

GOLPE DE ARIETE: UN ESTUDIO TEORICO - EXPERIMENTAL

J. Angel Sáinz Borda
Agustín Ascorbe Salcedo
J. Andrés Liaño Herrera
Dres. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*

Se analiza el fenómeno transitorio originado por la parada brusca de la bomba en una instalación de bombeo simple. Se presenta un modelo matemático basado en el método de las características, con formulaciones matemáticas sencillas para las condiciones de contorno junto a la bomba, y se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos con el mismo, para distintos valores de los parámetros, y las medidas efectuadas en varias instalaciones.

It is analyzed the transitory phenomenon originated by the abrupt stop of the pump at simple pumping station. It is introduced a mathematical model on the method of the characteristics, with simple mathematic formulations for the boundary conditions near the pump, and it is carried out an comparative analysis of the resultates obtained with the same, for several values of the parameters, and the measures carried out in various installations.

1. Introducción

El golpe de ariete es un problema clásico en Mecánica de Fluidos, habiendo correspondido a N.E. Joukowski y a L. Allievi el establecimiento de los fundamentos básicos de su análisis, entre 1897 y 1903.

Desde esa fecha han sido muy numerosos los estudios llevados a cabo por diferentes autores sobre el tema, tanto en lo relativo a procedimientos de cálculo como al diseño y a la caracterización de dispositivos de protección, sin que, a pesar de ello, el tema pueda considerarse cerrado.

En esa línea, dentro del marco del Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico, se estableció un Convenio de Colaboración entre la empresa Talleres Valentín Ibáñez Fuente y la Fundación Leonardo Torres Quevedo

de la Universidad de Cantabria, para el análisis de la Válvula de Retención Múltiple Polanco.

Una parte del citado análisis ha consistido en la obtención de medidas experimentales, del fenómeno transitorio originado por la parada brusca de la bomba, en una serie de instalaciones de bombeo equipadas con el citado tipo de válvulas, lo cual ha posibilitado la realización de un análisis teórico-práctico de su comportamiento, al amparo del cual se han deducido algunas conclusiones de carácter más general.

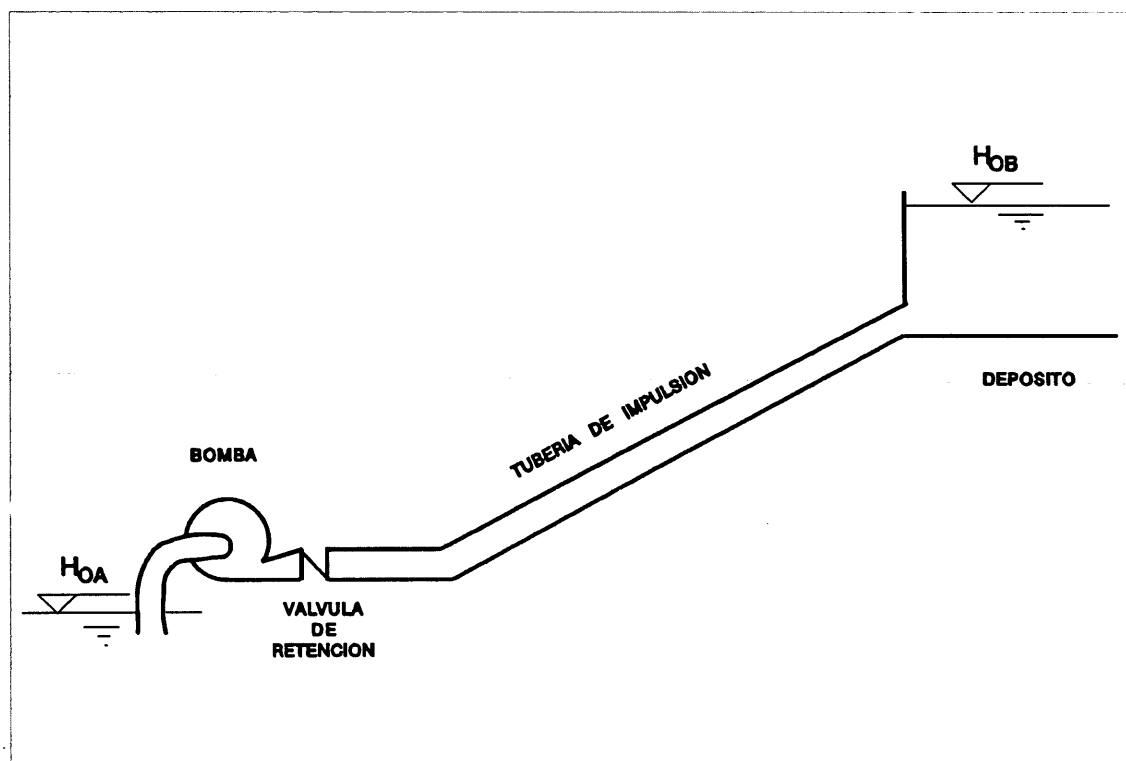
2. Esquema de la instalación tipo

El análisis se ha centrado en instalaciones de bombeo simple, como la esquematizada en la figura 1. Este tipo de instalación, a pesar de su sencillez, tiene un gran interés desde el punto de vista práctico debido a su frecuente utilización en abastecimientos de agua, regadíos, trasvases, etc.

(*) Profesores Titulares de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Cantabria.

Recibido en ROP: febrero 1994.

Figura n° 1.- Esquema de la instalación



Las medidas reales se han efectuado en cuatro estaciones de bombeo cuyas características, facilitadas por el personal a cargo de las mismas, se resumen en el cuadro n° 1.

Todas ellas están equipadas con válvulas de retención múltiple Polanco, que constan de un diafragma de acero al carbono, tratado con poliamida, con múltiples orificios circulares que se cierran, como se indica en el esquema de la figura 2, mediante pequeñas válvulas de acero inoxidable y

neopreno, provistas de muelles, que también son de acero inoxidable.

3. Modelo teórico

Considerando, como hipótesis de carácter general, que el fluido es homogéneo y monofásico, que el flujo es unidimensional y que las pérdidas de carga se asimilan a las de rozamiento en régimen estacionario con la misma velocidad, se llegan a establecer las ecuaciones que rigen el fe-

Cuadro n° 1.- Datos básicos de las instalaciones

	Ampuero 1	Ampuero2	Forjas	Reinosa
L (m)	300	300	45	168
D (mm)	350	600	400	250
Material	Hormigón	Fibrocem	Acero	Fundición
Q_0 (lts/s)	50	150	125	100
H_0 (m)	69.50	70.15	43.00	43.70

nómeno transitorio de golpe de ariete en la forma siguiente:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + gI = 0$$

$$\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + V \operatorname{sen} \alpha = 0$$

de acuerdo con la notación indicada al final.

