es la velocidad de propagación de la onda o celeridad, Q_0 es el gasto a régimen establecido, g es la aceleración debida a la gravedad y A es el área de la sección transversal de la tubería.

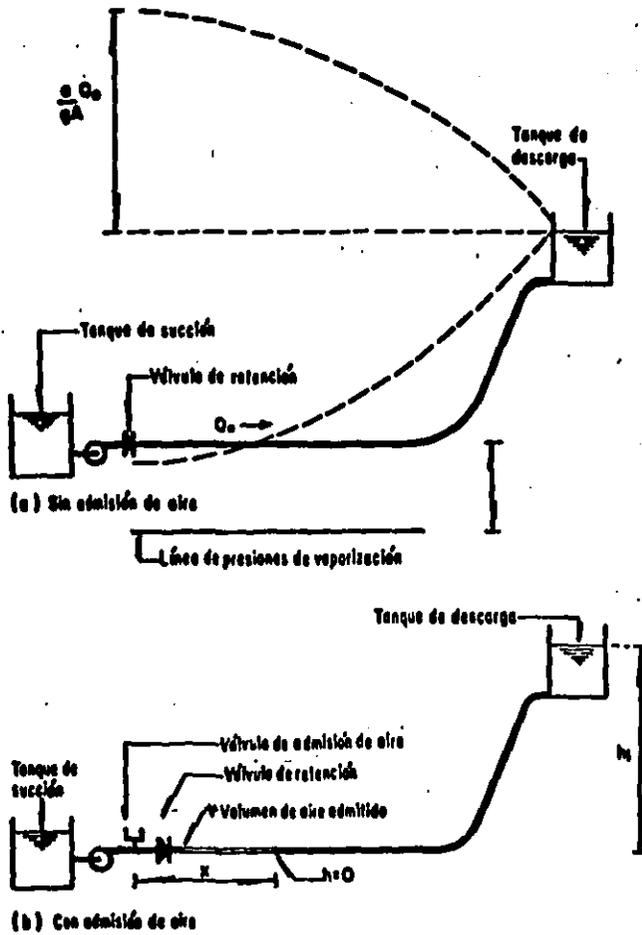


FIGURA 2.3 Sistema de bombeo
[ref 20]

Con el fin de evitar que en la descarga de la bomba se alcance la presión de vaporización del agua, en las todas las instalaciones de bombeo se acostumbra colocar una válvula de admisión de aire como se muestra en la figura 2.3.b. Dicha válvula, permite el ingreso de aire a la tubería al presentarse presiones interiores menores que la atmosférica. Parte del aire que ingresa a la tubería atraviesa la válvula de retención y puede suponerse que se mantiene como una masa concentrada en el extremo aguas arriba sin distribuirse a lo largo de la tubería. Al regresar una onda de sobrepresión la válvula de retención se cierra y el aire que queda atrapado es comprimido.

Como puede observarse, el fenómeno anterior es un fenómeno de separación de columna producido por la entrada de aire. En la práctica se han encontrado sistemas de bombeo donde, al producirse este fenómeno, se registraron sobrepresiones cuyo valor excede el que predice la fórmula de Joukowsky . En el capítulo 5 se muestran dos de estos casos; el acueducto Armería-Manzanillo [ref 16] y el acueducto Uspanapa-La Cangrejera [ref 17], en los cuales ha sido posible verificar el modelo numérico propuesto en el presente trabajo.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El presente capítulo tiene la finalidad de mostrar los experimentos realizados en la instalación experimental de fenómenos transitorios del Instituto de Ingeniería; se incluye la descripción de esa instalación y del equipo de medición. Se resumen los registros de presión transitoria en condiciones de separación de columna debida a la vaporización del agua, así como la presentación de dichos registros en forma normalizada, lo que permite hacer la comparación directa de diferentes pruebas. Finalmente, se presenta una relación experimental para la sobrepresión máxima registrada en cada caso y un criterio que permite utilizar estos resultados en otras instalaciones.

3.1 Descripción de la instalación experimental y del equipo de medición utilizado

El Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta con una instalación experimental para el estudio de transitorios hidráulicos ubicada en el Laboratorio de Hidromecánica. En esta instalación se han estudiado fenómenos transitorios como el golpe de aríete producido por el cierre de una válvula, la entrada de aire a una tubería por bajas presiones y la separación de columna líquida por la vaporización del agua. Además se han podido realizar estudios sobre el funcionamiento de dispositivos de control de transitorios como son la cámara de aire, el tanque unidireccional y la válvula de alivio.

Esta instalación esta formada por una tubería de fierro galvanizado de 0.105 m de diámetro interior con una longitud total de 1 468.62 m (fig 3.1). La instalación forma un circuito cerrado que toma el agua de un depósito de succión-descarga, de donde el agua es succionada por una bomba centrífuga de 50 HP. (fig 3.2). La instalación cuenta con dos tanques cilíndricos de lámina de acero, de 0.896 m de diámetro, estos tanques pueden admitir aire comprimido en su parte superior con lo que es posible fijar la presión en valores constantes en cada extremo de la tubería. En el extremo aguas abajo de la tubería, antes del segundo tanque de carga constante, se cuenta con una válvula de mariposa cuyo cierre, que es controlado mediante un pistón, permite el seccionamiento rápido de la tubería (fig 3.3). Como puede observarse en la figura 3.1 la instalación forma un sistema simple tanque de carga constante-tubería-válvula-tanque de carga constante. Una vez que el agua ha recorrido toda la instalación es descargada al depósito de succión-descarga para iniciar nuevamente su recorrido.

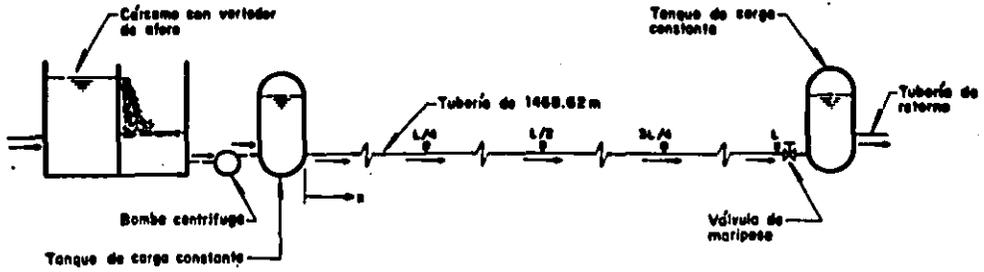


FIGURA 3.1 Esquema de la instalación de transitorios



FIGURA 3.2 Bomba centrífuga y tanque aguas arriba

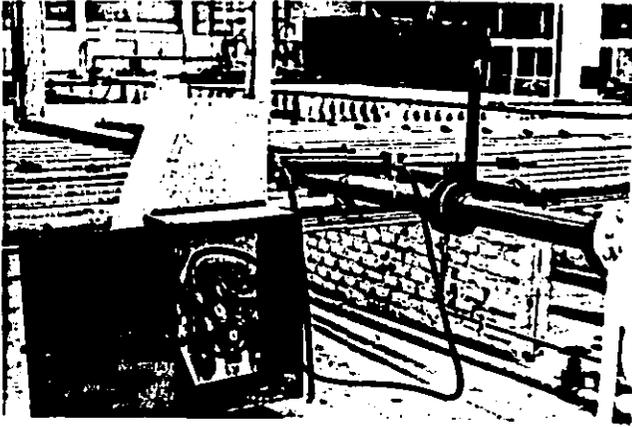


FIGURA 3.3 Válvula de mariposa controlada mediante pistón

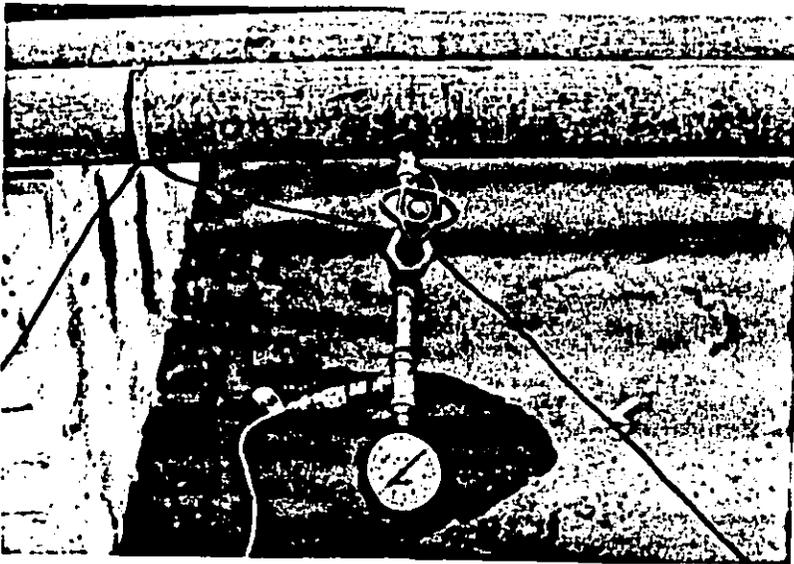


FIGURA 3.4 Toma para transductor de presión y manómetro de Bourdon

Para la realización de cada prueba se requiere controlar y medir la velocidad (V_o) y la carga piezométrica (h_o) en el tanque aguas arriba en flujo establecido. Para la medición del gasto se usa un vertedor de aforo de sección triangular ubicado en la división del depósito de succión-descarga. El vertedor fue calibrado con un aforo volumétrico. En cuanto a la medición de la presión en el extremo aguas arriba, se utiliza un manómetro de Bourdon previamente calibrado en el rango de 0 a 20 kg/cm².

También, en cada prueba se midió la temperatura y la presión atmosférica con un termómetro y en un barómetro, respectivamente, con la finalidad de obtener la presión de vaporización del agua en cada caso.

Para la medición de las presiones transitorias, se instalan a lo largo de la tubería cuatro conexiones ubicadas en $x/L = 1/4, 1/2, 3/4$ y 1, siendo L la longitud total de la tubería y x la coordenada que mide la distancia de cada punto de la tubería al inicio de la misma. En dichas conexiones, se colocan transductores electrónicos de presión (fig 3.4) marca Gould-Statham modelo PA822-200, con un rango de 0 a 140 200 kg/m², temperatura de trabajo de -54 a 121 °C y con una respuesta en frecuencia de 11 KHz.

La señal registrada por cada transductor se amplifica con un equipo de acondicionadores de señal diseñados y construidos en el propio Instituto [ref 18]. La alimentación de los acondicionadores de señal se realiza con corriente directa con el fin de evitar el uso de filtros

para suprimir la frecuencia de 60 Hz inducida por la red eléctrica, ya que dichos filtros generan sobrepasos no deseados.

Una vez que la señal de cada transductor ha sido amplificada, se realiza la adquisición de los datos o puntos pertenecientes a cada señal con un período de muestreo constante y durante un intervalo de tiempo suficiente para observar el transitorio. Este proceso se realiza mediante dos microcomputadoras. Se cuenta con una tarjeta de conversión analógica-digital instalada en una microcomputadora Apple. La conversión consiste en asignar una representación numérica a la señal de salida en voltaje de los acondicionadores; la relación entre esta señal (muestra) y la representación numérica se puede observar en la figura 3.5.

De la figura se observa que la representación numérica varía entre 0 y 255, ya que el convertidor con que se trabaja es de 8 bits (2^8 números), y que el voltaje de la señal de entrada solo puede variar entre -5 y 5 volts.

Con un programa se controla el tiempo durante el cual se realiza la adquisición de muestras provenientes de hasta 5 transductores (o canales); la frecuencia de muestreo asignada es de 75 Hz, suficiente ya que, como se verá posteriormente, los fenómenos a medir contienen frecuencias mucho menores a ésta.

Después de que la señal es muestreada, esto es que se tiene su representación numérica, la información es transmitida (comunicación en

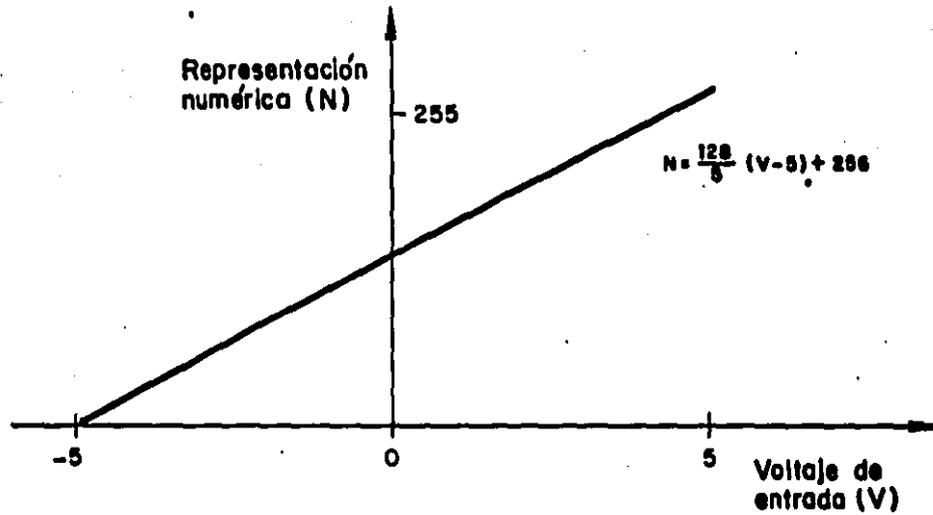


FIGURA 3.5 Relación entre la representación numérica y el voltaje de muestreo

serie) a una computadora tipo personal para su procesamiento. En esta segunda microcomputadora, se almacenan los datos en disco, creándose un archivo para la representación numérica al cual se le aplica un programa que convierte los números a su equivalente en metros de columna de agua (mca). Para esta última conversión se requiere conocer la calibración de cada equipo de medición (transductor - acondicionador), es decir la relación mca/volt y el voltaje de referencia correspondiente a la presión atmosférica. Así se obtiene finalmente el archivo de datos en mca de las cargas piezométricas instantáneas registradas durante el experimento y cuyo tiempo de observación es siempre de 20 segundos.

Con los datos de los experimentos grabados en la microcomputadora tipo personal, se procede a presentar gráficamente los registros de presión en el tiempo mediante un graficador.

3.2 Experimentos realizados

Es oportuno recordar que la finalidad de estas pruebas fue producir la separación de columna líquida por la vaporización del agua en la instalación experimental, dichos experimentos fueron realizados en forma similar a las experiencias de Martín [ref. 12].

3.2.1 Descripción general de las pruebas

En la realización de las pruebas se organizaron en grupos tales que produjeran el mismo valor para la siguiente relación propuesta por

Martin:

$$J_m = \frac{cV_o}{gH_o} \quad (3.1)$$

donde H_o es la carga de presión absoluta en $x = 0$, V_o es la velocidad media, c es la velocidad de propagación de las ondas o celeridad y g es la aceleración debida a la gravedad. Al número J_m se le denomina aquí parámetro de Martin y es un indicador de la severidad del transitorio en cuanto a la separación de columna. El valor límite para que se produzca separación de columna en una instalación sin fricción sería $J_m = 1$; sin embargo, para una instalación real dicho valor es mayor. Martin encontró que trabajando con agua cuyo contenido de gases disueltos era limitado y controlado, el valor límite de J_m es de 1.27.

En la instalación se realizaron 12 pruebas para diferentes condiciones de presión y gasto (o velocidad).

El procedimiento general para realizarlas fue el siguiente; se hace circular el gasto deseado controlando las válvulas de descarga de la bomba y de entrada al depósito de succión-descarga, midiéndose el gasto con el vertedor de aforo. Al mismo tiempo, se fija la presión en el extremo aguas arriba midiendo su valor con el manómetro instalado en el inicio de la tubería. Cuando se establecen las condiciones de la prueba, se procede a iniciar el muestreo al tiempo que se realiza el cierre de la válvula de mariposa ubicada en el extremo aguas abajo. Dicho cierre se realiza con la máxima rapidez posible ($t_c = 0.3$

segundos), este tiempo se mide registrando el movimiento de la válvula por medio de un medidor de desplazamiento angular (fig 3.3).

En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las pruebas realizadas y las condiciones correspondientes a régimen establecido, es decir V_o y H_o , donde por definición $H_o = h_o + H_a$, siendo H_a el valor absoluto de la presión atmosférica en mca, además se incluyen los valores de J_m correspondientes. Como puede observarse, las pruebas se eligieron de tal suerte que para tres diferentes combinaciones de V_o y H_o se obtuvieran cuatro valores diferentes de J_m . En todas las pruebas la lectura en el barómetro fue de 587 mm de mercurio, lo que equivale a $H_a = 8$ mca.

3.2.2 Descripción de una prueba tipo

A continuación y a manera de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos en la prueba 5, para $V_o = 0.576$ m/s y $H_o = 57$ mca absolutos ($h_o = 49$ mca manométricos), la cual se considera representativa del conjunto de pruebas realizadas.

En la figura 3.6 se muestran los resultados obtenidos; las figuras a), b), c) y d) corresponden a los registros en $x/L = 1, 3/4, 1/2$ y $1/4$ respectivamente. Las cargas están referidas a la presión atmosférica (unidades manométricas). Hay que notar que dado que la tubería es horizontal, el eje de la misma es considerado como el plano horizontal de referencia, de modo que siempre que la carga piezométrica tome valores negativos indica que la presión interior es menor que la

Prueba #	Vo (m/s)	Ho (mca absolutos)	Ja
1	0.351	44	1.041
2	0.557	70	1.038
3	0.702	87.5	1.047
4	0.376	38	1.291
5	0.576	57	1.319
6	0.774	78	1.295
7	0.356	29	1.602
8	0.567	47	1.574
9	0.820	67	1.597
10	0.375	24	2.039
11	0.582	38	1.998
12	0.813	53.5	1.983

Tabla 3.1 Resumen de los resultados experimentales

Prueba #	x	hmáx (mca manométricos)				hmín (mca manométricos)			
		L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
2	62	128	130	132	132	2.3	1.0	2.1	-0.4
5	49	138	142	140	180	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8
8	39	111	112	109	156	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8
11	30	99	100	111	116	-7.8	-7.8	-7.8	-7.8

Tabla 3.2 Valores de las envolventes de presiones máximas y mínimas que corresponden a las pruebas 2,5,8 y 11.

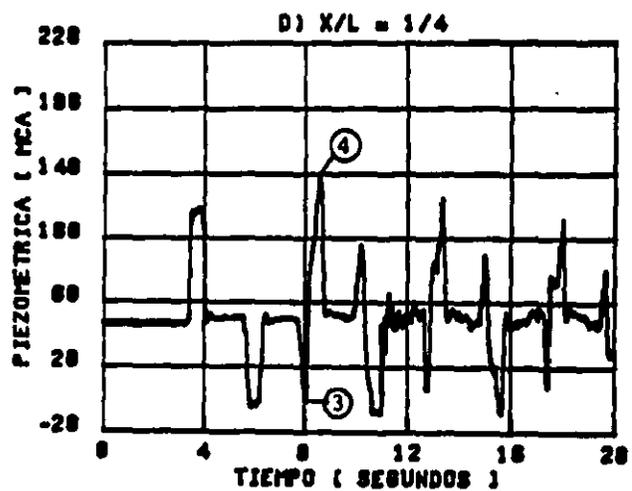
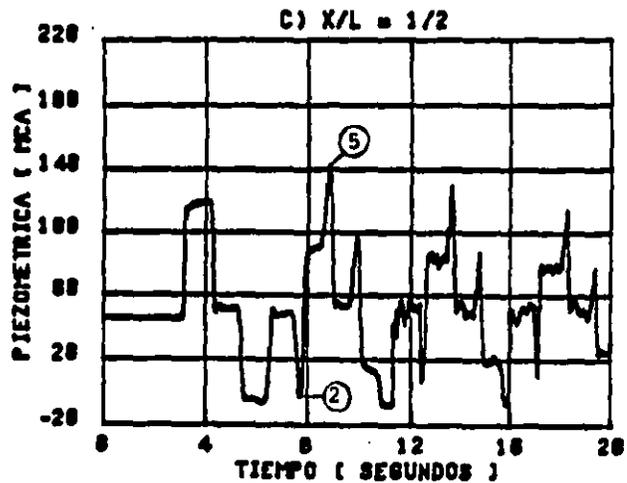
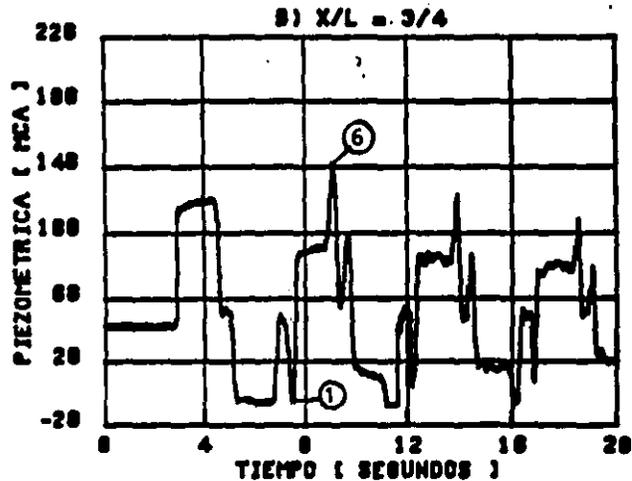
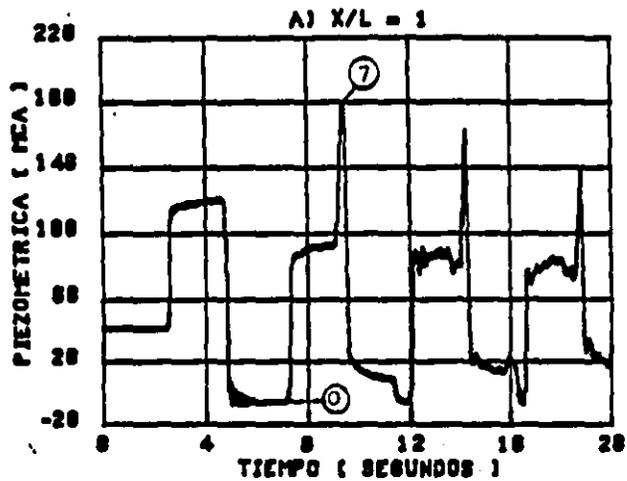


FIGURA 3.6 Prueba 5 , para $V_0 = 0.576$ m/s y $h_0 = 49$ mca

atmosférica.