Para su resolución se propone la utilización del método de las características, que convierte las ecuaciones anteriores en un par de ecuaciones diferenciales ordinarias, limitadas por otras dos relativas a las direcciones de integración válidas en el plano x-t.

Representando la pérdida de carga por rozamiento mediante la ley de Darcy-Weisbach, y suponiendo despreciable el valor de 'V' frente al de 'a', se llega finalmente al siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \operatorname{sen} \alpha + \frac{afV|V|}{2gD} = 0$$

$$\text{para } \frac{dx}{dt} = a$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + V \operatorname{sen} \alpha - \frac{afV|V|}{2gD} = 0$$

$$\text{para } \frac{dx}{dt} = -a$$

Asimilar las pérdidas de carga instantáneas del régimen transitorio a las de un régimen estacionario con la misma velocidad constituye una práctica habitual, aún a sabiendas de que ello conduce generalmente a un amortiguamiento muy lento del fenómeno, que no suele coincidir con la realidad.



Figura n° 2.- Válvula de retención múltiple Polanco

Otra alternativa es la de añadir un sumando que tenga en cuenta las pérdidas de carga debidas exclusivamente a la transitoriedad del fenómeno. Ello conduce a formulaciones complejas, como la propuesta por Vardy et al. (1993), entre otros.

El criterio utilizado en el presente estudio ha sido el de introducir un factor multiplicador "F" de las pérdidas de carga del régimen estacionario, que afecta directamente al valor del coeficiente "f" de Darcy-Weisbach durante el fenómeno transitorio y que pretende incluir, además de la citada pérdida de carga, la influencia de otros factores como pequeños movimientos y vibraciones de la tubería, que disipan una importante cantidad de energía.

Desde un punto de vista general, el proceso a seguir para la obtención de la pareja de valores

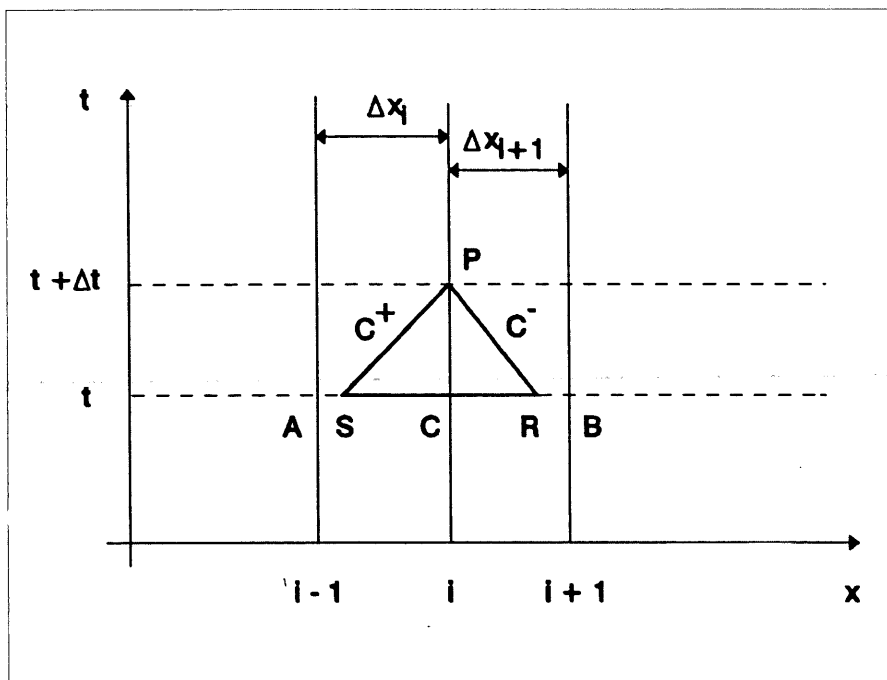


Figura n° 3.-Esquema del algoritmo de resolución

(H,V) correspondiente a un determinado punto en el instante $t+\Delta t$, en función de los valores en los diferentes puntos en el instante t , es el que se esquematiza en la figura 3, siendo $i-1, i, i+1, \dots$, los puntos de cálculo, separados $\Delta x_{i-1}, \Delta x_i, \Delta x_{i+1}$, etc. El máximo valor de Δt está definido por la condición de estabilidad de Courant ($\Delta t \leq \Delta x_i / a_i$).

Con el esquema de la figura 1, la condición de contorno en el extremo final de la tubería es muy sencilla: la altura piezométrica es constante e igual a H_{0B} .

Sin embargo, en el extremo de aguas arriba hay que distinguir diferentes etapas y situaciones, como son la deceleración de la bomba y el cierre de la válvula de retención, entre otras.

El análisis riguroso del comportamiento de la bomba durante el tiempo T que tarda en producirse la parada de la misma presenta muchas dificultades, derivadas fundamentalmente del hecho de no poder disponer en la práctica de los datos necesarios. Por ello, se propone un modelo simplificado, admitiendo que la variación de la velocidad se ajusta a la siguiente ley:

$$V = V_0 \left[1 - \left(\frac{t}{T} \right)^\beta \right]$$

En un principio, se ha adoptado un valor de $\beta = 1$, lo cual es bastante acorde con los resultados presentados por Provoost (1980), Thorley (1983) y Koetzier et al. (1986).

Para la estimación del valor de T se puede hacer uso de la fórmula propuesta por E. Mendiluce en 1965:

$$T = C + \frac{KLV}{gH_m}$$

siendo los valores de C y K función de la altura manométrica y de la longitud de la tubería de impulsión.

Una vez producido el cierre de la válvula, la condición de contorno pasa a ser $V = 0$, siempre que el valor de la altura piezométrica resultante sea mayor o igual que H_{0A} .

Aguas abajo de la válvula se pueden producir depresiones que den lugar, aunque la bomba se encuentre parada, a un flujo de agua en sentido positivo. En este caso, la condición de contorno viene dada por:

$$H = H_{0A} - K_1 V^2$$

Por último, si se producen condiciones de cavitación, la condición de contorno junto a la válvula se convierte en:

$$H = K_2$$

A modo de resumen, en el gráfico de la figura 4 se representan las diferentes condiciones de contorno correspondientes al extremo inicial de la tubería.