En la figura 3.6.a se observa que la onda de sobrepresión generada en $x/L = 1$, emplea un tiempo $T = 2.3$ segundos en viajar hasta el tanque aguas arriba y regresar al extremo aguas abajo convertida en onda de depresión, dicho tiempo es el período de la tubería y por definición vale

$$T = \frac{2L}{c} \quad (3.2)$$

donde c es la celeridad de la tubería. Además, recordando que $L = 1468.62$ m resulta que $c = 1280$ m/s.

El valor de c medido puede ser comparado utilizando la expresión para su cálculo teórico [ref 1]

$$c = \sqrt{\frac{Ea}{\rho[1+(Ea/E)\Psi]}}$$

donde Ea es el módulo de compresibilidad volumétrica del agua, E es el módulo de elasticidad del material de la tubería, ρ es la densidad del fluido y Ψ es un parámetro que depende del espesor de la tubería y de las condiciones de anclaje de la misma. Para el caso de un conducto de pared gruesa y sin restricción para su movimiento longitudinal

$$\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \nu \right)$$

donde R_o y R_i son los radios exterior e interior de la tubería respectivamente y ν es el módulo de Poisson del material. En el caso de fierro galvanizado se tiene que $E = 1.27 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$ y $\nu = 0.25$, y para la tubería de la instalación $R_o = 0.059 \text{ m}$ y $R_i = 0.052 \text{ m}$. En el caso del agua a la temperatura de trabajo $E_a = 2.23 \times 10^8 \text{ kg/m}^2$ y $\rho = 101.8 \text{ kg s}^2/\text{m}^4$. Realizando los cálculos resulta $c = 1304 \text{ m/s}$, valor que excede en solo un 1.2% al valor medido.

Por otro lado, para todas las pruebas el cierre es rápido ya que

$$t_c = 0.3 \text{ s} < T = 2.3 \text{ s}$$

de tal suerte que el valor de la sobrepresión generada al cierre de la válvula según la fórmula de Joukowski vale

$$\Delta h = \frac{cV_o}{g} \quad (3.3)$$

para la prueba en cuestión resulta que $\Delta h = 75.15 \text{ mca}$.

En la figura 3.6.a se observa también que la carga piezométrica alcanzada luego del cierre de la válvula es de 116 mca valor semejante al que se obtiene de la suma $h_o + \Delta h$, que es 124.15 mca, siendo la

diferencia del orden del 7 % con respecto al valor medido.

Sin embargo, debe notarse que no es esta la máxima sobrepresión registrada; la máxima se produce en el segundo golpe, hasta aproximadamente 6.7 segundos de iniciado el cierre y alcanza un valor de 180 mca, es decir, un 53.6 % mayor que lo previsto con la fórmula de Joukowski.

Lo anterior puede explicarse de la siguiente forma: al cerrar la válvula se genera la onda de sobrepresión que viaja hacia el extremo aguas arriba (tanque de carga constante) reflejándose como onda de depresión. Cuando ésta regresa a la válvula, la encuentra ya cerrada y es nuevamente reflejada como onda de depresión, es decir, el efecto de depresión se duplica y, como puede verse en la figura 3.6.a , se alcanza la presión de vaporización del agua (ver sección 3.2.3). Esta depresión viaja nuevamente hacia aguas arriba para ser ahora reflejada como onda de sobrepresión. Cuando esta segunda onda regresa nuevamente a la válvula, encuentra una condición de frontera muy peculiar; por un lado, se encuentra con la burbuja de vapor de agua que se generó por ser alcanzada la presión de vaporización del agua y, por otro, con la válvula cerrada (punto 0 en la figura 3.6). El resultado de esta condición de frontera es el reflejo de dos ondas, una de depresión y otra, que le sigue, de sobrepresión. El viaje de estas dos ondas puede verse en las figuras 3.6 marcadas por los puntos 1,2 y 3. Este par de ondas alcanzan el extremo aguas arriba y son reflejadas con signo opuesto hacia la válvula (ver secuencia de puntos 4, 5, 6 y 7). De la explicación anterior se desprende que la máxima sobrepresión que se

produce en el segundo golpe (denominada espiga) se debe a la superposición de ondas producidas por la burbuja y por la válvula cerrada.

3.2.3 Envolventes de piezométricas máximas y mínimas

Un aspecto importante en el estudio experimental es la determinación de las envolventes de presiones máximas y mínimas en cada prueba, es decir, para cada registro se obtuvo la presión máxima y la mínima alcanzadas durante el transitorio.

En la tabla 3.2 se presentan los resultados obtenidos para algunas pruebas que se consideran representativas del conjunto de 12, todas ellas para una velocidad próxima a 0.57 m/s.

En la figura 3.7 se muestran las envolventes correspondientes, donde pueden hacerse las siguientes observaciones:

- a) Para las pruebas donde se presentó separación de columna, la mínima presión alcanzada quedó fijada por el valor de la presión de vaporización del agua a la temperatura de trabajo. Como se comentó en la sección 3.2.1, para todas las pruebas, $H_a = 8$ mca absolutos. Por otro lado, la temperatura de trabajo fue en promedio de 20 °C, a la cual corresponde una presión absoluta de vaporización del agua de 0.25 mca [ref 19]. Por tanto, siendo la presión atmosférica en la Cd de México igual a 8 mca, la presión manométrica de vaporización del agua es $h_v = -7.75$ mca, valor que corresponde al

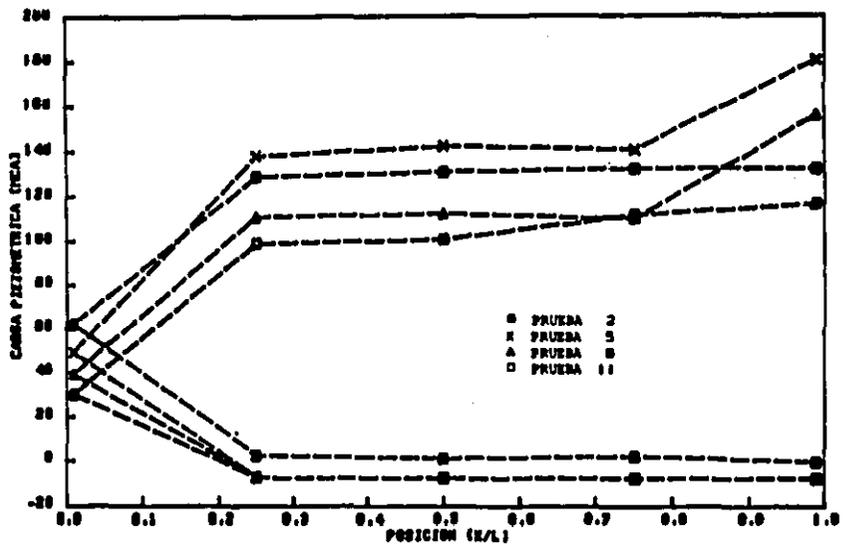


FIGURA 3.7 Envolventes de presiones máximas y mínimas

medido.

b) Para las envolventes de presiones máximas se observan comportamientos diferentes según los siguientes tipos:

I) La prueba 2 se caracteriza porque la envolvente de presiones máximas es una línea prácticamente horizontal. Comportamientos semejantes se observan en las pruebas 1 y 3.

II) Las pruebas 5 y 8 se caracterizan porque en $x/L = 1$ la envolvente sufre un ascenso muy marcado, dicho ascenso es mayor (proporcionalmente hablando), en la prueba 8 que en la prueba 5. Comportamientos de este tipo lo siguen las pruebas 4,6,7 y 9.

III) Finalmente la prueba 11 se caracteriza porque el quiebre, observado en las envolventes tipo II, se presenta ahora en $x/L = 1/2$, para volver a aumentar hacia $x/L = 1$. Un comportamiento de este tipo lo siguen las pruebas 10 y 12.

Estos resultados serán discutidos en la sección 3.4.2 y por ahora sólo basta observar que en cualquier caso la máxima sobrepresión se presenta en $x/L = 1$.

3.3 Normalización de los resultados

Con el fin de comparar en forma directa los registros obtenidos para diferentes pruebas, es necesario hacer una normalización de los mismos y esto se realiza utilizando la siguiente relación adimensional

$$h^* = \frac{h - h_0}{\Delta h} \quad (3.4)$$

donde h es la carga piezométrica instantánea registrada, en mca. Como puede observarse, h^* es una variable adimensional que se denomina presión normalizada; nótese que a régimen establecido corresponde un valor de $h^* = 0$ y para la sobrepresión inmediata después del cierre de la válvula se tiene un valor de $h^* = 1$.

En esta sección se muestran los registros normalizados con base en la relación 3.1 utilizando el registro en $x/L = 1$, ya que como se vió en la sección 3.2.3, es en este punto donde se obtienen las máximas sobrepresiones.

En la figura 3.8 aparecen los registros normalizados para las pruebas 1, 2 y 3, para las cuales $1.038 < J_m < 1.047$; asimismo, en la figura 3.9 están las pruebas 4, 5 y 6 para las cuales $1.291 < J_m < 1.319$; en la figura 3.10 se muestran las pruebas 7, 8 y 9 con $1.547 < J_m < 1.602$ y finalmente en la figura 3.11 se presentan las pruebas 10, 11 y 12 para las cuales $1.983 < J_m < 2.039$. Es importante notar que las pruebas con valores de J_m semejantes presentan similitud en cuanto a la máxima sobrepresión registrada, sin embargo, existen diferencias en cuanto a los tiempos de duración de la separación de columna.

3.4 Relaciones experimentales

La finalidad de esta sección es obtener una relación entre la máxima sobrepresión alcanzada en las pruebas de laboratorio y algún parámetro que tome en cuenta la severidad del transitorio en relación con la