4. Medidas reales

Para la realización de las medidas se ha sustituido el manómetro que habitualmente se coloca al comienzo de la tubería de impulsión por un captador electrónico de presión, con respuesta li-

neal en el rango de 0-34 Kg/cm², conectado a un Portable Computer Charisma PK-101, AT-12 Mhz, equipado con una tarjeta DMP-011B para lectura de datos.

Mediante el software diseñado al efecto, se han procesado los valores obtenidos en el fenómeno transitorio asociado a la parada de los equipos de bombeo, representándolos en forma gráfica y precisando también los valores extremos en forma numérica.

A modo de ejemplo, en el gráfico de la figura 5 se muestran los resultados correspondientes a una de las medidas efectuadas en la estación de Ampuero 2, cuyas características principales se han resumido en el cuadro n° 1.

Además del interés intrínseco que presenta el conocimiento de las sobrepresiones y depresiones y su variación en el tiempo, las medidas efectuadas permitan cuantificar otros aspectos, como son:

- pérdidas de carga en la tubería de impulsión, como diferencia entre la presión de trabajo y la presión estática.

- tiempo de parada de la bomba, adoptando para ello como valor el tiempo transcurrido entre la desconexión del motor y el instante en que se registra la presión mínima.

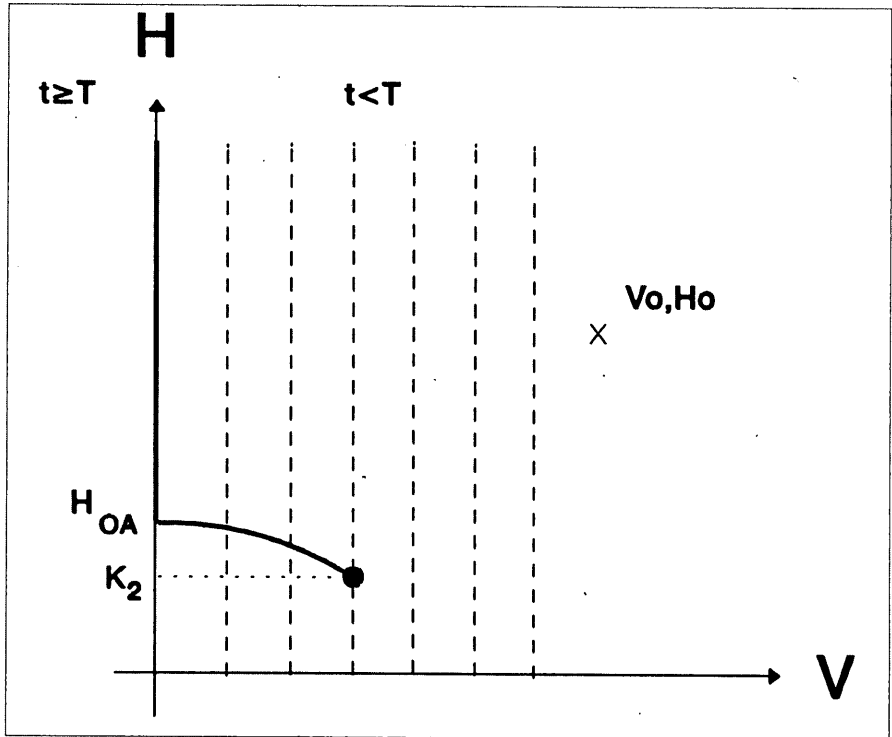


Figura n° 4.- Condiciones de contorno junto a la válvula de retención

- celeridad de la onda de presión, teniendo en cuenta que el período del fenómeno transitorio es 4 L/a.

5. Simulación mediante modelo

Con base en la modelización propuesta en el apartado 3, se han realizado varios tipos de simulaciones, diferenciándose unos de otros tan sólo en los datos de caracterización del fenómeno

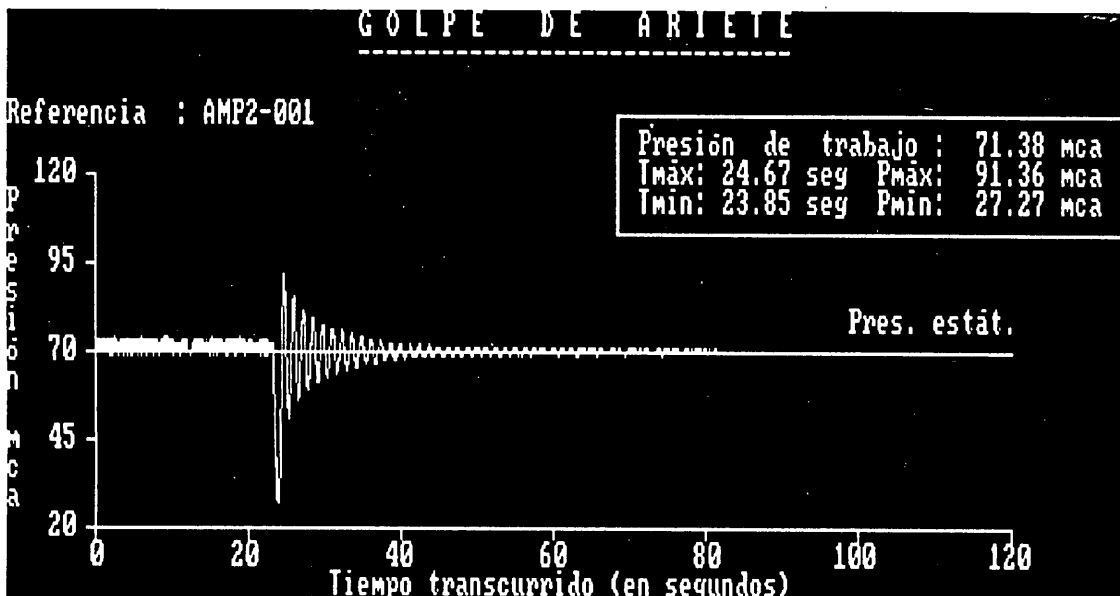


Figura n° 5.- Ampuero 2. Medidas reales

Cuadro n° 2.- Valores teóricos de los parámetros

Estación	Pérdida de carga (m)	Celeridad (m/seg)	T. de parada (seg)
Ampuero 1	0.46	1210	1.28
Ampuero 2	0.14	1000	1.27
Forjas	0.10	1110	0.20
Reinosa	2.25	1200	2.27

transitorio; ya que, en todos los casos, los datos básicos (longitud y diámetro de la tubería, desnivel y caudal) han sido los reflejados en el cuadro n° 1.