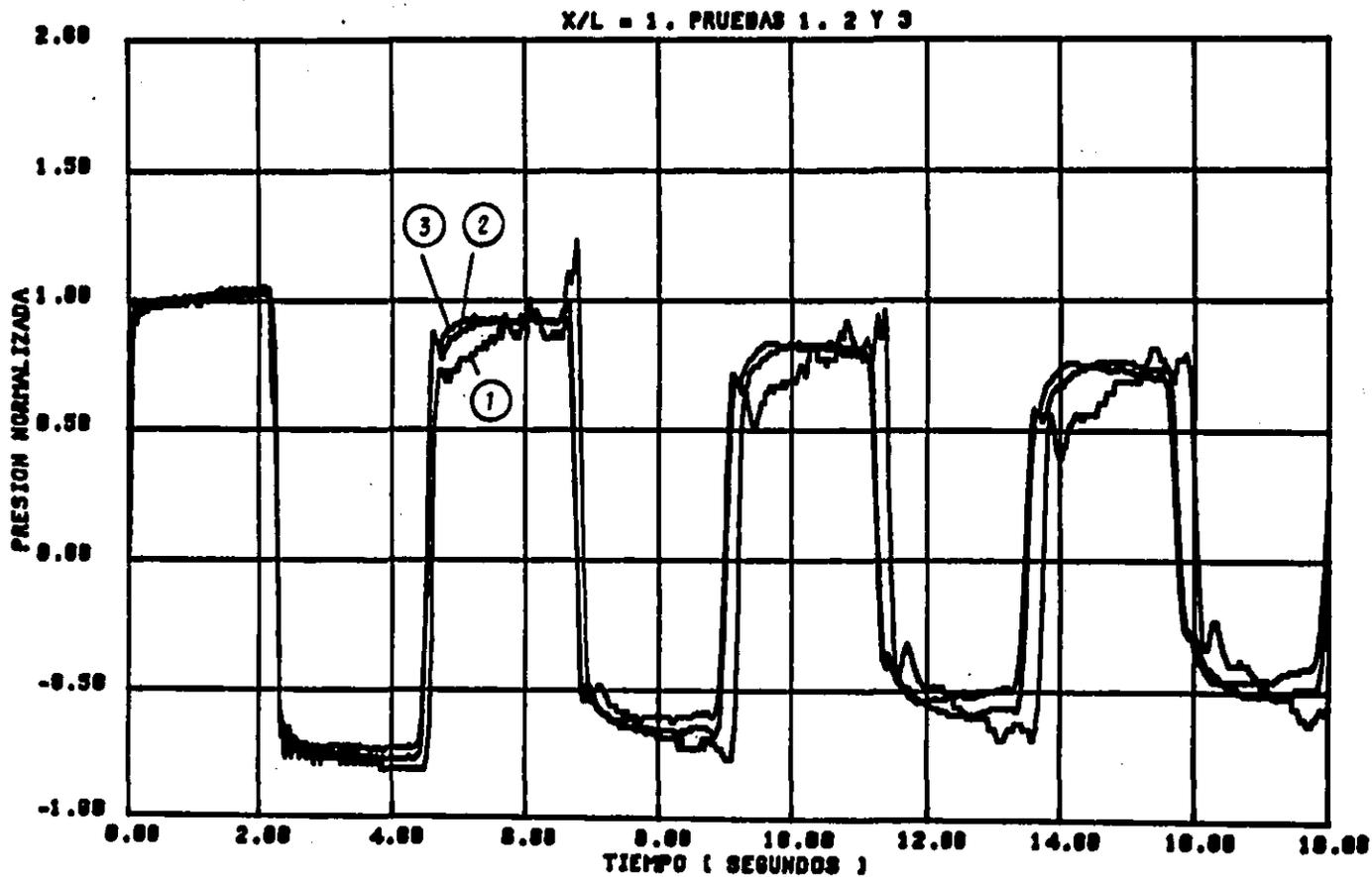


FIGURA 3.8 Registro normalizado en $x/L = 1$, pruebas 1,2 y 3

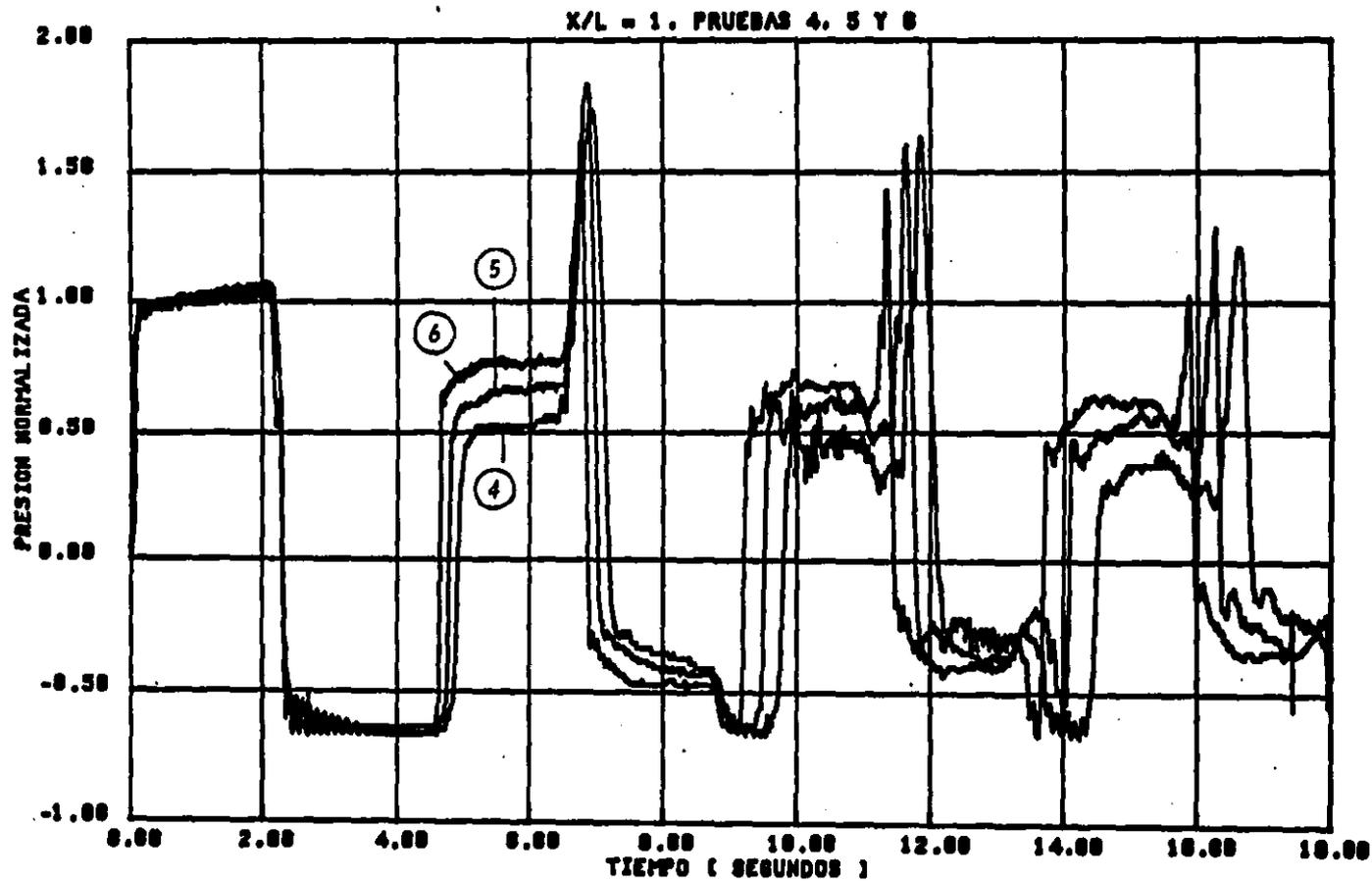


FIGURA 3.9 Registro normalizado en $x/L = 1$, pruebas 4, 5 y 6

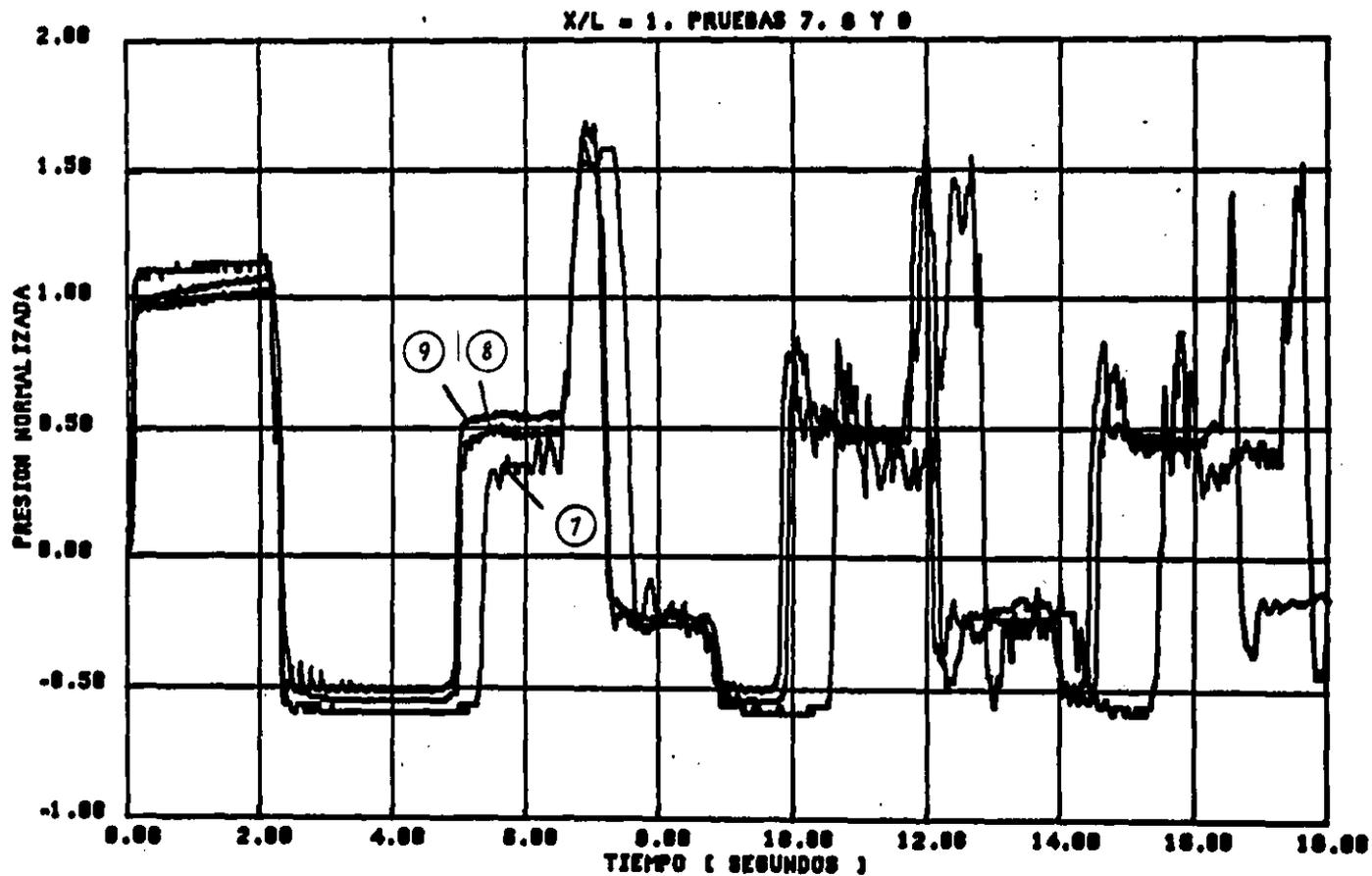


FIGURA 3.10 Registro normalizado en $x/L = 1$, pruebas 7, 8 y 9

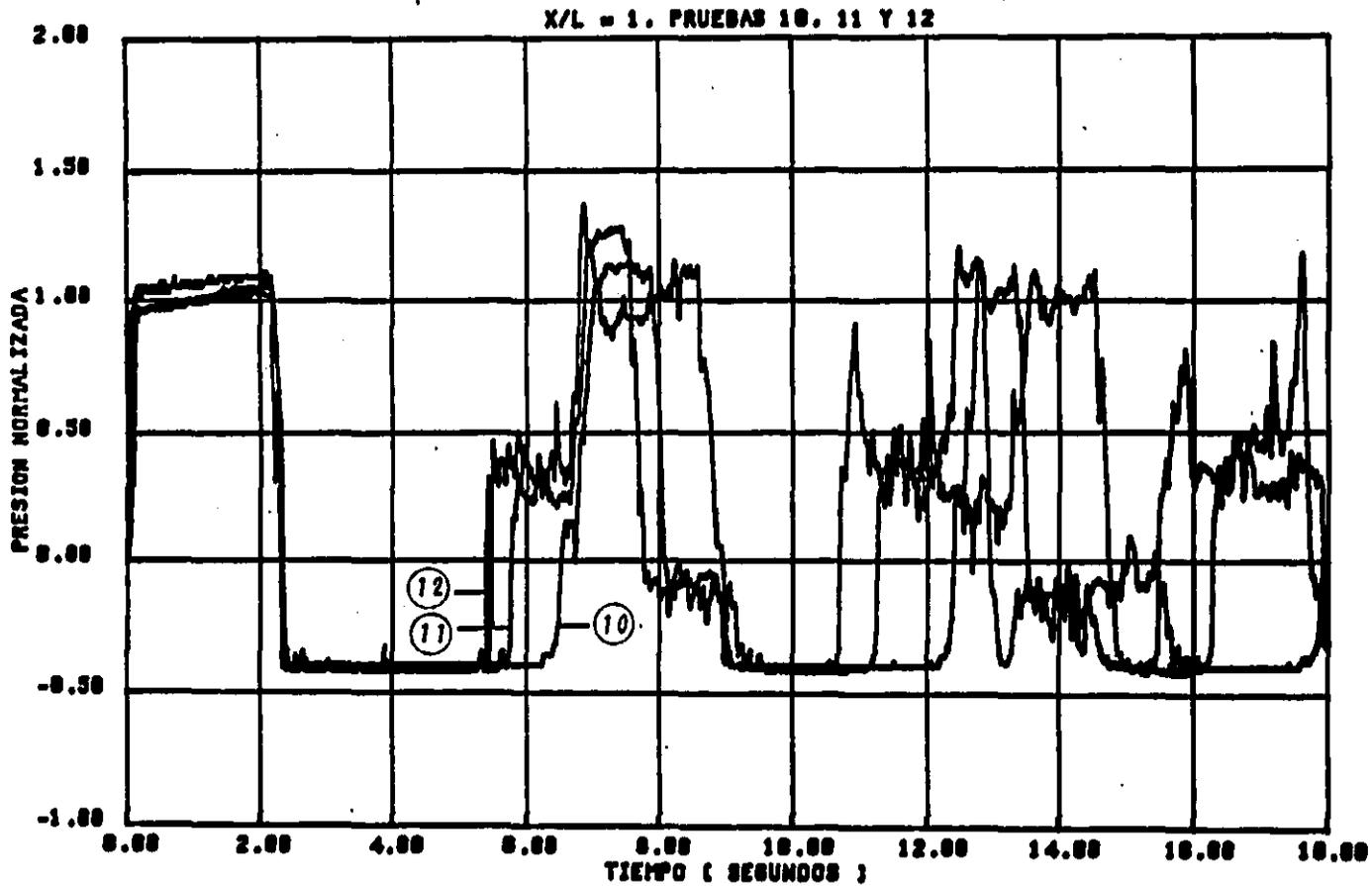


FIGURA 3.11 Registro normalizado en $x/L = 1$,
pruebas 10, 11 y 12

separación de columna. Adicionalmente, se pretende obtener un criterio sencillo que permita estimar el valor de la máxima sobrepresión causada por la separación de columna debida a la vaporización del agua en una instalación industrial.

3.4.1 Relación entre los parámetros J_m y $h^*_{m\acute{a}x}$

Un primer intento consiste en suponer que existe una relación entre el parámetro J_m definido en la sección 3.2.1 y el valor de la máxima ordenada del registro normalizado correspondiente al que se denomina $h^*_{m\acute{a}x}$. En la tabla 3.3 se presentan los valores de $h^*_{m\acute{a}x}$ para todas las pruebas realizadas, además se muestra el valor del número de Reynolds (Re) correspondiente a la velocidad en cada prueba ($v = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

En la figura 3.12 se presenta la relación J_m vs $h^*_{m\acute{a}x}$, en la cual se utilizan diferentes símbolos para representar aquellas pruebas cuyos valores de Re son semejantes, a saber; Δ para $Re \approx 34,000$ (pruebas 1, 4, 7 y 10), \square para $Re \approx 54,000$ (pruebas 2, 5, 8 y 11) y x para $Re \approx 73,000$ (pruebas 3, 6, 9 y 12). Adicionalmente, se incluyen los resultados de Martin (\blacksquare $Re = 13\,000$).

En esta figura se observa que no existe un ajuste de todas las pruebas pero aparentemente existe una tendencia si las pruebas se agrupan para Reynolds semejantes. Cabe aclarar que el número de Reynolds solo se ha incluido como un parámetro que permite agrupar en forma adimensional todas aquellas pruebas cuya velocidad es semejante. La tendencia de las

Prueba #	Re	Jm	h* máx
1	33,200	1.041	1.24
2	52,700	1.038	1.00
3	66,400	1.047	1.00
4	35,500	1.291	1.73
5	54,500	1.319	1.83
6	73,200	1.295	1.43
7	33,700	1.602	1.61
8	53,600	1.574	1.69
9	77,500	1.597	1.52
10	35,500	2.039	1.16
11	55,000	1.998	1.22
12	76,900	1.983	1.38

Tabla 3.3 Valores de Jm y su relación con h* máx

Prueba #	A (m)	B (m)	J	h* máx
1	87.77	89.54	0.972	1.24
2	134.27	142.40	0.943	1.00
3	167.64	178.80	0.928	1.00
4	90.72	86.79	1.071	1.73
5	137.50	131.87	1.050	1.83
6	183.78	178.68	1.014	1.43
7	84.70	74.00	1.174	1.61
8	140.39	120.71	1.131	1.69
9	194.03	173.67	1.099	1.52
10	92.21	72.67	1.276	1.16
11	140.76	113.66	1.230	1.22
12	193.05	159.26	1.189	1.38

Tabla 3.4 Relación entre J y h* máx

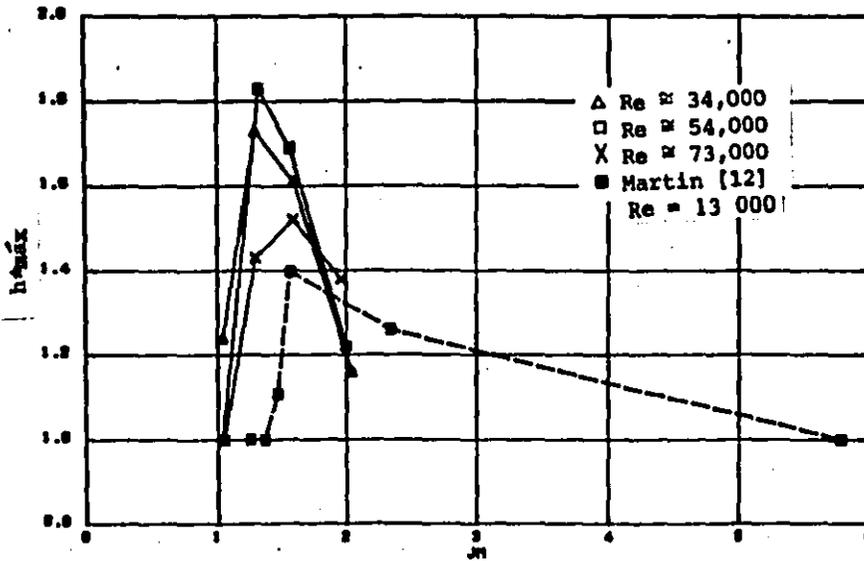


FIGURA 3.12 Relación entre los parámetros J_m y $h^*_{m\acute{a}x}$

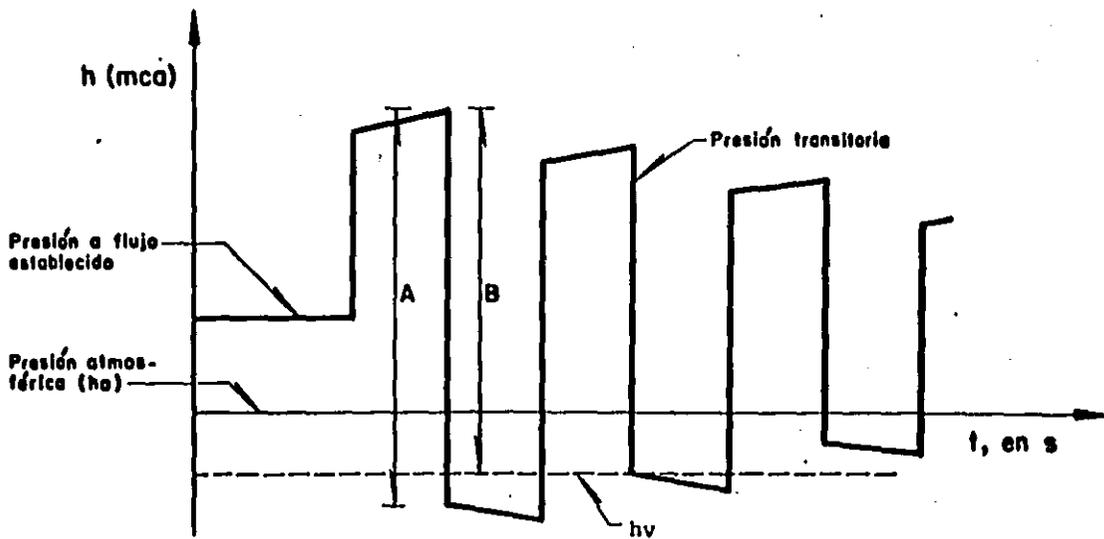


FIGURA 3.13 Registro de presión transitoria en ausencia de la vaporización del agua

pruebas muestra un máximo de $h^*_{\text{máx}}$ en cada caso para valores de $1.291 < J_m < 1.597$, siendo el mayor de ellos el correspondiente a la prueba número 5, en la cual para $J_m = 1.319$ se obtuvo $h^*_{\text{máx}} = 1.83$. Obsérvese que si bien J_m no es un parámetro que permita ajustar todas las pruebas a una sola relación experimental, si por lo menos lo hace para pruebas con Re (velocidades) semejantes. Además, el parámetro J_m si permite agrupar registros cualitativamente semejantes según se vió en las figuras 3.8 a 3.11.

3.4.2 Relación entre los parámetros J y $h^*_{\text{máx}}$

El resultado anterior sugiere la posibilidad de establecer una relación única entre $h^*_{\text{máx}}$ y un parámetro que tome en cuenta la severidad del transitorio, pero que no dependa de la velocidad tal como sucede con J_m . Para tal efecto se realiza la siguiente definición:

- Definición del parámetro J

Cuando se produce el cierre aguas abajo de la instalación se genera una onda de sobrepresión que viaja por la tubería, llega al extremo de carga constante ($x = 0$) y se refleja como onda de depresión, misma que al volver y alcanzar la válvula, ahora ya cerrada, se refleja nuevamente como onda de depresión. Dado que la mínima presión que es posible alcanzar en la tubería es la presión de vaporización del agua (sección 3.2.3), se fija este valor y la presión no desciende más.

Una forma de estimar la severidad de la separación de columna consiste

en pensar cómo sería el registro medido en $x/L = 1$ considerando que la presión pudiera descender a valores inferiores al de la presión de vaporización. Un registro de este tipo se ilustra en la figura 3.13. En relación con esta figura, se puede representar con la letra A a la diferencia de cargas de presión entre el máximo valor de la sobrepresión calculada y el valor mínimo alcanzado inmediatamente después de la llegada de la onda de depresión. Del mismo modo, se define con la letra B a la diferencia entre la carga máxima de la sobrepresión calculada y el valor correspondiente a la presión de vaporización del agua.

En estas condiciones se define J como $J = A/B$, el cual refleja el porcentaje en exceso de la depresión necesaria durante el transitorio para producir la separación de columna.

Para la determinación precisa de J se puede utilizar el método de las características (sección 4.2) o bien puede estimarse teóricamente. En cualquier caso se trata de un sistema simple, en el cual se produce el cierre instantáneo de la válvula aguas abajo. El factor de fricción se ajustó con base en las mediciones de pérdida de carga. En la tabla 3.4 se presentan los valores calculados de A, B y J para cada prueba. Recuérdese que, como se vio en la sección 3.2.3, $h_v = -7.75$ mca.

Con esta tabla es posible elaborar la figura 3.14 que muestra la relación J vs $h^*_{m\acute{a}x}$. En esta figura se observa que existe una tendencia en la cual se ajustan en forma razonable todas las pruebas. Dicha relación tiene un máximo de $h^*_{m\acute{a}x} = 1.83$, para $J = 1.050$.

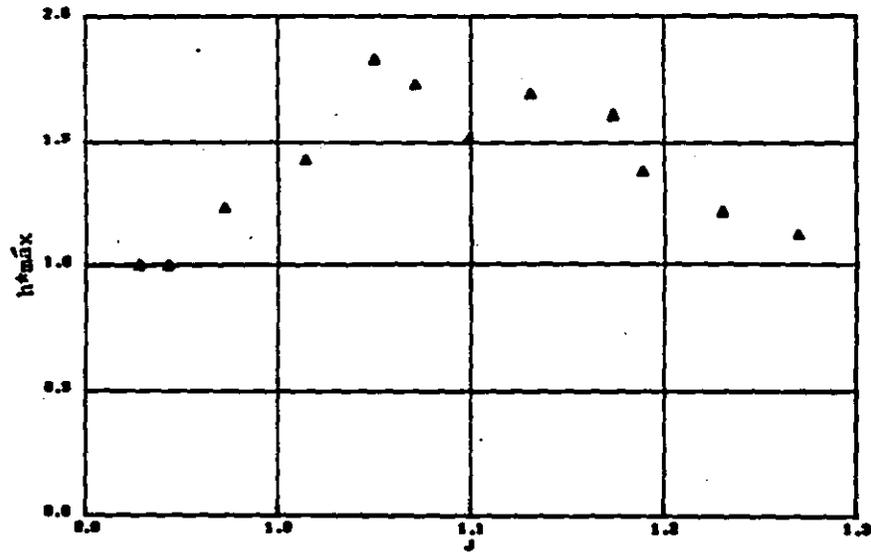


FIGURA 3.14 Relación entre los parámetros J y $h^*_{\text{m\acute{a}x}}$

El parámetro J permite agrupar los diferentes tipos de pruebas discutidos en la sección 3.2.3 de la siguiente forma:

Pruebas tipo I $0.943 < J < 1.000$ Separación incipiente

Pruebas tipo II $1.000 < J < 1.190$ Separación intermedia

Pruebas tipo III $1.190 < J < 1.276$ Separación severa

Recuérdese que las diferencias entre estos tipos no solo tienen que ver con la severidad de las condiciones de separación, sino que, como se vio en la sección 3.2.3, tiene que ver con la forma de la envolvente de presiones máximas. Finalmente, debe notarse que las máximas sobrepresiones se registran en las pruebas tipo II, es decir bajo condiciones de separación intermedia.

3.4.3 Criterio de aplicación de la relación J vs h^* máx

En esta sección se pretende establecer un criterio que permita determinar el valor aproximado de la sobrepresión máxima alcanzada en una instalación industrial donde se produzca el seccionamiento rápido de la conducción en su extremo aguas abajo. Un esquema de este tipo puede presentarse, por ejemplo, en la tubería de presión de una planta hidroeléctrica cuando se produce el rechazo total de la carga. El criterio propuesto es el siguiente:

- a) Estimar el valor de la diferencia entre la presión máxima calculada y el siguiente valor mínimo calculado (a esta diferencia la

denominaremos con la letra A), y el valor de la presión absoluta correspondiente a la máxima presión calculada B (ver figura 3.13).

- b) Obtener el valor de J con la relación de A sobre B.
- c) Con la figura 3.14 estimar el valor de la sobrepresión máxima normalizada h^* máx.
- d) Con los valores conocidos de la carga piezométrica aguas arriba (h_0), la celeridad (c) y la velocidad a régimen (V_0) determinar con la ecuación 3.4 el valor de la carga piezométrica máxima instantánea (h).