En el primero de ellos, denominado tipo 1, se han adoptado como valores de la pérdida de carga, de la celeridad de la onda y del tiempo de parada, los reflejados en el cuadro n° 2. Dichos valores se han determinado mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, la fórmula clásica de la celeridad de onda para fluido poco compresible y tubería elástica de pared delgada y la fórmula de Mendiluce, respectivamente, a partir de los datos reales de las instalaciones, algunos de los cuales figuran en el cuadro n°1.

Por otro lado, en las simulaciones del tipo 2, los valores adoptados para las variables antes mencionadas han sido los reflejados en el cuadro n° 3, deducidos, como ya se ha indicado, a partir de las medidas efectuadas. Comparándolos con los correspondientes del cuadro n° 2, se observan diferencias apreciables.

En un tercer tipo de simulaciones, establecido a partir del denominado tipo 2, se han tanteado además diferentes valores del factor F, con objeto de intentar reflejar, de la mejor manera posible, el amortiguamiento del fenómeno transitorio.

6. Análisis comparativo

Con objeto de contrastar la validez de la modelización propuesta, valorar sus posibilidades en cuanto a predicción de presiones máximas y mínimas y cuantificar la influencia de algunos factores, se ha realizado un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los distintos tipos de simulaciones, considerando diferentes aspectos y puntos de vista.

Habida cuenta de la importancia que tiene, para el correcto dimensionamiento de la tubería, el conocimiento de las presiones máxima y mínima, en los cuadros n° 4 y n° 5 se resumen los valores extremos correspondientes a los distintos casos y a las distintas metodologías utilizadas para su determinación. Hay que resaltar que en las

Cuadro n° 3.- Valores de los parámetros deducidos de las medidas

Estación	Pérdida de carga (m)	Celeridad (m/seg)	T. de parada (seg)
Ampuero 1	0.54	820	0.77
Ampuero 2	1.25	940	0.75
Forjas	0.70	750	0.55
Reinosa	2.65	1230	1.09

Cuadro n° 4.- Presiones máximas junto a la válvula, en t/m².

Estación	Medidas	Simulación con modelo			F. de Michaud	
		tipo1	tipo 2	tipo 3	tipo 1	tipo 2
Ampuero 1	112.51	83.8	108.2	107.1	94.3	110.8
Ampuero 2	91.36	73.6	102.6	94.8	95.5	113.4
Forjas	51.70	64.3	52.5	50.9	88.6	59.6
Reinosa	82.10	47.7	86.5	85.5	74.4	107.7

Cuadro n° 5.- Presiones mínimas junto a la válvula, en t/m²

Estación	Medidas	Simulación con modelo			F. de Michaud	
		tipo 1	tipo 2	tipo 3	tipo 1	tipo 2
Ampuero 1	27.92	45.0	28.4	28.4	44.7	28.2
Ampuero 2	27.27	44.9	27.5	27.4	44.8	26.9
Forjas	31.80	-0.04	26.8	26.8	-2.6	26.4
Reinosa	4.74	14.1	-0.06	-0.06	13.0	(*)

(*) rotura de columna líquida.

simulaciones tipo 1 y tipo 2 el valor del factor F es igual a 1, mientras que en las simulaciones tipo 3 dicho valor ha resultado diferente para cada instalación, según se indica más adelante.

En ambos casos, las dos últimas columnas contienen los valores obtenidos mediante la aplicación de la fórmula de Michaud ($\Delta H = \pm 2LV_0/gT$), considerando como valores de los parámetros los calculados teóricamente y los deducidos a partir de las medidas, respectivamente. La utilización de esta fórmula en lugar de otras está justificada por tratarse de casos de parada lenta.

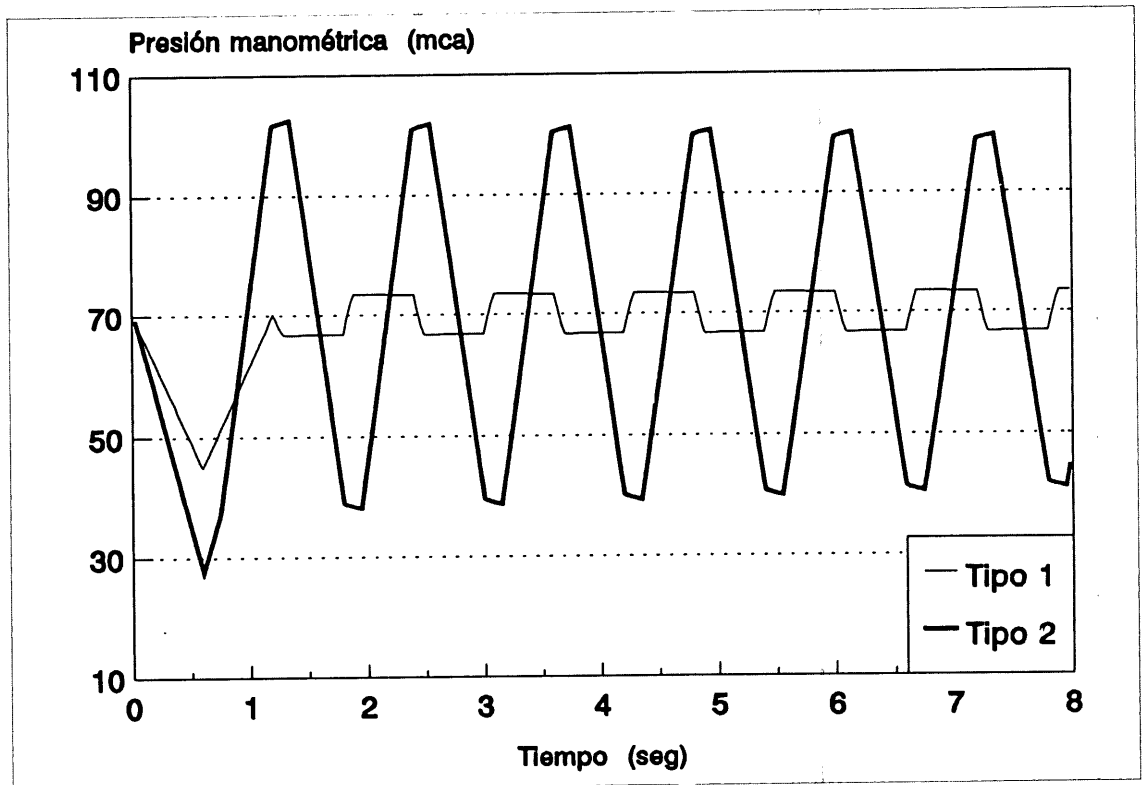
Se observa que los resultados de las simulaciones del tipo 3 son los que mejor concuerdan, con un grado de coincidencia más que notable, con las medidas reales efectuadas. Las discrepancias con las simulaciones del tipo 1 se ponen de manifiesto con mayor claridad al analizar la evolución temporal del fenómeno.