3.5 Comentarios

Del trabajo experimental desarrollado en este capítulo destacan las siguientes observaciones:

- a) Para las pruebas realizadas con J_m semejantes se obtuvieron registros cualitativamente semejantes (fig 3.8 a 3.11), pero no fue posible establecer una relación única entre J_m y h^* máx como puede verse en la figura 3.12. En esta figura se observa que para valores de Re (velocidades) semejantes, existe una relación experimental, misma que presenta valores de h^* máx que oscilan entre 1.52 y 1.83.
- b) En la figura 3.14 se observa una relación única entre el parámetro J y h^* máx, dicha relación tiene un valor máximo de h^* máx = 1.83 para $J = 1.050$. Se observa además que para valores mayores de J en separación severa no se alcanzan sobrepresiones mayores, lo cual

sucede también para valores menores de J en separación incipiente. En otras palabras, las máximas sobrepresiones se obtuvieron siempre en condiciones de separación intermedia. Asimismo, con ayuda de la relación mostrada en la figura 3.14 es posible estimar, en una primera aproximación, el valor de la máxima presión que puede presentarse en una instalación industrial en condiciones de separación de columna.

- c) Si bien ha sido posible acotar experimentalmente el valor de $h^{\star \text{máx}}$ (éste nunca fue mayor de 2), la figura 3.14 muestra que los resultados experimentales tienen todavía cierta dispersión, lo que muestra la posible existencia de una variable no controlada durante el experimento. Dicha variable puede ser la cantidad de aire disuelto y en arrastre, que si bien en todos los casos se trabajó con el mismo tipo de agua, su contenido de aire pudo variar debido a la aereación que sufre al pasar por el vertedor, e incluso es posible que parte del aire liberado en una prueba de separación permaneciera atrapado en la instalación al momento de realizar la siguiente prueba.

El estudio experimental presentado en este capítulo será de gran ayuda en la calibración del modelo numérico que se propone en el siguiente capítulo.

4. MODELO NUMERICO

La finalidad de este capítulo es mostrar una metodología de cálculo desarrollada para la modelación numérica del flujo transitorio con separación de columna líquida en conductos a presión. Se muestran las ecuaciones que gobiernan el flujo no permanente en conductos a presión y la solución de estas ecuaciones con el método de las características incluyendo algunas condiciones de frontera. Se propone un modelo puntual para la condición de separación de columna acorde con el método de las características. Posteriormente, se comparan los resultados del cálculo numérico con los experimentos desarrollados en el capítulo anterior. Para finalizar, se dan los comentarios más relevantes relativos al modelo numérico.

4.1 Ecuaciones del flujo no permanente en conductos a presión

El flujo no permanente en conductos a presión está descrito por la ecuación dinámica y la ecuación de continuidad [refs 1,14 y 20]. A continuación, se presentan las ecuaciones para el caso de una tubería horizontal.

La ecuación dinámica se obtiene aplicando la segunda ley de Newton a un volumen de control aislado dentro de una tubería horizontal.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.1)$$

donde Q es el gasto volumétrico instantáneo y h la carga piezométrica instantánea, ambas función del tiempo t y de la posición x ; A es el área de la sección transversal del conducto, D el diámetro del conducto y f es el factor de fricción en la fórmula de Darcy-Weisbach.

La ecuación de continuidad se obtiene aplicando la ley de conservación de la masa a un volumen de control aislado dentro de la tubería. Para ello, es necesario incorporar las ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento elástico de la tubería y del propio fluido. El resultado que se obtiene es el siguiente

$$c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

En la cual c representa la celeridad de las ondas de perturbación dentro de la tubería.

4.2 Método de las características

Las ecuaciones 4.1 y 4.2 forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas. Con las variables Q y h como variables dependientes y las variables x y t como las independientes. Para su solución existen diferentes métodos [ref 1], sin embargo, destaca dentro de todos el método de las características, que consiste en convertir el sistema de ecuaciones 4.1 y 4.2 en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, el cual es resuelto mediante un esquema explícito de diferencias finitas y considerando las condiciones iniciales y de frontera. El método de las características cuenta con un criterio de estabilidad y convergencia dado por la relación de Courant $c\Delta t/\Delta x \leq 1$ [ref 1].

4.2.1 Ecuaciones características

Considerando una combinación lineal de las ecuaciones 4.1 y 4.2 de tal suerte que su suma sea nula, esto es, se suma a la ecuación 4.1 la ecuación 4.2 multiplicada por un factor de conversión λ , o sea

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2DA} + \lambda (c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial t}) = 0$$

ordenando resulta

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.3)$$

recordando que Q y h son funciones de x y t, de la definición de derivada total se tiene

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.4)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.5)$$

definiendo al factor λ como

$$\frac{dx}{dt} = \lambda c^2 = \frac{1}{\lambda} \quad (4.6)$$

o sea

$$\lambda = \pm 1/c \quad (4.7)$$

Sustituyendo 4.6 en 4.4 y 4.5 y éstas a su vez en 4.3, teniendo en cuenta 4.7, se obtiene

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.8)$$

si
$$\frac{dx}{dt} = c \quad (4.9)$$

y
$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.10)$$

si
$$\frac{dx}{dt} = -c \quad (4.11)$$

que es un sistema de 4 ecuaciones en derivadas ordinarias en las variables x, t, Q y h .

Para la solución de este sistema de ecuaciones considérese un plano $x-t$ como el mostrado en la figura 4.1. Las condiciones de carga (h_A y h_B) y gasto (Q_A y Q_B), son conocidas en un instante t para los puntos A y B (fig 4.1). El problema consiste entonces en determinar la carga (h_p) y el gasto (Q_p) en el punto P en el instante $t + \Delta t$, donde $\Delta t = c \Delta x$. Como se observa en la figura 4.1 la línea AP tiene pendiente igual a $1/c$ y se denomina característica positiva mientras que la línea BP tiene una pendiente $-1/c$ y se denomina característica negativa. Tomando diferencias finitas para la característica positiva resulta

$$dQ = Q_p - Q_A \quad (4.12)$$

$$y \quad dh = h_p - h_A \quad (4.13)$$

sustituyendo 4.12 y 4.13 en 4.8 y escribiendo dx y dt como Δx y Δt , se tiene

$$\frac{Q_p - Q_A}{\Delta t} + \frac{gA(h_p - h_A)}{c \Delta t} + \frac{f}{2DA} Q_A |Q_A| = 0 \quad (4.14)$$

multiplicando por Δt y despejando Q_p

$$Q_p = Q_A + \frac{gA}{c} h_A - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| - \frac{gA}{c} h_p \quad (4.15)$$

que puede escribirse como

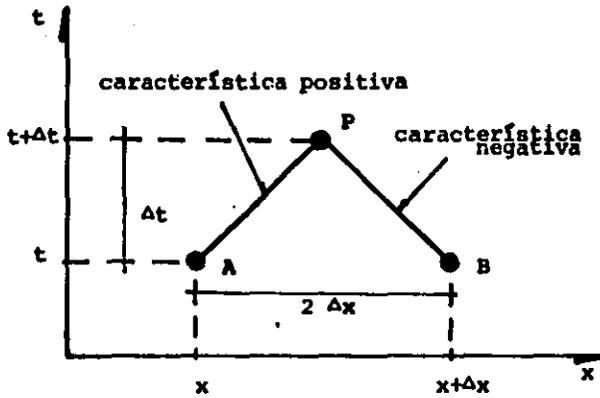


FIGURA 4.1 Plano x-t y líneas características

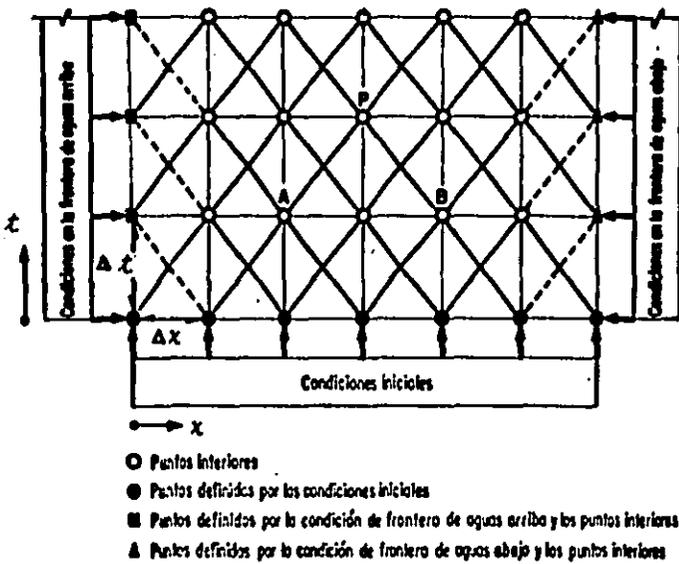


FIGURA 4.2 Malla característica en el plano x-t

$$Q_p = C_p - C_a h_p \quad (4.16)$$

donde $C_a = \frac{gA}{c} \quad (4.17)$

y $C_p = Q_A + C_a h_A - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| \quad (4.18)$

Procediendo análogamente para la característica negativa, se tiene

$$Q_p = C_n + C_a h_p \quad (4.19)$$

donde $C_n = Q_B - C_a h_B - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| \quad (4.20)$

A la ecuación 4.16 se le conoce como ecuación de la característica positiva y a la ecuación 4.19 como ecuación de la característica negativa. Resolviendo simultáneamente este par de ecuaciones para Q_p y h_p resulta

$$Q_p = \frac{C_p + C_n}{2} \quad (4.21)$$

y $h_p = \frac{C_p - C_n}{2C_a} \quad (4.22)$

Es decir, para calcular la carga h_p y el gasto Q_p en el punto P en el instante $t + \Delta t$, basta conocer el valor de C_a , que es constante en todo el cálculo, y los valores de C_p y C_n que se determinan con las ecuaciones 4.18 y 4.20 y dependen de las condiciones de carga y gasto de los puntos A y B en el instante t.

4.2.2 Condiciones de frontera

En la figura 4.2 se observa la malla característica en el plano $x-t$. Como se puede observar, las líneas características (trazo continuo) permiten el cálculo de presión y gasto en los puntos interiores. Sin embargo, el cálculo no puede realizarse en los extremos de la tubería por corresponderles una sola característica; la positiva para el extremo aguas abajo y la negativa para el extremo aguas arriba. Por lo tanto, es necesario contar con una relación adicional entre la carga y el gasto para poder obtener sus valores. Dicha relación depende de la frontera que se tenga al inicio y al final de la tubería, a continuación se detallan aquellas requeridas en el presente estudio.

a) Tanque de carga constante en el extremo aguas arriba

En relación con la figura 4.3, se tiene que

$$h_p = h_o \quad (4.23)$$

que es la carga piezométrica al inicio de la tubería y cuyo valor no varía durante todo el transitorio. De la ecuación característica negativa 4.19 resulta que

$$Q_p = C_n + C_{ho} \quad (4.24)$$

Nótese que para obtener esta condición de frontera tan simple se han despreciado las pérdidas por entrada, lo que por otro lado no conduce a

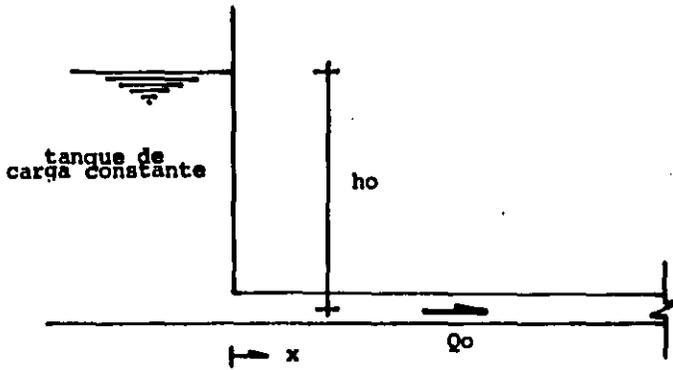


FIGURA 4.3 Tanque de carga constante en el extremo aguas arriba

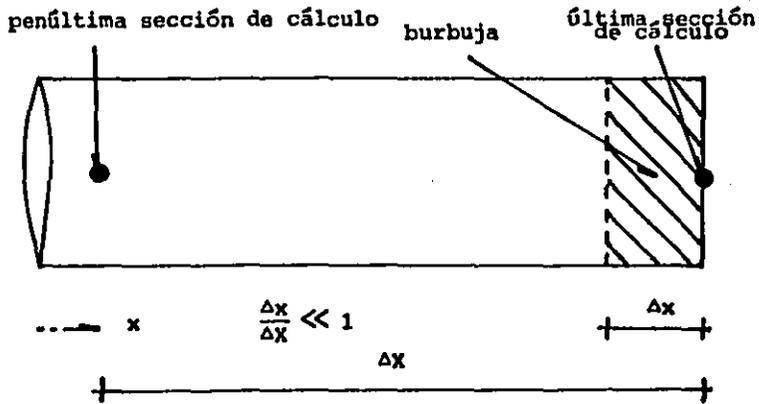


FIGURA 4.4 Masa de gas en el extremo aguas abajo

errores de consideración.

b) Tubería seccionada totalmente en el extremo aguas abajo

Para esta condición de frontera debe cumplirse que

$$Q_p = 0 \quad (4.25)$$

Sustituyendo en la ecuación de la característica positiva 4.16, se obtiene

$$h_p = \frac{C_p}{C_a} \quad (4.26)$$

La condición de frontera anterior sólo es válida en el caso de no tener separación de columna en ese extremo.

Cuando hay separación de columna por vaporización del agua o por entrada de aire, debe utilizarse una nueva condición de frontera cuyo modelo numérico es la parte principal de este capítulo y se presenta a continuación.

4.3 Modelo puntual de separación de columna

La finalidad de esta sección es la de desarrollar un modelo numérico sencillo que permita tomar en consideración los efectos que produce la separación de columna líquida durante un transitorio en una conducción a presión. Es oportuno decir que se debe entender por separación de

columna al proceso completo de formación de la burbuja y su posterior colapso (reintegración de la columna). También se debe recordar que este modelo pretende simular tanto la separación debida a la vaporización del agua como la debida a la presencia o entrada de aire a la tubería. En cualquier caso, en lo que sigue se hará referencia a la burbuja de gas o simplemente burbuja, y solo donde sea oportuno se detallarán las diferencias por tratarse de vapor de agua o aire.

4.3.1 Descripción del proceso de separación de columna

En una conducción de agua a presión donde se ha generado un transitorio, las presiones varían dependiendo del perfil de la propia conducción y de las causas que producen el transitorio. Dichas presiones pueden descender lo suficiente para dar lugar a alguna de las dos situaciones siguientes:

- a) Si la conducción cuenta en ese punto, con una válvula de admisión de aire de dimensiones suficientes y la piezométrica instantánea corta la cota de la válvula, se permite el ingreso de aire a la tubería.
- b) Si no se cuenta con una válvula de admisión de aire o esta no es de dimensiones suficientes , la piezométrica puede descender hasta alcanzar la presión de vaporización del agua, se generan burbujas de vapor de agua y el desprendimiento de gases disueltos. Si el fenómeno persiste, estas burbujas pueden unirse dando paso a la formación de una cavidad única y de mayor tamaño [ref 4].

En cualquier caso se tiene una burbuja de gas que produce una discontinuidad en el fluido. Esta discontinuidad puede evolucionar

dependiendo del tiempo en que se mantenga la baja presión que originó su formación, lo cual a su vez depende de la severidad del transitorio. Durante este proceso (formación de la burbuja), se impone una presión constante en el punto de formación igual a la presión atmosférica (p_a) en el caso a o igual a la presión de vaporización (p_v) en el caso b.

La presión mínima se mantendrá en tanto no cambien las condiciones de presión y gasto y cuando esto suceda, se iniciará la etapa de restitución, dando paso al proceso de compresión y/o condensación de la burbuja de gas (restitución de la columna). En esta etapa serán dominantes dos aspectos. Por un lado, el comportamiento dinámico del gas y por otro, la velocidad de condensación del mismo. Estos aspectos serán los que determinen la evolución de la presión transitoria en la etapa de restitución.

4.3.2 Hipótesis del modelo

Fundamentalmente se desarrollan dos hipótesis para la elaboración del modelo:

- I) En la separación de columna se genera sólo una cavidad concentrada en el primer punto de la tubería donde se alcanza la condición de presión que produce la separación. Durante su desarrollo, la burbuja mantiene su presión constante. Durante su colapso (restitución de la columna), la burbuja puede ser comprimida y parte de ella puede condensarse o diluirse.

Esta hipótesis es de gran importancia ya que permitirá acoplar con sencillez el modelo propuesto al método de las características, por lo que se denomina modelo puntual. Además, con esta hipótesis se consigue que la presión mínima en el resto de la conducción quede fijada a valores muy próximos al impuesto por la condición de separación.

- II) Se considera como instante inicial de la separación a aquel para el cual la presión en el punto de separación es menor que la que produce la formación de la burbuja (sección 4.3.1).

Esta hipótesis es de menor relevancia física pero de gran importancia práctica, pues permite eliminar todo proceso de interpolación y, como se verá más adelante, no hay pérdida de precisión en los cálculos.

4.3.3 Desarrollo del modelo

En lo que sigue, se desarrollarán las ecuaciones del modelo numérico suponiendo que la separación se produce por el cierre de una válvula localizada en el extremo aguas abajo de una instalación como la descrita en el capítulo anterior. Sin embargo, desarrollos análogos pueden realizarse fácilmente para otros casos.

Primero, se establece que la dinámica de formación y colapso de la burbuja queda descrita por la ecuación de estado de un gas ideal

$$p\psi = m R T \quad (4.27)$$

donde p es la presión absoluta, ψ es el volumen de la burbuja, m es la masa de la misma, R es la constante del gas y T es su temperatura absoluta.

Dada la rapidez del fenómeno de formación, se supondrá que el proceso es isotérmico por lo que la temperatura será constante y de valor igual a la temperatura ambiente ($T = 20^{\circ}\text{C} = 293.15^{\circ}\text{K}$).

El valor de R dependerá del gas en cuestión; para vapor de agua

$$R = 47.07 \frac{\text{kg m}}{\text{kg}_m^{\circ}\text{K}}$$

y para aire

$$R = 29.24 \frac{\text{kg m}}{\text{kg}_m^{\circ}\text{K}}$$

La ecuación 4.27 tiene tres incógnitas: p , ψ y m , por lo que se requiere de dos ecuaciones más para formar un sistema consistente. Una de estas ecuaciones será la expresión diferencial del principio de continuidad para un volumen de control formado por la burbuja, o sea

$$\frac{d\psi}{dt} = - Q \quad (4.28)$$

donde Q es el gasto en el extremo final de la columna líquida (fig

4.4), que es positivo cuando tiene el mismo sentido que en flujo establecido y negativo en caso contrario.

Adicionalmente, y dado que los procesos de formación y condensación de la burbuja son variables, sería necesario disponer de una ecuación que permitiera calcular la variación de la masa con respecto al tiempo en función de variables tales como: p y ψ , o sea

$$\frac{dm}{dt} = f (p, \psi, \dots) \quad (4.29)$$

No se conocen ecuaciones de este tipo que modelen los procesos de evaporación y condensación pero, como se verá más adelante, en la etapa de formación de la burbuja la hipótesis I elimina la necesidad de disponer de tal ecuación y aunque no suceda lo mismo en la etapa de reintegración, se hará una parametrización del fenómeno que permita modelar a voluntad la velocidad de condensación.

Para poder acoplar las ecuaciones 4.27 y 4.28 al método de las características, se tienen que escribir en diferencias finitas como sigue

$$p_p \psi_p = m_p R T \quad (4.30)$$

y

$$\psi_p = \psi - \frac{\Delta t}{2} (Q + Q_p) \quad (4.31)$$

donde el subíndice P indica que el valor de la variable corresponde al

siguiente instante de cálculo.

El cálculo se divide en dos etapas:

a) Etapa de formación de la burbuja

Para esta etapa se cuenta con las ecuaciones 4.30 y 4.31 y las incógnitas son p_p , v_p , m_p y Q_p . Con la hipótesis I aplicada a este caso, se tiene

$$h_p = hv \quad (4.32)$$

de la definición de presión absoluta

$$p_p = \gamma (h_p + H_a) \quad (4.33)$$

donde γ es el peso específico del agua y H_a es el valor absoluto de la presión atmosférica. Finalmente, la ecuación que resta es la ecuación característica positiva que con la hipótesis I y de la ecuación 4.16 resulta ser

$$Q_p = C_p - C_a h_p \quad (4.34)$$

Ahora el sistema ya es consistente, pues tiene 5 ecuaciones 4.30 a 4.34 y 5 incógnitas (p_p , v_p , m_p , Q_p , y h_p).

b) Etapa de reintegración

Como ya se dijo, en esta etapa no puede mantenerse la hipótesis I dada por la ecuación 4.32, por lo que es necesario incorporar una ecuación que modele la velocidad de condensación de la burbuja. Dicha ecuación; que sustituye a la 4.29 es

$$\frac{m - m_p}{m} = K \text{ (cte)} \quad (4.35)$$

donde K es un parámetro que puede tomar valores en el intervalo [0,1).

Si $K = 0$, esto implica que $m_p = m$, lo que significa que la masa de gas se mantiene constante y la burbuja sufre un proceso de compresión-expansión. Si $K = 1$, esto implica que $m_p = 0$, lo que significa que en un intervalo de integración numérica la burbuja se colapsa.

Con las ecuaciones 4.30, 4.31, 4.33, 4.34 y 4.35 se tiene un sistema de 5 ecuaciones con las mismas 5 incógnitas de la etapa anterior.

4.4 Algoritmo para la simulación de los transitorios analizados experimentalmente

Con el propósito de aprovechar los resultados experimentales del capítulo anterior para comparar y calibrar el modelo propuesto, se elaboró un programa en una microcomputadora tipo personal de acuerdo con el siguiente algoritmo:

- a) Para los puntos interiores se utilizaron las ecuaciones 4.21 y 4.22, que dependen de las condiciones iniciales en cada intervalo de integración.
- b) Para el cálculo de las condiciones de frontera aguas arriba (tanque de carga constante), se utilizaron las ecuaciones 4.23 y 4.24.
- c) Para el cálculo de las condiciones en la frontera aguas abajo (válvula de cierre instantáneo), que es la zona donde se supuso concentrada la separación de columna , el análisis depende de las siguientes etapas del proceso:

c.1) Primer golpe

Desde que inicia el transitorio producido por el cierre de la válvula y hasta que la onda regresa como onda de depresión, la frontera se modela como un extremo cerrado. por lo que;

$$Q_p = 0 \quad (4.25)$$

y

$$h_p = \frac{C_p}{C_a} \quad (4.26)$$

Esta etapa se denomina primer golpe y su cálculo se realiza con las ecuaciones 4.25 y 4.26.

c.2) Formación de la burbuja o separación

Cuando la onda de depresión alcanza el extremo cerrado se refleja nuevamente como onda de depresión y la presión puede descender hasta producir la separación. Desde este instante y hasta que se inicia la compresión de la burbuja por el reflejo de la onda como una de sobrepresión, la presión del gas y la de la columna líquida en ese extremo serán iguales a la presión mínima impuesta por la vaporización: $h_p = h_v$.

En cada instante de cálculo:

- Q_p se valúa con la ecuación 4.34.
- Ψ_p se valúa con la ecuación 4.31. El valor inicial de Ψ es cero en el instante que comienza la separación.
- Finalmente se calcula el valor de m_p con la ecuación 4.30.

c.3) Reintegración

La reintegración inicia cuando regresa al extremo final una onda de sobrepresión e impone para la columna líquida un gasto mayor que cero que indica que el movimiento es hacia la válvula. A partir de ese instante y hasta que la burbuja desaparece debe emplearse el sistema de ecuaciones 4.30, 4.31, 4.33, 4.34 y 4.35, donde previamente se ha elegido el valor para el parámetro K y el valor inicial de m corresponde al último calculado en la etapa de separación. El sistema de ecuaciones ya mencionado se reduce a una ecuación de segundo grado.

c.4) Tubería totalmente seccionada

Solo en el caso de elegir $K \neq 0$, la burbuja desaparece en algún momento y el cálculo de presión y gasto deberá realizarse como en el primer golpe.

4.5 Comparación del modelo con los resultados experimentales

La finalidad de esta sección es la de comparar los registros de presión transitoria obtenidos en la instalación experimental con el algoritmo de cálculo propuesto en la sección 4.4.

4.5.1 Influencia del parámetro K

Como se vio en la sección 4.3, en la etapa de reintegración fue necesario incorporar una ecuación que defina la velocidad de condensación de la burbuja (ecuación 4.35). Dicha ecuación depende del parámetro K que, como puede recordarse, puede valer 0 si la burbuja no se condensa y 1 para una condensación instantánea.

Para observar la influencia de este parámetro se eligieron arbitrariamente tres pruebas, una representativa de cada caso (separación incipiente, intermedia y severa). Las pruebas elegidas se muestran en la tabla 4.1.

En las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran las comparaciones entre cálculos numéricos y registros experimentales. Los registros corresponden a las mediciones realizadas en el extremo aguas abajo de

Prueba	Separación	h ₀	V ₀	J _m
#		(mca)	(m/s)	
1	incipiente	36	0.351	1.041
7	intermedia	21	0.356	1.602
11	severa	30	0.582	1.998

Tabla 4.1 Pruebas elegidas para observar la influencia del parámetro K

Prueba	Separación	h ₀	V ₀	J _m
#		(mca)	(m/s)	
2	incipiente	62	0.557	1.038
8	intermedia	39	0.567	1.574
10	severa	16	0.375	2.039

Tabla 4. 2 Pruebas elegidas para comparar los registros a lo largo de la tubería

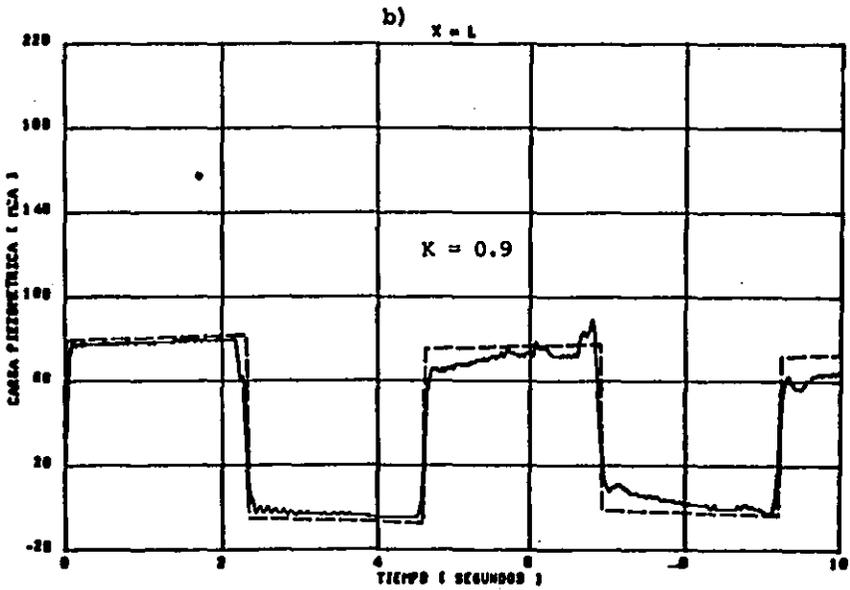
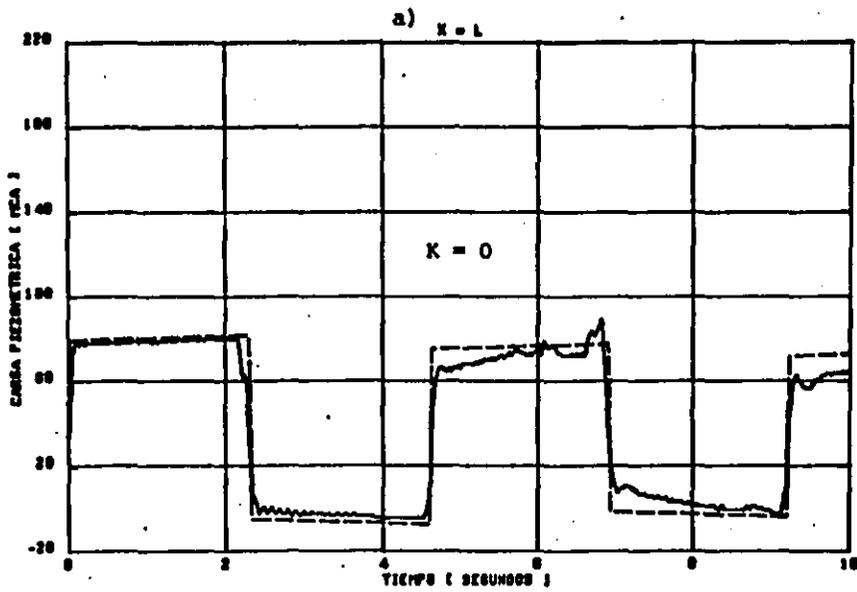


FIGURA 4.5 Separación incipiente, prueba 1
---- cálculo — medición

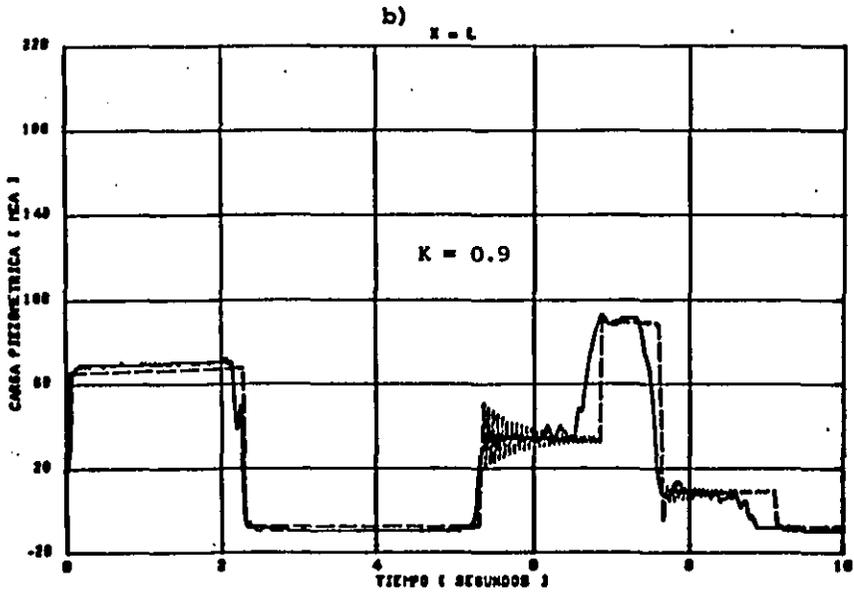
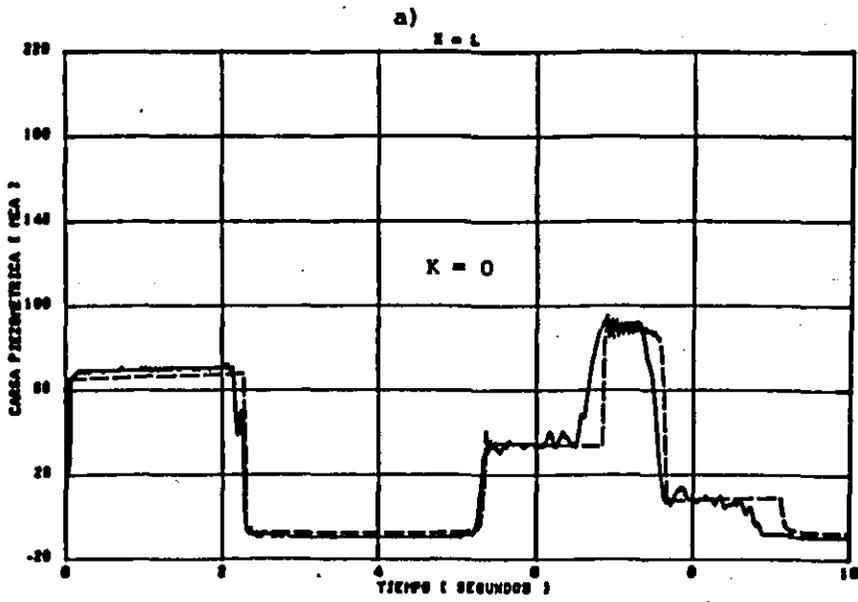


FIGURA 4.6 Separación intermedia, prueba 7
---- cálculo — medición

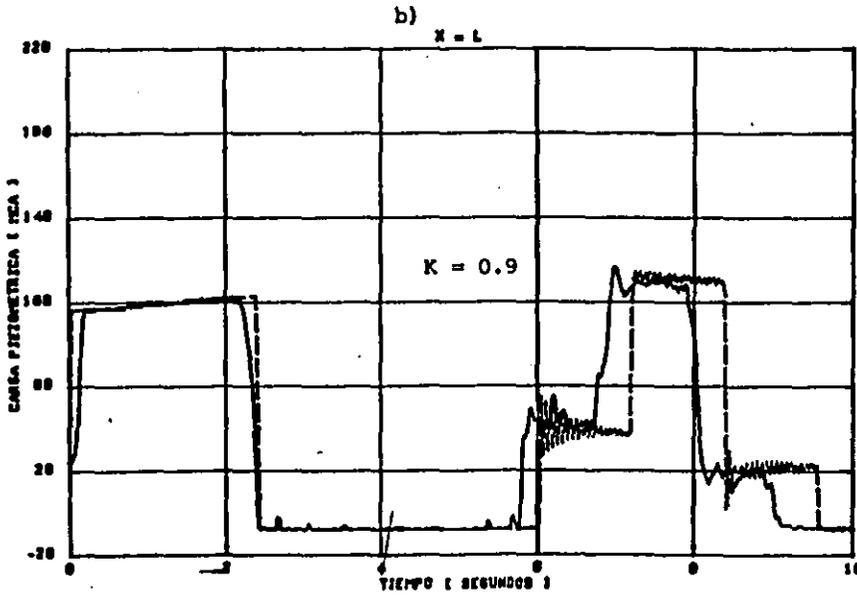
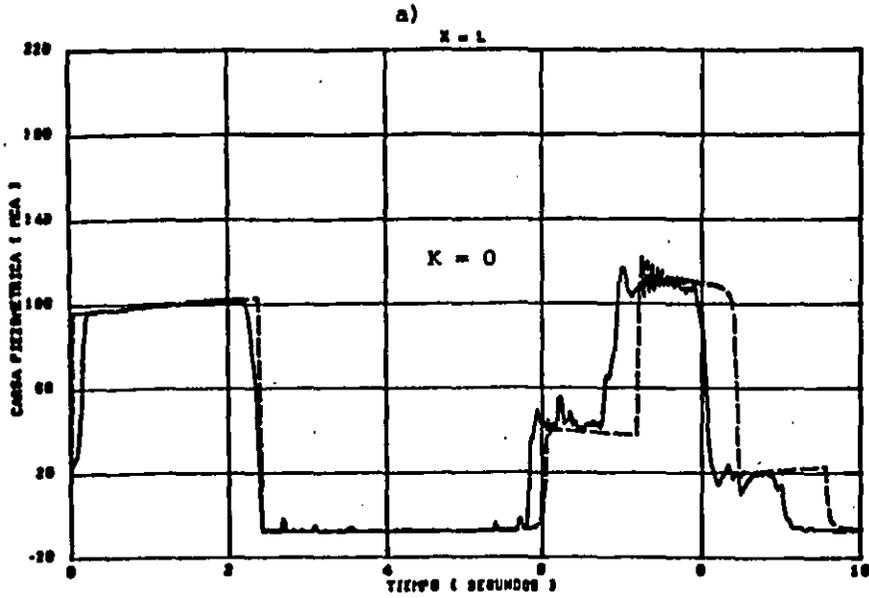


FIGURA 4.7 Separación severa, prueba 11
---- cálculo — medición

la instalación, desde el inicio del transitorio hasta el segundo golpe, y se presentan en forma normalizada según la ecuación 3.3. Las figuras 4.5.a, 4.6.a y 4.7.a corresponden a las comparaciones tomando $K = 0$ (no hay condensación de la masa de gas) y las figuras 4.5.b, 4.6.b y 4.7.b corresponden al valor de $K = 0.9$ (condensación muy rápida).

En estas figuras puede verse que el cálculo de la amplitud de la espiga representativa de la separación de columna (fin del segundo golpe), es tan bueno para $K = 0$ como para $K = 0.9$. Sin embargo, obsérvese que en las figuras 4.6.b y 4.7.b para $K = 0.9$, aparecen fluctuaciones de presión de alta frecuencia (18 Hz) y gran amplitud que no se observan en el registro experimental. Si se recuerda que la frecuencia de muestreo es de 75 Hz, queda descartada la posibilidad de que las fluctuaciones que aparecen en el cálculo estén asociadas al fenómeno real ya que la frecuencia de muestreo es mayor que la que resulta con el modelo numérico. De esta manera, se concluye que con $K = 0$ se modela mejor el fenómeno y se puede decir que durante la etapa de restitución el fenómeno de compresión de la masa del gas es más importante que su condensación.

4.5.2 Comparación de los registros obtenidos a lo largo de la tubería

En la tabla 4.2 se muestra un resumen de otras tres pruebas elegidas arbitrariamente para realizar la comparación de los cálculos y registros obtenidos en las secciones $x/L = 1, 3/4, 1/2$ y $1/4$.

En las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se presentan superpuestos los cálculos

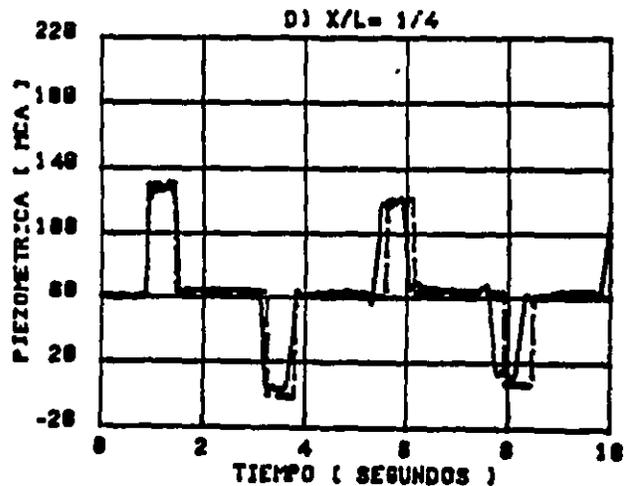
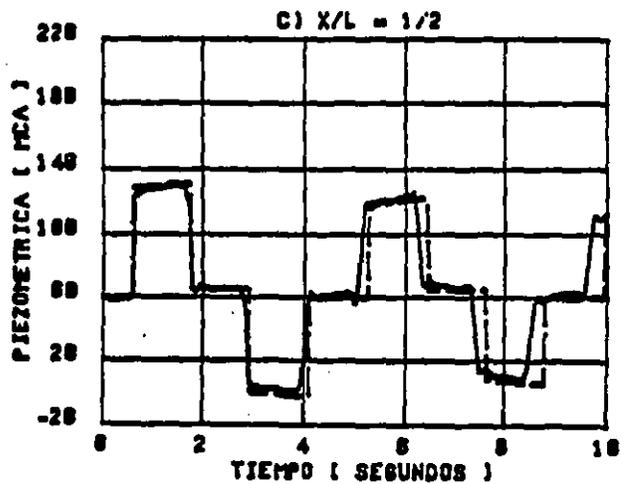
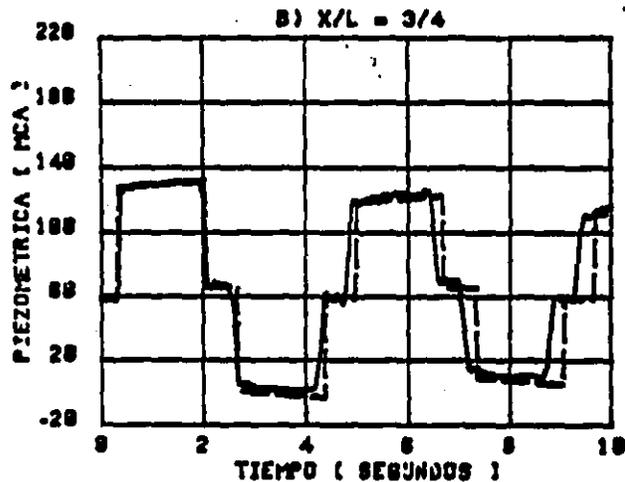
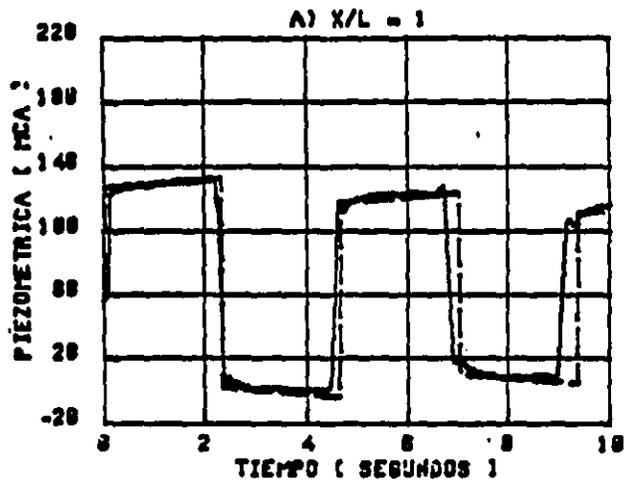