Así, en la figura 6 se representan los resultados obtenidos mediante las simulaciones del tipo 1 y del tipo 2 en la instalación de Ampuero2, cuyas medidas reales se han mostrado en la figura 5. Se puede observar que las modificaciones en los datos afectan no sólo al período de oscilación sino también a la amplitud del fenómeno oscilatorio y que, en ambos tipos de simulación, el amortiguamiento se produce de manera muy lenta.

La influencia del valor de F, que es el único parámetro que se modifica entre las simulaciones del tipo 2 y las del tipo 3, se manifiesta fundamentalmente en el amortiguamiento del fenómeno, como se puede ver en los gráficos de la figura 7, existiendo no obstante una ligera repercusión en los valores de las presiones máximas, como se deduce del cuadro n° 4.

Siguiendo con el análisis de los valores extremos de las presiones, en los cuadros n° 4 y n° 5

Figura n° 6.- Ampuero 2.
Comparación entre simula-
ciones de tipo 1 y tipo 2.



se observa que los calculados mediante la fórmula de Michaud, tanto para los valores teóricos de los parámetros como para los deducidos a partir de las medidas, presentan discrepancias considerables con las medidas. Dichas discrepancias son menores para las presiones mínimas en los cálculos del tipo 2, salvo para la instalación de Reinosá.

Extendiendo el análisis a la evolución temporal del fenómeno, en las figuras 8 a 11 se muestra, para cada una de las instalaciones consideradas, la comparación entre las medidas efectuadas y los resultados de las simulaciones del tipo 3, observándose una concordancia muy grande en todos los casos.

En las instalaciones de Ampuero1 y de Ampuero 2 (figuras 8 y 9), los valores adoptados para el factor multiplicador F han sido 5 y 35, respectivamente. En ambos casos se ha supuesto variación lineal de la velocidad durante la parada de la bomba ($\beta = 1$).

En las instalaciones de Forjas y de Reinosá (figuras 10 y 11), los valores adoptados para el factor multiplicador han sido 200 y 20, respectivamente. Las líneas de trazos corresponden a simulaciones efectuadas con la hipótesis inicial

de $\beta=1$, observándose discrepancias considerables con las medidas en la primera fase de depresión y una concordancia grande en el resto del proceso, lo cual ha planteado algunas dudas sobre el cumplimiento, en estos casos, de la hipótesis inicial de variación lineal de la velocidad y ha llevado a la necesidad de considerar otras leyes de variación.

Así, en las citadas figuras 10 y 11, la línea continua corresponde a la simulación efectuada con un valor de $\beta=1.5$, manteniendo inalterados el resto de los parámetros. Se observa una mejora notable en el ajuste de la primera fase de depresión. Es importante resaltar que la modificación del valor de β no afecta prácticamente al resto del proceso, en el que se sigue observando una gran concordancia entre medidas y resultados de la simulación.

7. Conclusiones

Aunque el estudio se ha realizado sobre un número reducido de instalaciones, el hecho de haber podido disponer de medidas precisas durante el fenómeno transitorio ha permitido extraer algunas conclusiones de interés, habida cuenta de que las citadas medidas han posibilitado la determinación indirecta de los valores reales de los

parámetros fundamentales (celeridad de la onda, tiempo de parada de la bomba, etc).

En lo que hace referencia a la modelización, se ha llegado a la conclusión de que es posible representar el fenómeno transitorio producido tras la parada de la bomba, en instalaciones equipadas con válvula de retención, mediante un sencillo modelo, basado en el método de las características, con formulaciones matemáticas muy simples de las condiciones de contorno junto a la bomba, siempre que los valores de los parámetros sean los adecuados.

Para el establecimiento del modelo se han realizado una serie de hipótesis cuya validez se ve corroborada por los resultados obtenidos.

Una de estas hipótesis es la relativa al comportamiento ideal de la válvula de retención situada aguas abajo de la bomba. A la vista de los resultados, dado que todas las instalaciones analizadas estaban equipadas con válvulas de retención múltiple Polanco, cabe señalar, como conclusión de carácter particular, que el comportamiento del citado tipo de válvulas se aproxima mucho al ideal, es decir, su cierre se produce prácticamente en el mismo instante en que se anula la velocidad del agua en la tubería de impulsión, junto a la válvula.

Se ha podido comprobar que la hipótesis de variación lineal de la velocidad durante la parada de la bomba no siempre conduce a resultados muy satisfactorios en la primera fase de depresión, si bien es cierto que la consideración de otras leyes de variación (diferentes valores de β) mejora este aspecto sin alterar notablemente la simulación del resto del proceso.

De los gráficos de resultados comparativos se deduce que, considerando un valor adecuado para el factor (F) multiplicativo del factor f de pérdidas, se puede representar de manera muy satisfactoria el amortiguamiento del fenómeno transitorio, lo cual constituye, a nuestro juicio, una conclusión interesante.

Respecto al valor a adoptar para el citado factor F , lo aquí realizado, basado en procedimientos iterativos de ajuste, constituye un primer paso frente a posibles análisis futuros, en los que se

Figura nº 7.- Ampuero 2. Influencia del valor de F .