FIGURA 4.8 Separación incipiente, prueba 2. — medición - - - - cálculo

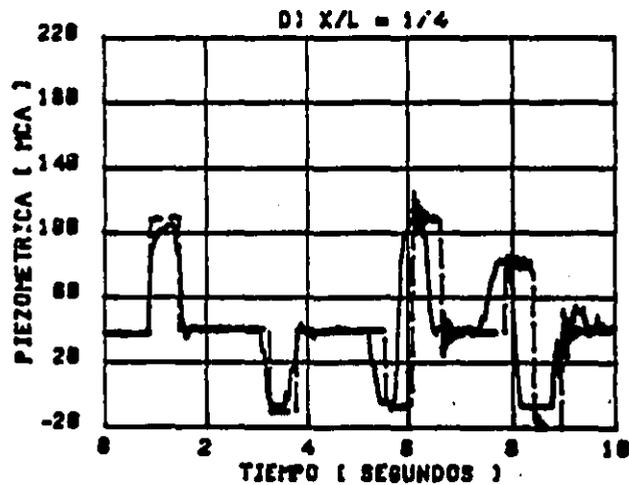
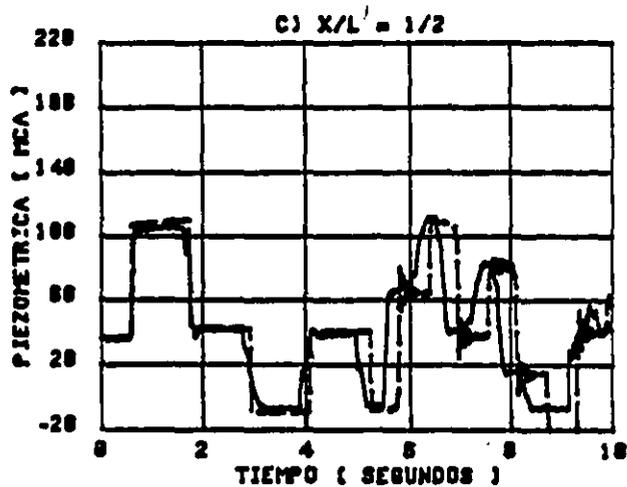
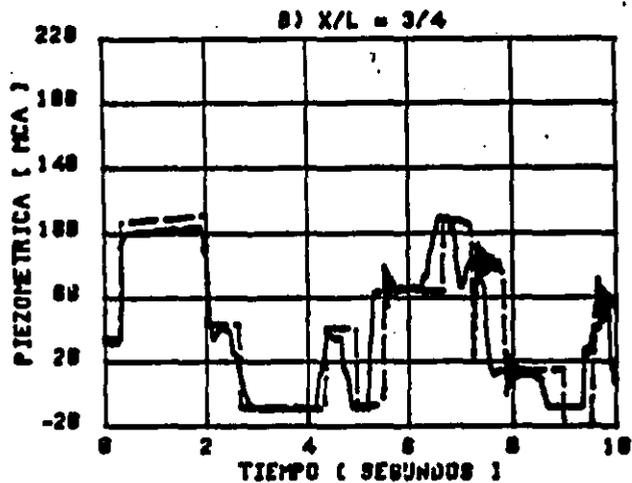
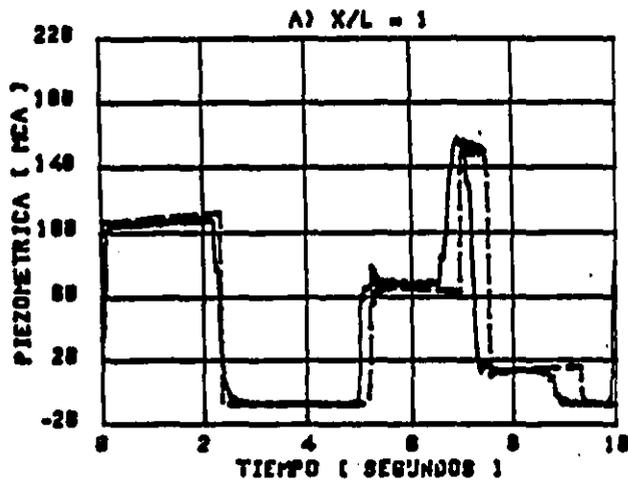


FIGURA 4.9 Separación intermedia, prueba 8. — medición --- cálculo

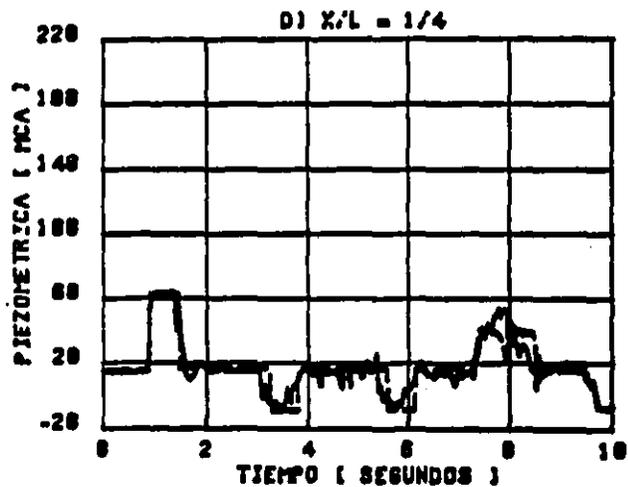
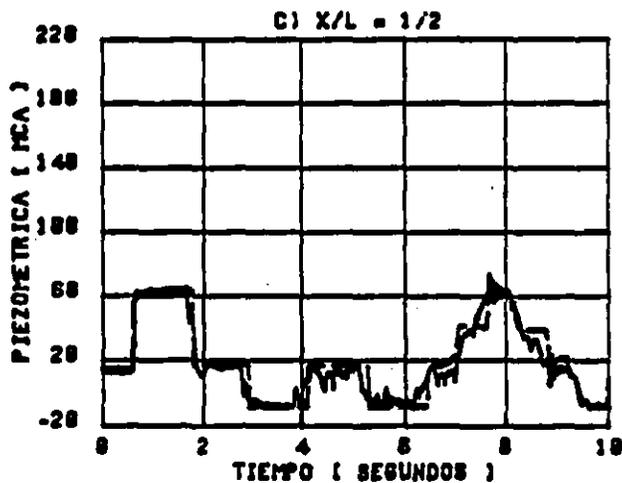
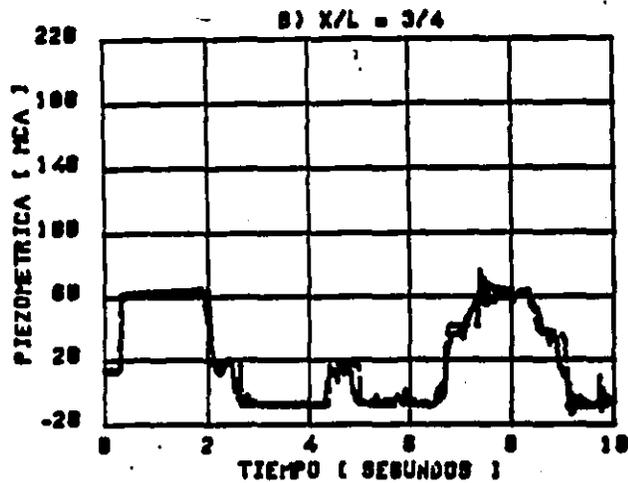
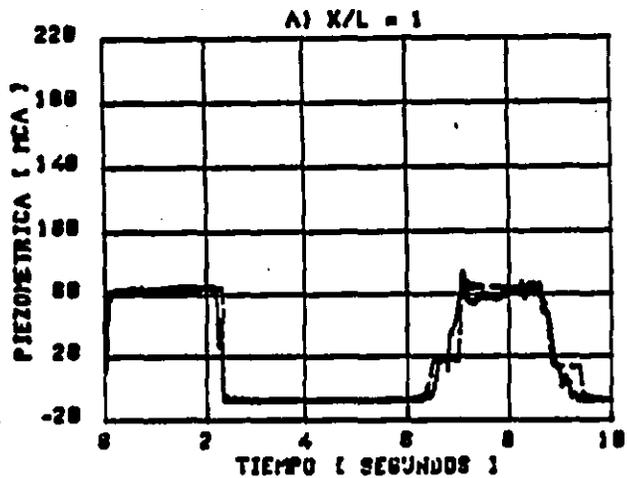


FIGURA 4.10 Separación severa prueba 10, — medición ---- cálculo

obtenidos con el modelo numérico para una $K = 0$ y los registros medidos a lo largo de la tubería. En general, se observa que el modelo reproduce con muy buena aproximación el registro medido en todos los puntos observados en la tubería. En todos los casos, la predicción de la amplitud máxima es muy buena. En cuanto a la presión mínima, se observan pequeñas diferencias ya que, como se comentó en la sección 4.3, sólo en el extremo aguas abajo se impone la condición de separación y presión mínima igual a h_v . Sin embargo, las diferencias encontradas no fueron significativas y del análisis experimental se sabe que la presión mínima en cada sección de la tubería es igual a h_v . Se observa principalmente en la prueba 10 (fig 4.10), un defasamiento del cálculo con respecto a las mediciones en el segundo golpe.

4.5.3 Verificación numérica de la relación J vs $h^*_{\text{máx}}$

En el capítulo anterior se mostró la existencia de una relación experimental entre la sobrepresión máxima normalizada $h^*_{\text{máx}}$ y el parámetro J que toma en cuenta la severidad del transitorio. En esta sección se pretende verificar dicha relación utilizando el modelo puntual. Para el efecto, se realizaron cálculos con dicho modelo para diferentes condiciones de la velocidad V_0 y la carga piezométrica h_0 . Dichos cálculos incluyen las condiciones de las pruebas experimentales y se han incluido cálculos adicionales para otras condiciones de flujo establecido. Los valores utilizados oscilan entre 0.35 y 1.07 m/s para V_0 y entre 16 y 100 m para h_0 . Estos rangos cubren por demás los valores utilizados en la etapa experimental pues producen valores de J que van de 0.906 a 1.276 .

En la figura 4.11 se muestran los resultados del modelo numérico en el cual se ha utilizado $K = 0$ (Δ) y además se han incluido los valores experimentales (x). Como puede verse, la relación numérica es acorde con la experimental para valores de J menores de 0.97 y para valores mayores de 1.05. En cambio para valores de $0.97 < J < 1.05$ se observa una gran diferencia, ya que el modelo predice en este rango valores de $h^*_{\text{máx}}$ superiores al valor medido para $J = 1.014$ ($h^*_{\text{máx}} = 1.43$), e incluso el modelo predice valores para $h^*_{\text{máx}}$ superiores a dos (hasta $h^*_{\text{máx}} = 2.62$ para $J = 1$).

En esta etapa del estudio es difícil explicar la causa de esta diferencia. No es posible asociar esos errores a la hipótesis de celeridad constante, pues para las pruebas de separación severa, el modelo reproduce muy bien los resultados experimentales.

Será entonces importante buscar posteriormente la causa de la diferencia observada, a fin de obtener buenos resultados con el modelo numérico para todo el rango de experimentación.

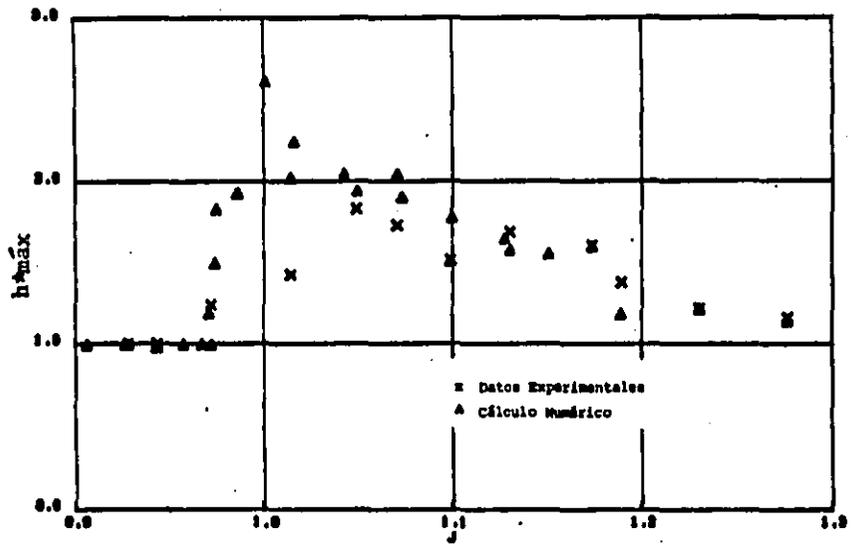


FIGURA 4.11 Relación numérica y experimental entre los parámetros J y $h^*_{\text{máx}}$

5. SEPARACION DE COLUMNA POR LA ENTRADA DE AIRE

En el capítulo anterior pudo verificarse la bondad del modelo numérico propuesto para los resultados experimentales de separación de columna por la vaporización del agua. Ahora, se pretende verificar el modelo para los casos de separación de columna por entrada de aire. Para tal efecto, se cuenta con los registros de presión transitoria obtenidos en dos instalaciones de bombeo; el acueducto Armería-Manzanillo y el acueducto Uspanapa-La Cangrejera. En cada caso, se realiza una descripción del sistema, se muestran los registros de presión transitoria y finalmente se comparan estos con los registros obtenidos del cálculo numérico.

5.1 Análisis del transitorio hidráulico en el acueducto Armería - Manzanillo

En febrero de 1987 el Instituto de Ingeniería, por petición de la SARH, realizó una campaña de mediciones en el acueducto Armería - Manzanillo. Este acueducto consta de dos partes. La primera, con una longitud de 41 855 m, comprendida entre la zona de pozos cercana a la ciudad de Armería, Colima y el tanque de regulación Campos, y la segunda, comprendida entre el tanque Campos y el tanque La Joya (fig 5.1).

Es en esta segunda conducción (tanque Campos - tanque La Joya) donde se realizaron las pruebas que se detallan más adelante. El agua es impulsada por 5 bombas verticales de 200 HP cada una. En la figura 5.2 se observa el arreglo en planta de los 5 equipos. Como puede observarse en la figura 5.3 la descarga tiene un diámetro de 0.254 m y cuenta con una válvula de admisión de aire, una válvula duocheck y una válvula de seccionamiento. El gasto de cada bomba es colectado en un múltiple de descarga (fig 5.2), cuyo diámetro es de 0.610 m y constituye de hecho el inicio de la conducción. La tubería de conducción tiene un diámetro de 0.762 m y una longitud de 4 250 m, es de acero y termina en el tanque La Joya, siendo el desnivel estático de aproximadamente 80 m. El dispositivo para el control del transitorio hidráulico de esta parte de la conducción es una válvula de alivio conectada al múltiple de descarga, que puede ser aislada por medio de una válvula de compuerta en caso de que así se requiera (fig 5.4).

Para la instrumentación del acueducto se emplearon los siguientes elementos:

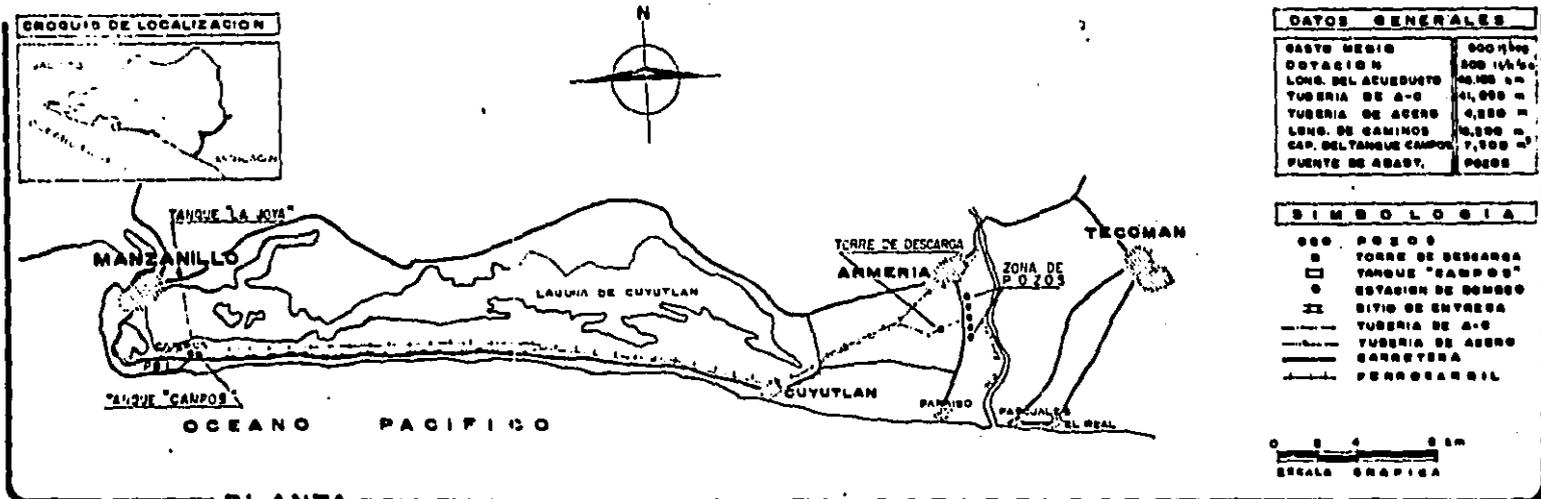


FIGURA 5.1 Esquema del acueducto Armeria-Manzanillo

CARCAMO DE BOMBEO

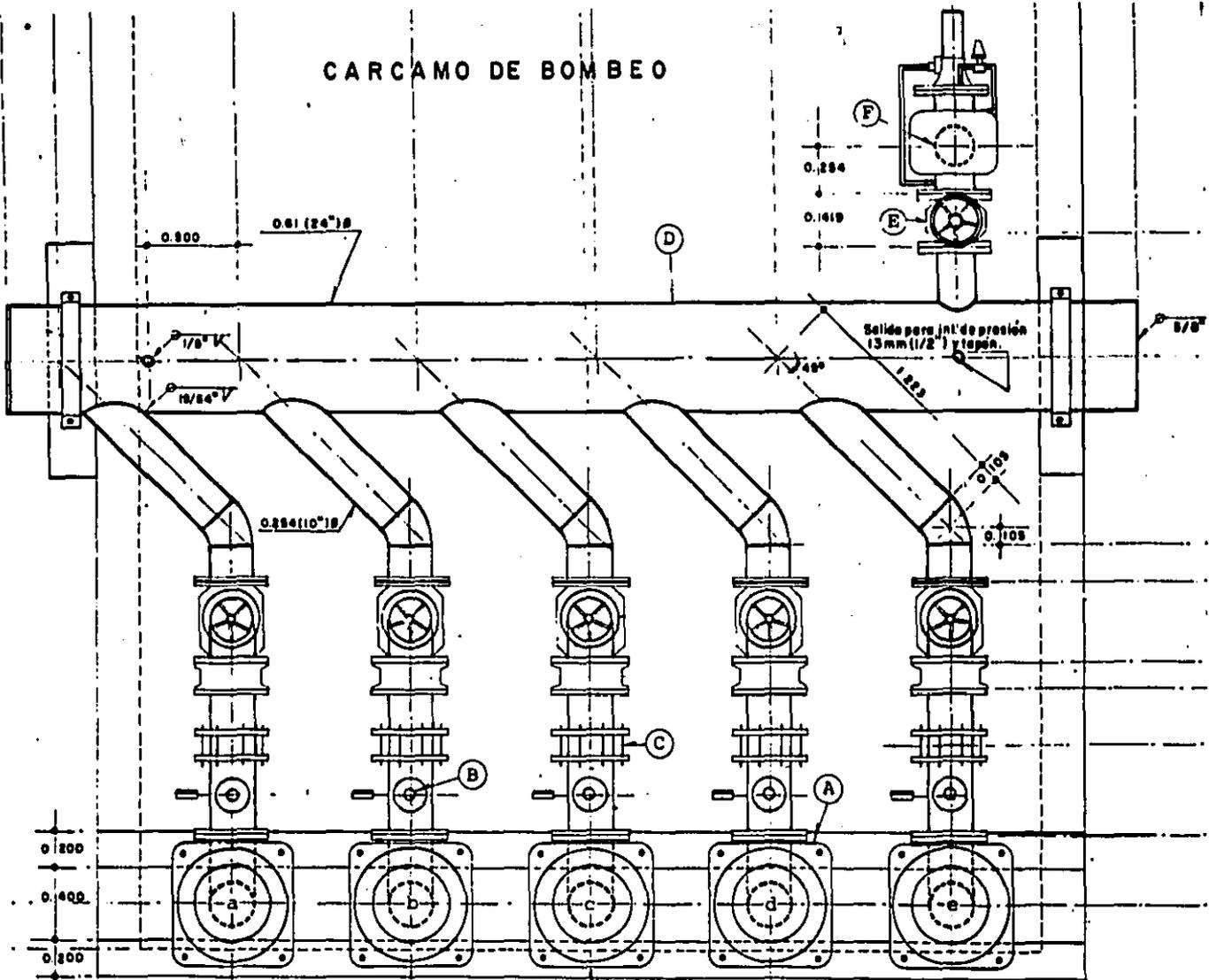


FIGURA 5.2 Esquema en planta del equipo de bombeo en el tanque Campos

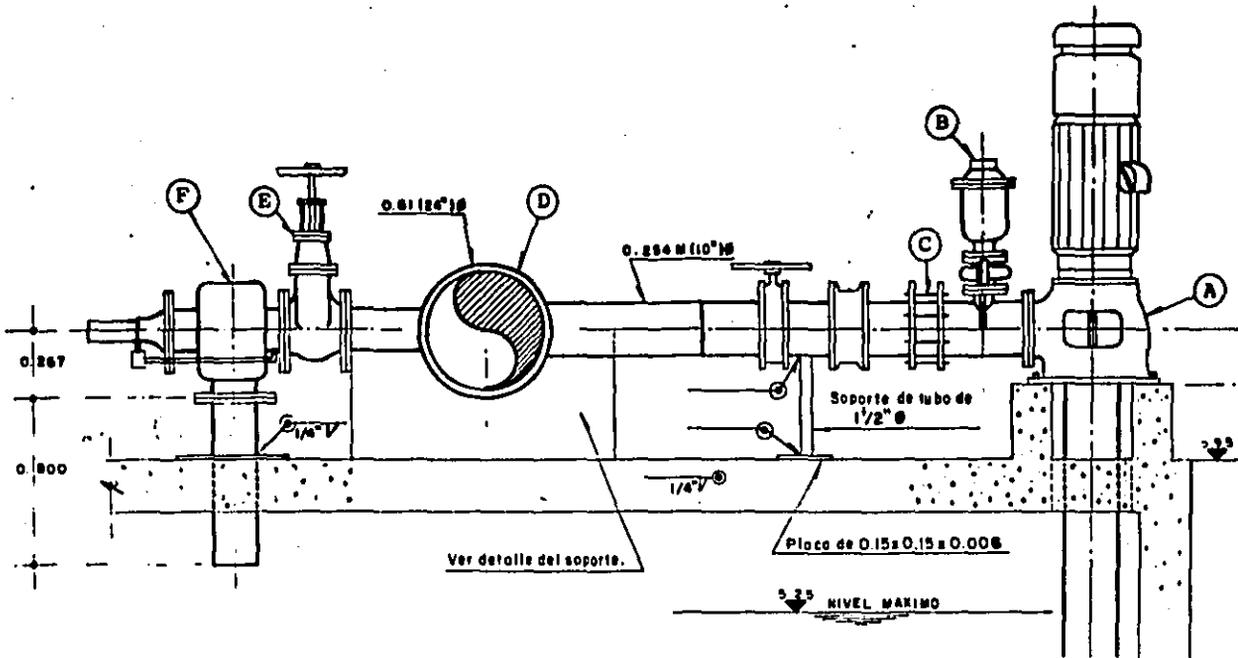


FIGURA 5.3 Perfil de los equipos de bombeo:

- A) Bomba
- B) Válvula de admisión de aire
- C) Válvula duocheck
- D) Múltiple de descarga
- E) Válvula de seccionamiento
- F) Válvula de alivio

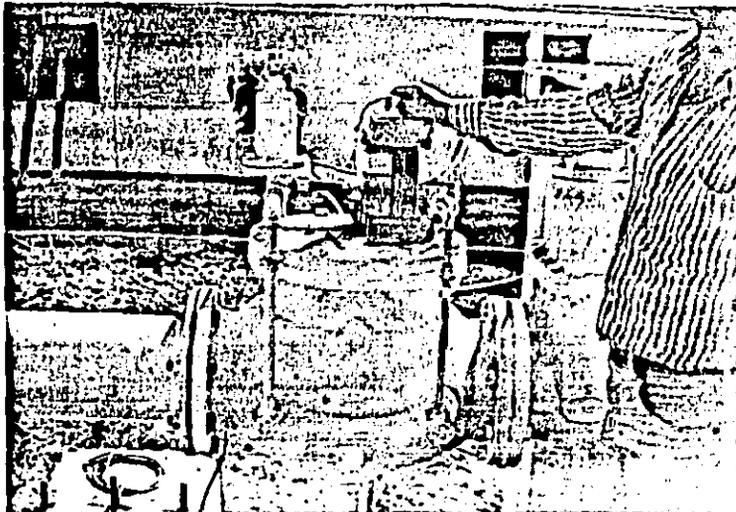


FIGURA 5.4 Válvula de alivio

- a) Tacómetro electrónico (fig 5.5). Con este dispositivo fue posible registrar la velocidad de giro de una bomba durante el paro de los equipos.

- b) Transductores electrónicos de presión. Se utilizaron transductores con un rango de presión absoluta de 0 a 703 100 kg/m² ubicados uno en la descarga de la bomba e (fig 5.2) y otro en el múltiple de descarga.

- c) Acondicionadores de señal (fig 5.6). Se utilizaron para la amplificación de la señal y el filtrado de la misma, ya que la alimentación del equipo se realizó con corriente alterna.

- d) Registrador en papel fotosensible (fig 5.6). Se trataba de un registrador Honeywell 1508A Visicorder , con el cual fue posible obtener los registros de presión y del giro de la bomba.

- e) Manómetros de Bourdon. Se instalaron tres manómetros, uno en la descarga de la bomba, otro en el múltiple de descarga y el último en la llegada al tanque La Joya, cuyos rangos fueron de 0 a 21 kg/cm² para los dos primeros y 0 a 7 kg/cm² para el tercero.

En esta campaña de mediciones se realizaron diversas pruebas tanto en flujo establecido como en flujo transitorio producido por el disparo de los equipos [ref 16]. Dichas pruebas corresponden al funcionamiento y disparo de uno, dos y tres equipos, con y sin el uso



FIGURA 5.5 Tacómetro acoplado a una de las bombas

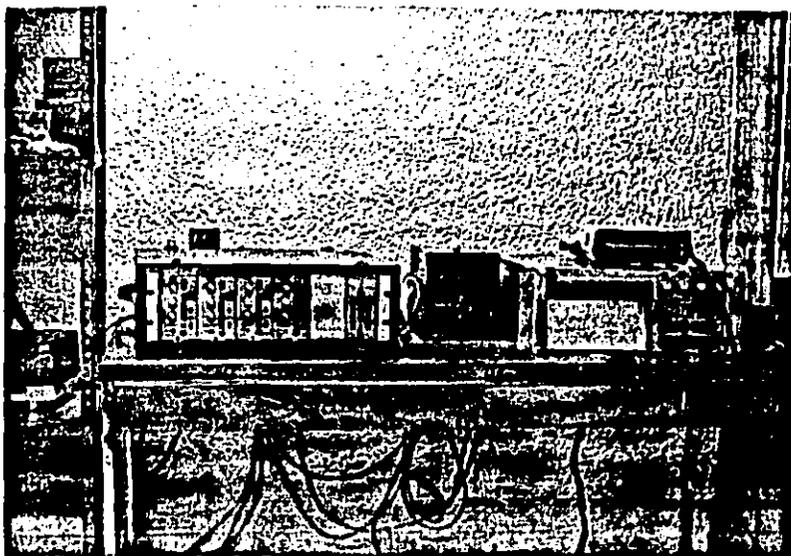


FIGURA 5.6 Amplificadores y registrador

de la válvula de alivio. Para efectos de este trabajo solo interesa la prueba en que se realizó el disparo de tres equipos sin el funcionamiento de la válvula de alivio, ya que como se verá más adelante en estas condiciones se produjo una depresión tal que originó la entrada de aire por las válvulas de admisión. La entrada de aire fue tal que parte del mismo pudo alojarse aguas abajo de las válvulas de retención, que al cerrar provocaron que este aire quedara atrapado en el extremo aguas arriba de la conducción. La secuencia seguida para la realización de esta prueba, en la cual no se utilizó la válvula de alivio fue la siguiente:

- i) Se pusieron en funcionamiento tres equipos (c, d y e) y se dejó trabajando el acueducto por largo tiempo para permitir que se estableciera el flujo.
- ii) Se realizó el aforo midiendo volumétricamente el gasto que llegaba al tanque La Joya, que para este caso fue de $0.385 \text{ m}^3/\text{s}$.
- iii) Se midieron las presiones en la descarga de las bombas, en el múltiple de descarga y en la llegada al tanque La Joya, que resultaron ser de 81.3 mca en los dos primeros y 0 en el segundo (funcionamiento como canal). Con estos datos se calculó el coeficiente de fricción de la tubería que resultó igual a 0.013.
- iv) Se tomaron los valores de referencia de los transductores (presión atmosférica) y del tacómetro electrónico ($N = 1,774 \text{ rpm}$), y se procedió a su instalación.

- v) Se puso en marcha el registrador y acto seguido se realizó el disparo simultáneo de los tres equipos.

En las figuras 5.7 y 5.8 se muestran la velocidad de giro de la bomba e y la presión transitoria en el múltiple de descarga. Obsérvese, en la figura 5.7, que la bomba paró en un tiempo aproximadamente igual a 5 segundos. En la figura 5.8 se observa la caída de presión debida al paro de la bomba; nótese que este descenso de presión queda limitado a un valor de 6.6 m sobre el plano horizontal de referencia (nivel medio del mar), con lo cual la piezométrica coincide con la cota del eje de la tubería , ésto permite asegurar que la válvula de admisión funcionó permitiendo el ingreso de aire a la línea y el establecimiento de la presión atmosférica en este punto. En esta figura se observa también que la onda de depresión regresa como onda de sobrepresión, originando un golpe que muestra una espiga característica del fenómeno de separación de columna. Finalmente, debe señalarse que a pesar de que la tubería de descarga en el tanque La Joya trabaja parcialmente llena, los resultados muestran que esta frontera se comporta como una de nivel constante. Esto puede deberse a que en una distancia corta (500 m), se tiene un ascenso de la tubería de 70 m y esta situación provoca que este extremo se comporte como una torre de oscilación inclinada imponiendo en consecuencia un nodo de presión.

5.2 Análisis del transitorio en el acueducto Usapanapa-La Cangrejera

El acueducto Usapanapa - La Cangrejera está ubicado en el estado de

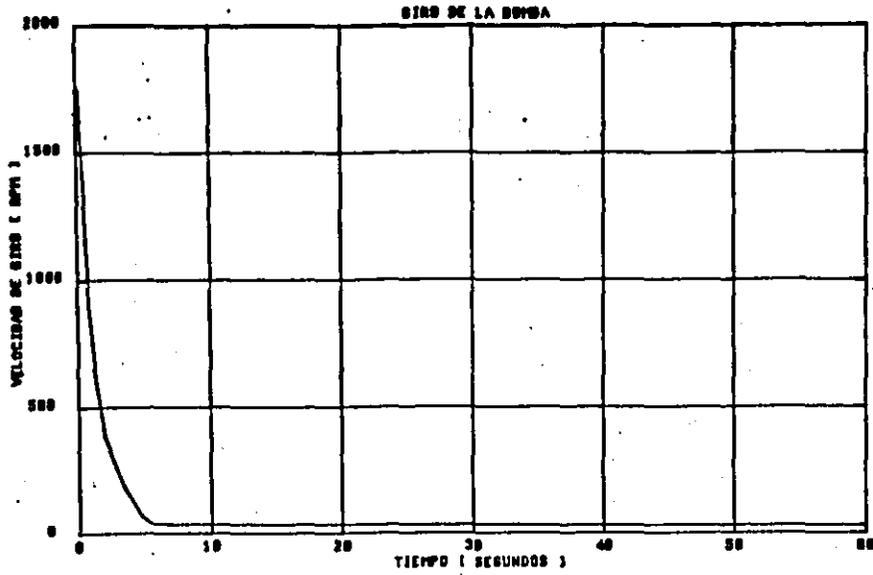


FIGURA 5.7 Registro de movimiento de la bomba

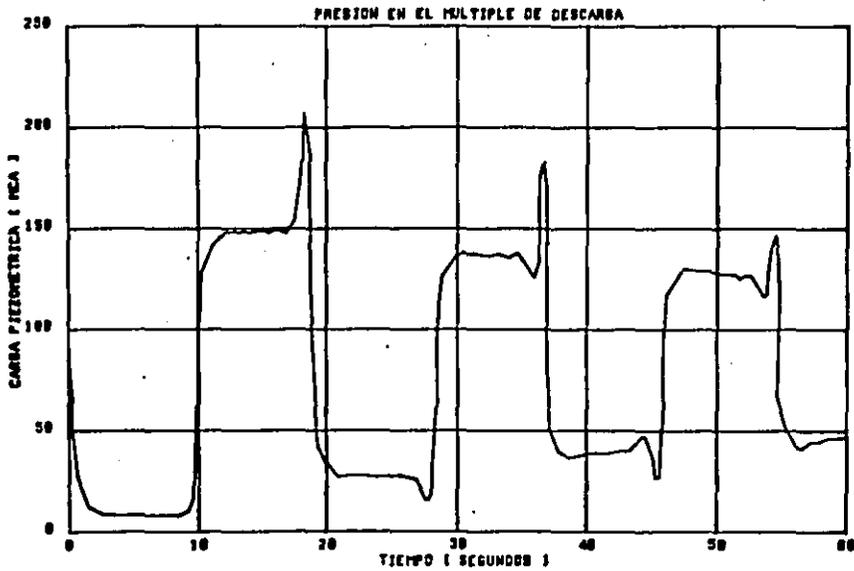


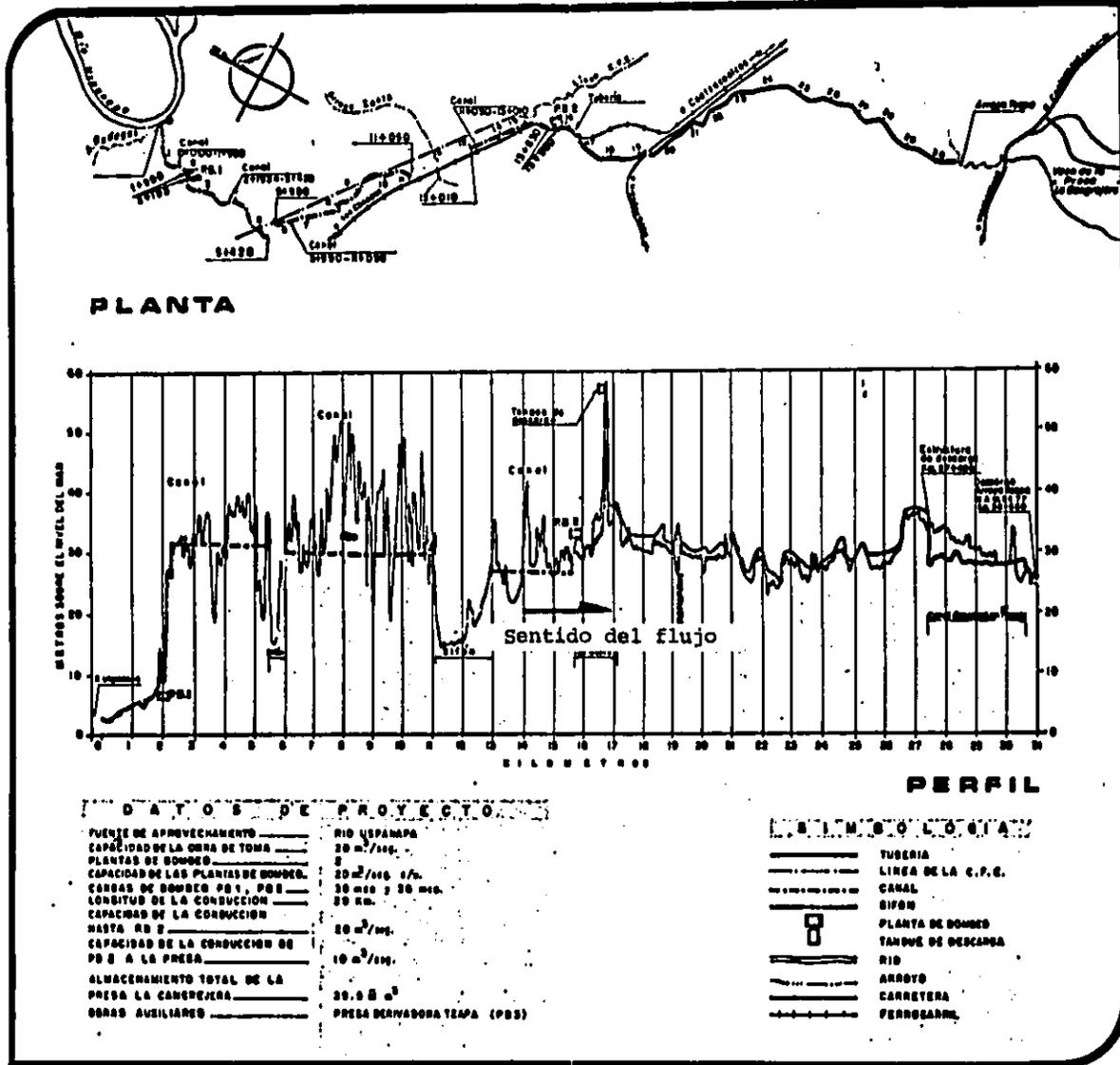
FIGURA 5.8 Registro de presión transitoria en el múltiple de descarga

Veracruz muy cerca de la ciudad de Coatzacoalcos. Consta de dos plantas de bombeo (fig 5.9). Ambas plantas cuentan con bombas centrífugas de eje vertical, cada una con una capacidad de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para una carga dinámica total de 38 m, por lo que requieren para su trabajo motores de 1 500 HP cada uno. En 1984 el Instituto de Ingeniería realizó una campaña de mediciones en ambas plantas de bombeo, donde se habían notado fuertes sobrepresiones después del disparo de los equipos.

En la planta de bombeo 1 hay dos bombas instaladas cuyas descargas, con un diámetro de 1.067 m, cuentan con una válvula de admisión de aire y una válvula de tipo check (fig 5.10). Estas dos tuberías se unen en un múltiple de descarga de acero con 1.219 m de diámetro. Ahí se inicia la conducción de 205 m de longitud. Esta tubería descarga a un tanque elevado donde se inicia la conducción a superficie libre hacia la planta de bombeo 2. En esta planta el dispositivo para el control del transitorio hidráulico es nuevamente una válvula de alivio conectada al múltiple de descarga, siendo también posible su seccionamiento.

Para la instrumentación de dicha planta se utilizó básicamente el mismo equipo que se detalló en la sección anterior. Para esta prueba, como en el caso del acueducto anterior, no se utilizó la válvula de alivio. La prueba se realizó en forma similar también a la anterior, con la operación de una sola bomba y realizando el disparo de la misma. En este caso el gasto en flujo establecido fue de $2.75 \text{ m}^3/\text{s}$, valor obtenido de la curva característica de la bomba.