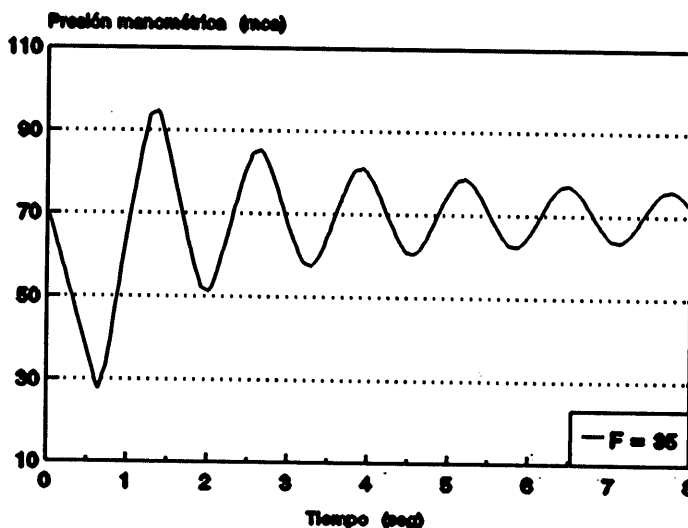
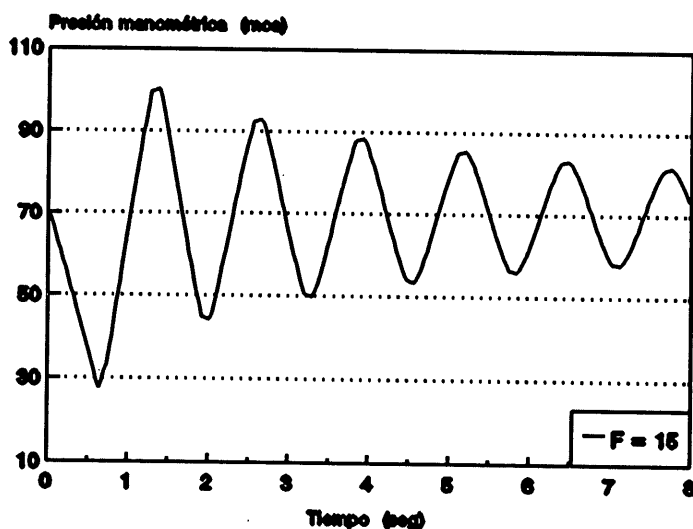
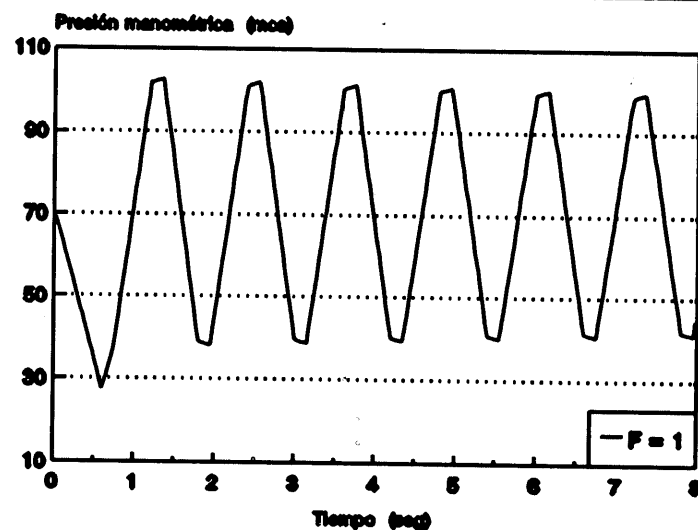


Figura n° 8.- Ampuero 1.
comparación entre la
simulación de tipo 3 y las
medidas reales

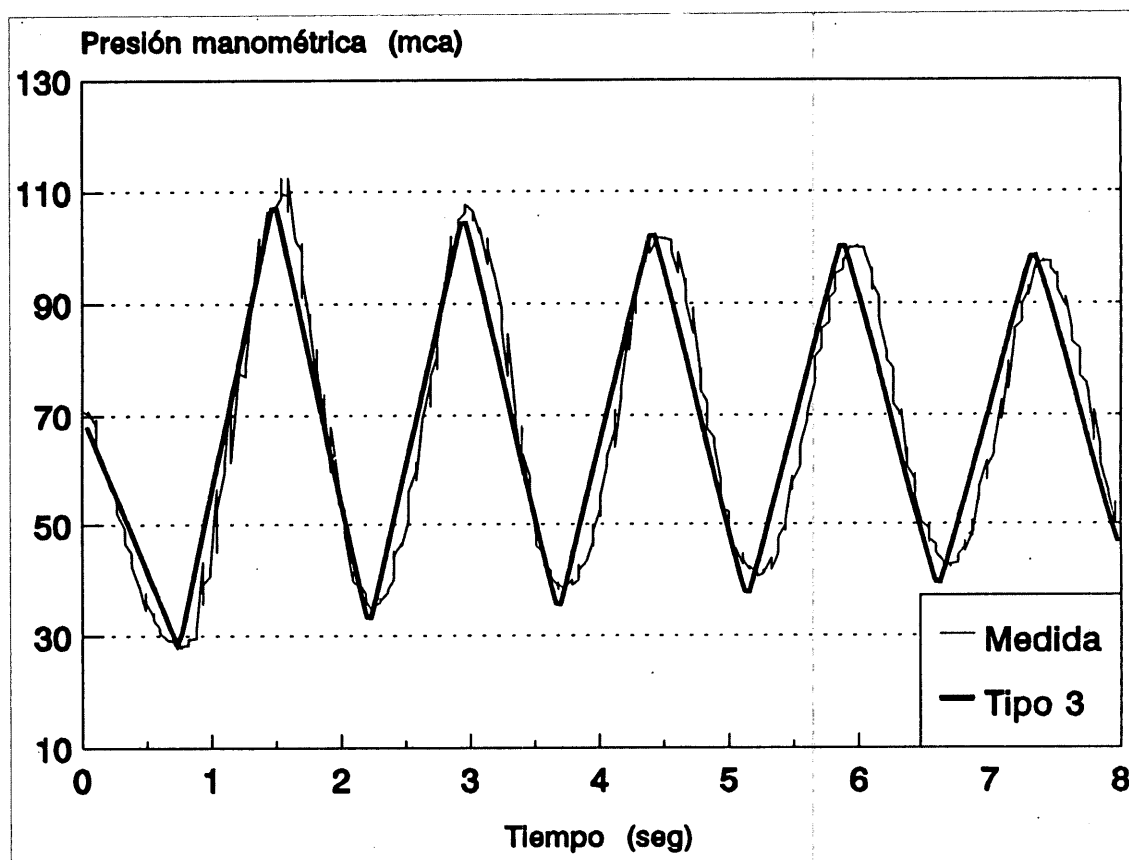
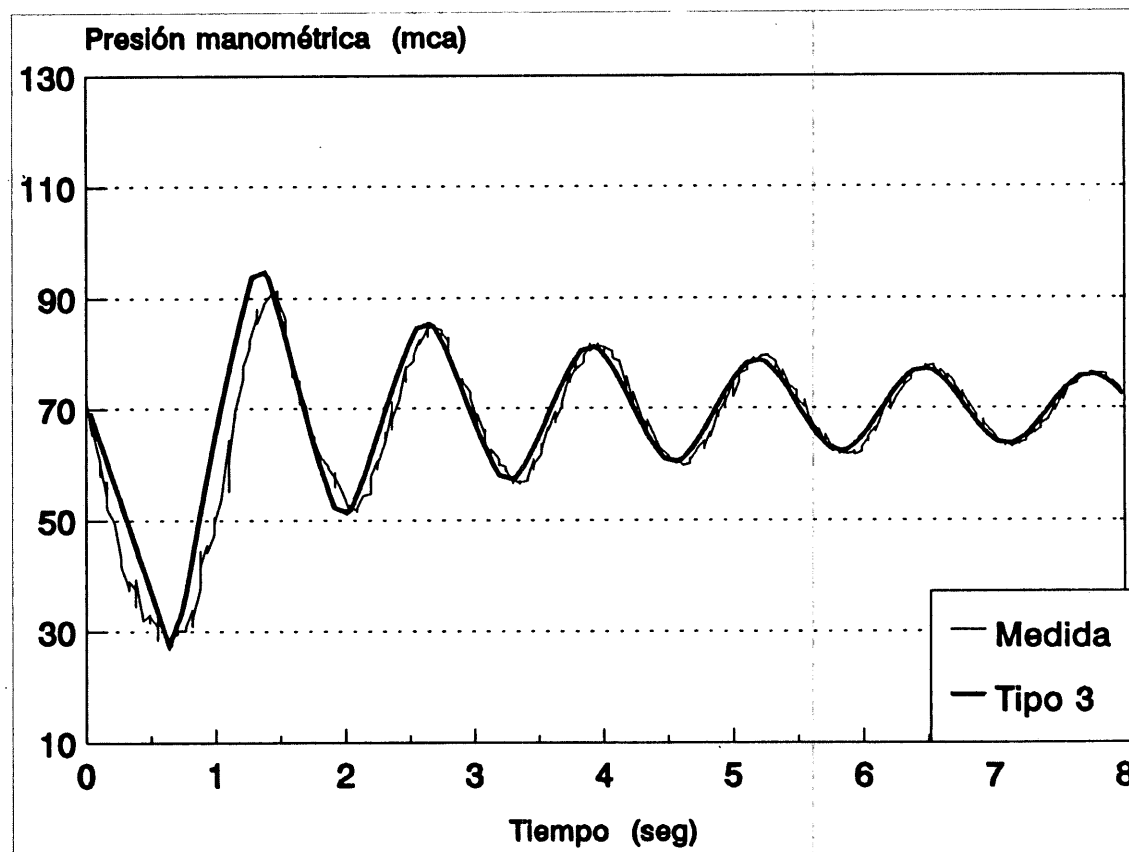


Figura n° 9.- Ampuero 2.
Comparación entre la
simulación de tipo 3 y las
medidas reales.



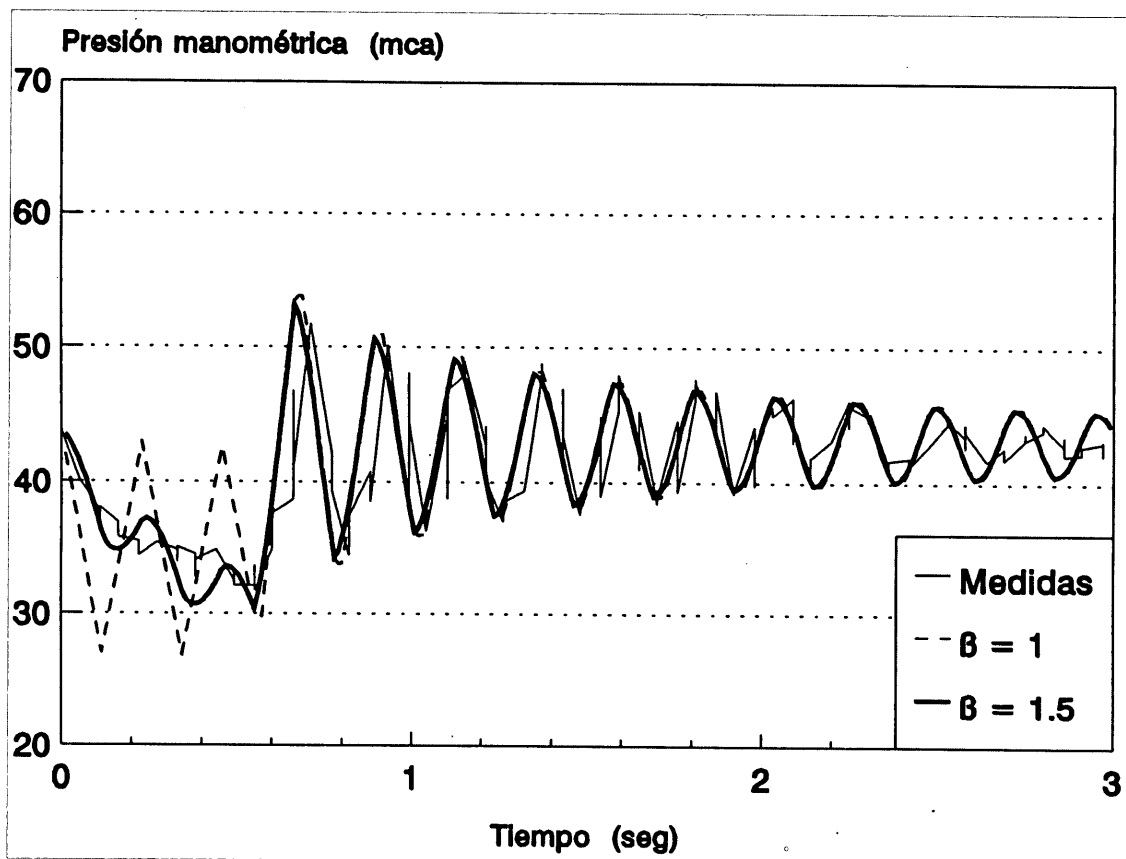


Figura nº 10.- Forjas.
Comparación entre la
simulación de tipo 3 ($\beta = 1$ y
 $\beta = 1.5$) y las medidas reales.