FIGURA 5.9 Esquema del acueducto Uspanapa-La Cangrejera



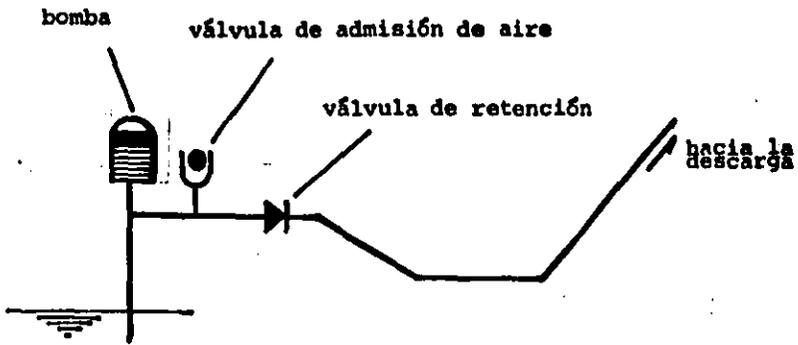


FIGURA 5.10 Perfil de la descarga de las bombas de la planta de bombeo uno

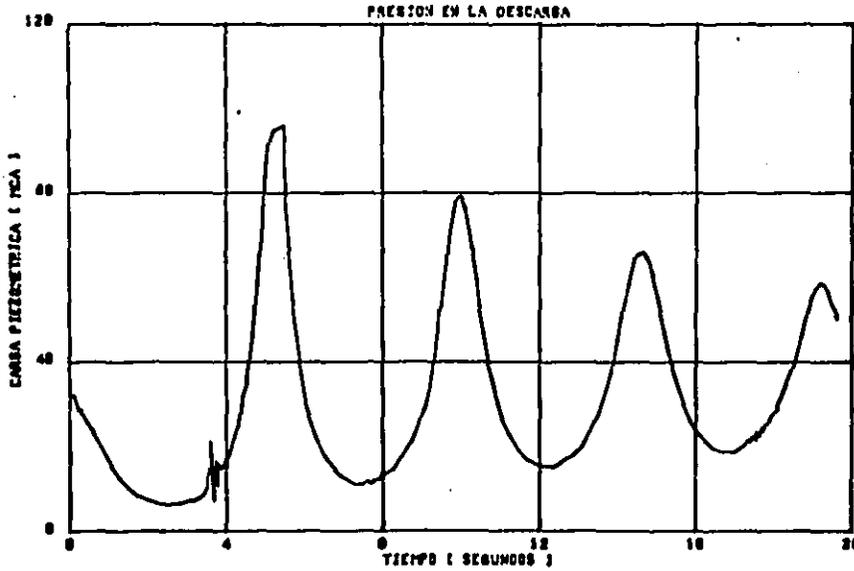


FIGURA 5.11 Registro de presión transitoria aguas abajo de la válvula de retención

En la figura 5.11 se muestra el registro de presión transitoria obtenido aguas abajo de la valvula check. En esta figura se puede observar que la piezométrica mínima alcanzada fue de 8 m sobre el plano horizontal de referencia (nivel medio del mar) y, dado que este valor coincide con la cota de la válvula de admisión, se puede asegurar el ingreso de aire a la tubería. Además, debe observarse que el período de las fluctuaciones de presión, que es del orden de 4.6 segundos, no corresponde al período de las fluctuaciones por golpe de ariete (0.8 segundos). Este hecho pone de manifiesto la presencia de aire en la tubería, que en parte puede deberse al arrastre de aire durante el arranque de la bomba hasta el extremo aguas abajo de la válvula check (fig 5.10).

Finalmente, la presencia de aire se detectó directamente abriendo la válvula de la toma para la medición de presión colocada aguas abajo de la válvula check, una vez terminado el registro de presión transitoria.

5.3 Comparación de los registros de presión transitoria con el modelo numérico

En las secciones anteriores se mostraron los registros de presión transitoria en la descarga de las bombas de dos acueductos. En ambos casos, se pudo observar la entrada de aire a la conducción, lo que originó la separación de columna.

En el capítulo 4 se dieron los elementos básicos para la simulación de la separación de columna y se realizó la aplicación de este modelo a

los resultados experimentales del capítulo 3, donde la separación de columna se presentaba en el extremo aguas abajo. En los acueductos vistos anteriormente el análisis es más complicado y esto no se debe a la simulación de la separación de columna, sino a la presencia de las bombas y de las válvulas de retención.

Para la simulación de las válvulas de retención y de las plantas de bombeo se utilizaron los procedimientos ampliamente detallados en diversas referencias [1, 20 y 21].

En el caso de la separación de columna por la entrada de aire se aplicó el modelo puntual presentado en la sección 4.3 con las siguientes dos diferencias; por un lado la ubicación de la frontera de separación y por otro la presencia de una burbuja de aire en lugar de una de vapor de agua.

En cuanto a la frontera de separación ahora se ubica en el extremo aguas arriba, mientras que en el extremo aguas abajo se tiene un tanque de carga constante. Esto significa que los desarrollos del capítulo anterior son válidos con tal de utilizar la ecuación de la característica correspondiente en cada caso y corregir el sentido de los gastos en la ecuación de continuidad. Así, la ecuación 4.34 se sustituye por la siguiente

$$Q_p = C_n + C_a h_p \quad (5.1)$$

la ecuación 4.26 por

$$h_p = \frac{C_n}{C_a} \quad (5.2)$$

y finalmente la ecuación 4.31 por

$$\psi_p = \psi + \frac{\Delta t}{2} (Q + Q_p) \quad (5.3)$$

En cuanto a que es aire y no vapor de agua lo que contiene la burbuja de separación, es necesario recordar que se produce el ingreso de aire cuando la carga piezométrica instantánea corta la cota de la válvula de admisión y en este punto se fija la presión atmosférica (h_a), por lo que la ecuación 4.32 se transforma en

$$h_p = h_a \quad (5.4)$$

adicionalmente, en la ecuación 4.30 deberá utilizarse el valor de la constante del gas correspondiente al aire ($R = 29.24 \text{ Kg m/Kg}_m \text{ } ^\circ\text{K}$).

En la figura 5.12 se superponen, para el acueducto Armería-Manzanillo, los registros correspondientes a las mediciones de campo y al cálculo numérico. Como puede observarse, el modelo reproduce muy bien la forma del registro de campo en el primer ciclo de sobrepresión no siendo tan bueno para los ciclos posteriores. Se observan algunas diferencias en lo relativo al tiempo que dura la separación de columna por ingreso de aire, siendo esta diferencia del orden del 10 % del valor medido. Dicha diferencia, origina un defasamiento de ambos registros. Además debe

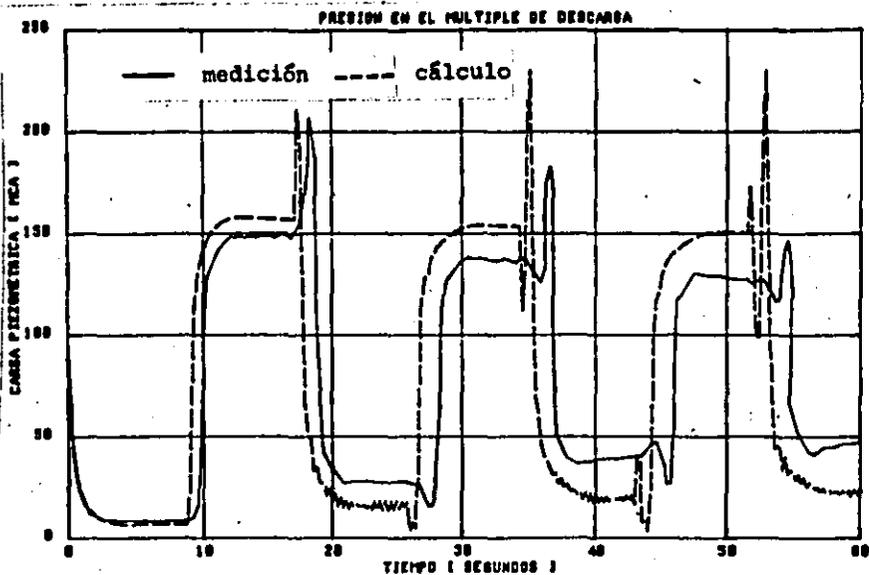


FIGURA 3.12 Registro de presiones medidas y calculadas en el acueducto Armería-Manzanillo

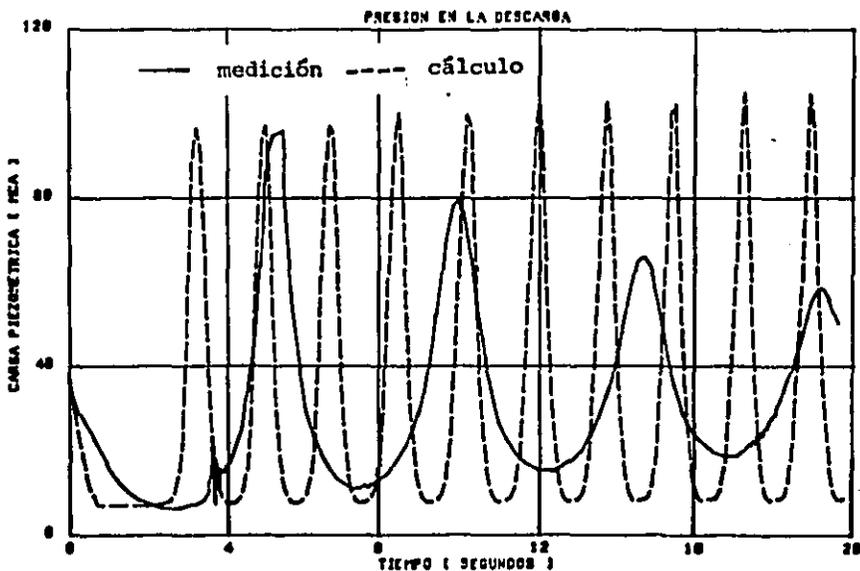


FIGURA 5.13 Registro de presiones medidas y calculadas en el acueducto Usapanapa-La Cangrejera

notarse que el modelo no reproduce el efecto del amortiguamiento que sufre el registro medido en golpes posteriores al primero. Sin embargo, debe notarse que en cuanto al primer golpe no sólo se reproduce bien la forma del registro, sino que además la amplitud máxima calculada es prácticamente igual a la medida.

En la figura 5.13 se observan, para el acueducto Uspanapa - La Cangrejera, los registros de las medidas realizadas y los resultados numéricos. Nótese que en este caso existe nuevamente un defasamiento de la onda y el mismo problema de diferencia en el período de oscilación solo que en este caso es más acentuado, ya que mientras en el registro de campo es de aproximadamente 4.6 segundos, el cálculo da un valor de 1.46 segundos.

De las comparaciones anteriores se observa una buena aproximación del modelo numérico en la predicción de la amplitud en el primer golpe, lo que es en sí el resultado de mayor importancia, pues es este primer golpe el que produce la máxima presión registrada. El problema de la falta de amortiguamiento del modelo numérico, puede explicarse principalmente debido a que el modelo no considera las disipaciones de energía por deformaciones inelásticas de la tubería y en menor grado debido a que considera constante al factor de fricción de Darcy - Weisbach durante el transitorio.

En conclusión, puede decirse que si bien se ha observado que existen diferencias entre el modelo numérico y los registros de campo, éstas no son de mayor importancia y si en cambio el modelo muestra una gran

confiabilidad en la estimación de la máxima amplitud registrada en condiciones de separación de columna.

6. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones más importantes de la tesis.

a) Antecedentes

Si bien el análisis de las presiones causadas por la separación de columna ha sido ampliamente estudiado en la literatura tanto en forma experimental como teórica, no se encontró ninguna metodología para el cálculo de dichas presiones que fuera completamente satisfactoria. En cambio, fue posible constatar la posibilidad de caracterizar experimentalmente el fenómeno por medio de un parámetro que tome en cuenta las condiciones del flujo establecido y además destaca también la posibilidad de generalizar la aplicación del

método de las características a los problemas de separación de columna. Por último, se pudo constatar que si bien los fenómenos de vaporización del agua y entrada de aire en un conducto a presión son diferentes, su comportamiento cuando se trata de flujo transitorio es muy semejante, ya que en ambos casos se trata de la separación del flujo en el interior de la conducción producida por una burbuja de vapor de agua y gases o simplemente aire.

b) Estudio experimental

Por medio de una instalación experimental fue posible realizar una serie de pruebas de separación de columna por vaporización del agua. Estas pruebas consistieron en el cierre rápido de una válvula localizada en el extremo aguas abajo de la instalación, para diferentes condiciones de presión y velocidad en flujo establecido. El principal resultado de este estudio experimental consistió en encontrar que, bajo ciertas condiciones, la máxima sobrepresión se registra en el segundo golpe y excede el valor que predice la fórmula de Joukowsky para el primer golpe. Se estableció una relación experimental entre el parámetro J , que toma en cuenta la severidad del transitorio en condiciones de separación de columna, y la máxima ordenada del registro normalizado de presión transitoria $h^*_{\text{máx}}$. Dicha relación muestra que en ningún caso el incremento máximo de presión excede en dos veces el incremento que predice la fórmula de Joukowsky, obteniéndose un máximo de $h^*_{\text{máx}} = 1.83$ para $J = 1.050$. Además, esta relación permitió agrupar los transitorios con separación de columna en tres tipos: separación incipiente para

$0.943 < J < 1.000$, separación intermedia para $1.000 < J < 1.190$ y separación severa para $1.190 < J < 1.276$, siendo en la condición de separación intermedia donde se encontraron los mayores valores de la sobrepresión. Se estableció un criterio sencillo que permite estimar la máxima sobrepresión en un sistema simple donde se produce la separación de columna por el cierre de una válvula localizada en su extremo aguas abajo. Finalmente, parece factible la generalización de los resultados obtenidos para el cierre de una válvula ubicada en el extremo aguas arriba a otros casos, sin embargo se considera más viable realizar trabajo experimental en los casos que sea posible.

c) Modelación numérica del fenómeno

Se desarrolló un modelo de cálculo numérico que reproduce con muy buena aproximación la evolución de la presión transitoria por lo menos hasta el segundo golpe. El modelo se basa en suponer que la separación se concentra en el extremo final de la tubería y considera que en la etapa de separación la presión en la burbuja se mantiene constante, mientras que para la etapa del segundo golpe la velocidad de condensación de la burbuja se ha controlado por medio de un parámetro que permite considerar desde una condensación casi instantánea de la burbuja, hasta un proceso de compresión y expansión sin condensación. Las comparaciones de los resultados del modelo de cálculo con los registros experimentales permitieron realizar la calibración del modelo y se encontró que en la modelación del fenómeno es más importante el proceso de compresión

de la burbuja que su condensación. Por último, se comparó la relación experimental J vs $h^*_{m\acute{a}x}$ con los resultados del modelo numérico, obteniéndose buenos resultados salvo en el caso de $0.97 < J < 1.05$. Esta diferencia deberá ser analizada con detalle en posteriores análisis del fenómeno.

d) Separación de columna por la entrada de aire

El modelo numérico desarrollado para la separación de columna por la vaporización del agua fue aplicado también a problemas de separación por ingreso de aire a la conducción. Para lo anterior se mostraron los registros de presión transitoria en el extremo inicial de dos sistemas de bombeo que cuentan con válvulas de admisión de aire y válvulas de retención en la descarga de las bombas. Las comparaciones de estos registros de presión con los resultados del modelo numérico resultaron muy satisfactorias, sobre todo en lo que se refiere a la estimación de la máxima sobrepresión transitoria.

Por último, es oportuno decir que actualmente en el Instituto de Ingeniería se han desarrollado experimentos en la instalación produciendo la separación de columna por el cierre rápido de una válvula localizada en su extremo aguas abajo. También en este caso, el modelo numérico predice con muy buena aproximación el comportamiento transitorio de la presión. Por lo anterior puede decirse que podrá ser factible adecuar el modelo para su aplicación en sistemas industriales donde la separación puede producirse en puntos intermedios de la conducción.

REFERENCIAS

- [1] Chaudhry, M. H., Applied Hydraulic Transients , Van Nostrand Reinhold Company. New York 1979.
- [2] Wiggert, D. C. y Sundquist, M. J. The Effect of Gaseous Cavitation on Fluid Transients , Jour. of Fluids Engineering, Vol. 101, Marzo 1979, pp 79-86.
- [3] Kranenburg, C., Gas Release During Transient Cavitation in Pipes, Jour. of Hyd. Div. ASME, Vol. 100, Octubre 1974, pp 1383-1398.
- [4] Safwat, H. H. Photographic Study of Water Column Separation, Jour. of Hyd. Div., ASCE, Vol. 98, Abril 1972, pp 739-747.
- [5] Brown, R. J., Water-Column Separation at Two Pumping Plants, Jour. Basic Engineering , ASME, Diciembre 1968, pp 521-531.
- [6] Vreugdenhil, C. B. et al, Investigation Into Cavitation in Long Horizontal Pipes Caused By Water-Hammer, Transactions of

the 6th Symposium of the Section of Hydraulic Machinery, Equipment and Cavitation, IAHR, Roma, Italia, Septiembre 1972, vol.1 Paper J3, p 13.

- [7] Baltzer, R. A., Column Separation Accompanying Liquid Transients in Pipes, Jour. of Basic Engineering, ASME, Diciembre 1967, pp 837-846.
- [8] Weyler, M. E. et al, An Investigation of the Effect of Cavitation Bubbles on the Momentum Loss in Transients Pipe Flow, Jour. of Basic Engineering, ASME, Marzo 1971, pp 1-10.
- [9] Kalkwijk, J. P. y Krenenburg, C., Cavitation in Horizontal Pipelines due to Water Hammer, Jour. Hyd. Div., ASCE, Vol 97, Octubre de 1971, pp 1585-1604.
- [10] Safwat, H. H. y Polder, J. V., Experimental and Analytic Data Correlation Study of Water Column Separation, Transactions ASME, Jour. of Fluids Engineering, Vol. 95, 1973, pp 91-97.
- [11] Driels, M. R., An Investigation of Pressure Transients in a System Containing a Liquid Capable of Air Absorption, Transactions ASME, Septiembre 1973, pp 408-414.
- [12] Martin, C. S., Experimental Investigation of Column Separation with Rapid Closure of Downstream Valve, Proceedings 4th International Conference on Pressure Surges. Septiembre 1983, Paper B3, pp 77-88 .
- [13] Carmona, P. R. Análisis Teórico-Experimental del Fenómeno de Separación de Columna en Tuberías Horizontales, Instituto de Ingeniería, UNAM, Marzo 1987.
- [14] Streeter, V. L. y Wylie, E. B., Hydraulic Transients, McGraw-Hill Book Co., New York 1967.

- [15] Safwat, H. H. et al, Generalized Application of the Method of Characteristics for the Analisis of Hydraulic Transients Involving Empty Sections, Proceedings 5th Int. Conf. on Pressure Surges, Hannover, Septiembre 1986, Paper F3, pp 157-167.
- [16] Aguilar, M. L. et al, Resultados y Análisis de las Mediciones del Transitorio Hidráulico en el Acueducto Armerfa-Manzanillo, Instituto de Ingeniería, UNAM, Marzo 1987.
- [17] Carmona, P. R. Resultado de las Mediciones de Campo y Alternativas de Solución al Problema de Altas Presiones por Corte de Bombeo en el Acueducto Rio Usapanapa-La Cangrejera, Instituto de Ingeniería, UNAM, Marzo 1986.
- [18] Peters, R. y Sámano, G. A., Equipo Auxiliar de Acondicionadores de Señal Usados en el Proyecto. Diseño Preliminar del Acueducto Chapala-Guadalajara, Instituto de Ingeniería, UNAM, Noviembre 1984.
- [19] Guarga, F. R. et al, Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión, Fascículo II, Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre 1985.
- [20] Guarga, F. R. et al, Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión, Fascículo III, Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre 1985.
- [21] Carmona P. R. y Aguilar M. L., Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión, Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 11, No. 1, II Epoca. Enero/Abril 1987, pp 29-52.
- [22] Carmona, et al, A Simplified Procedure to Evaluate Liquid Column Separation Phenomena and its Possible Extension to Air

Inclusion Problems. Trabajo enviado para su publicacion a la revista Water Power.

AGRADECIMIENTOS

Quiero manifestar mi más profundo agradecimiento al M. en I. Rafael Carmona P. por todo el tiempo y esmero dedicado en la dirección de la tesis. Del mismo modo quiero hacer extensivo mi reconocimiento a los Sres. Eduardo Estrella S. y Amador Sámano G. por su colaboración en el trabajo experimental, a los Ings. Yunuén Guevara G. y Gabriel Castillo H. por su asesoría en los trabajos de computación y al M. en I. Lázaro Aguilar M. por su valiosa ayuda en la revisión del manuscrito.