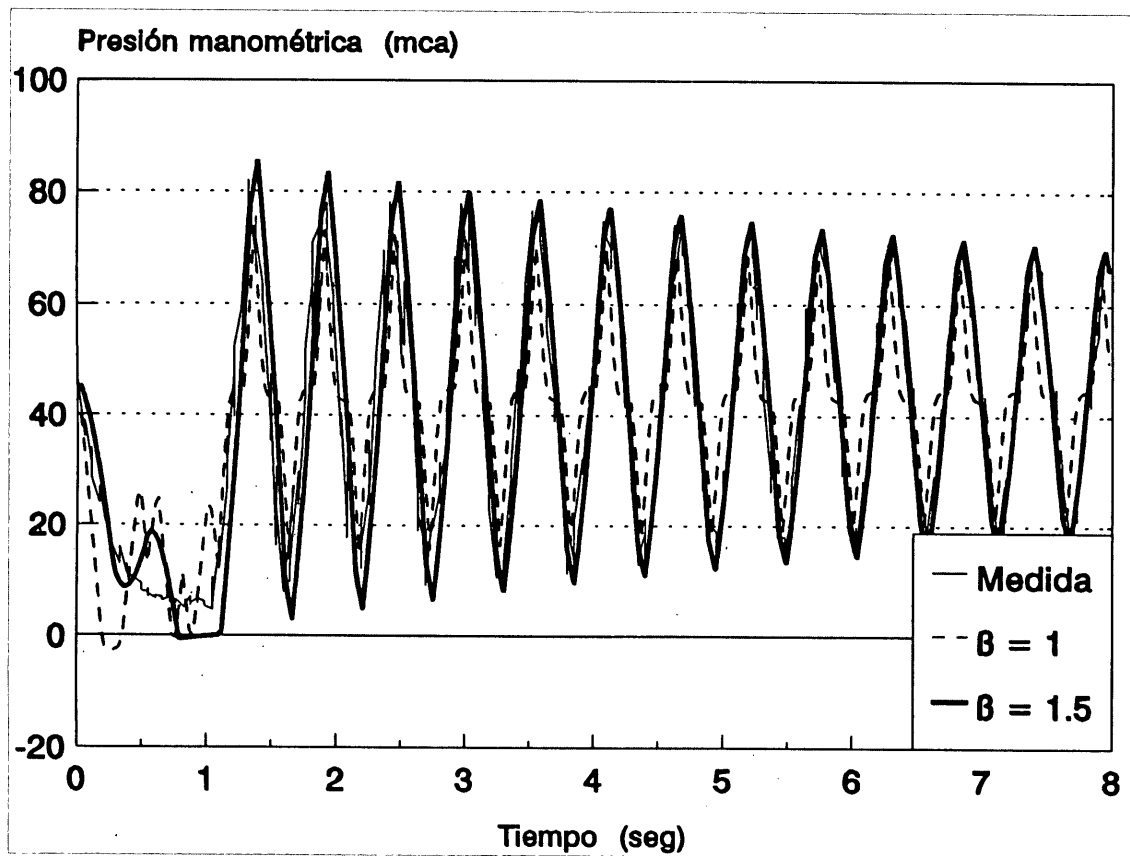


Figura nº 11.- Reinos.
comparación entre la
simulación de tipo 3
($\beta = 1$ y $\beta = 1.5$) y las medidas
reales.

debería tratar de establecer algún tipo de relación entre el valor de F y las características de la instalación.

Para la deducción de todas las conclusiones anteriormente expuestas se ha partido de los resultados obtenidos con los parámetros determinados a partir de las medidas reales. El hecho de que los valores de los parámetros así determinados presenten diferencias, considerables en algún caso, con los correspondientes a estimaciones de carácter teórico es también interesante de resaltar, debido a su repercusión tanto en los valores extremos como en la evolución temporal del fenómeno transitorio.

En este sentido, las posibilidades de utilización del modelo a nivel de predicción del comportamiento de una instalación, sin posibilidad de recurrir a medidas previas, están condicionadas a la exactitud de las estimaciones de los parámetros. Esta conclusión es válida para cualquier otro modelo que se proponga.

Notación

L Longitud total de la tubería.
 D Diámetro interior de la tubería.
 Q_0 Caudal inicial, en régimen permanente.
 H_0 Altura geométrica de elevación.
 V Velocidad del flujo, función de la posición y del tiempo.
 H Altura piezométrica, función de la posición y del tiempo.
 g Aceleración de la gravedad.
 I Pérdida de carga unitaria.
 a Celeridad de la onda de presión.
 α Inclinación de la directriz de la tubería respecto a la horizontal (positiva en sentido descendente).
 f Coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.
 F Factor multiplicador de las pérdidas de carga durante el fenómeno transitorio.
 Δt Incremento de tiempo de cálculo.
 Δx_i Longitud del tramo de tubería "i".

a_i Celeridad de la onda de presión en el tramo de tubería "i".

H_{0B} Nivel de agua en el depósito final.

T Tiempo de parada de la bomba.

V_0 Velocidad inicial del flujo, en régimen permanente.

β Exponente de la ley de variación de la velocidad durante la parada de la bomba.

C, K Coeficientes de la fórmula de Mendiluce.

H_m Altura manométrica.

H_{0A} Nivel de agua en la toma.

K_1, K_2 Parámetros definitorios de las condiciones de contorno.

Bibliografía

- CHAUDHRY, M.H.** (1987).- "Applied hydraulic transients". Ed. Van Nostrand Reinhold Co. New York.
- KOETZIER, H.** et al. (1986).- "Dynamic behaviour of large non-return valves". 5th International Conference on Pressure Surges. Hannover (Germany). Paper H4. Pags. 237-243.
- MATEOS, M.** (1990).- "Válvulas para abastecimientos de aguas". Librería Editorial Bellisco. Madrid.
- MENDILUCE, M.** (1987).- "El golpe de ariete en impulsiones". Librería Editorial Bellisco. Madrid.
- PROVOOST, G.A.** (1980).- "The dynamic behaviour of non-return valves". 3th International Conference on Pressure Surges. Canterbury (England). Paper J1. Pags. 415-427.
- THORLEY, A.R.D.** (1983).- "Dynamic response of check valves". 4th International Conference on Pressure Surges. Bath (England). Paper F1. Pags. 231-242.
- U.D. de Mecánica de Fluidos de la Univ. Politécnica de Valencia** (1988).- "Curso de análisis y cálculo de transitorios hidráulicos".
- VARDY, A.E.** et al. (1993).- "A weighting function model of transient turbulent pipe friction". Journal of Hydraulic Research. Vol 31, nº 4. Pags. 533-548.
- WYLIE, B. and STREETER, V.L.** (1982).- "Fluids transients". Ed. Ann. Arbor. Michigan. ■