

SOBRE EL GOLPE DE ARIETE EN TUBERÍAS DE IMPULSION

Por JOSE LIRIA MONTAÑES
Ingeniero de Caminos.

Este fenómeno ha sido estudiado preferentemente en nuestro país para las tuberías forzadas de las centrales hidroeléctricas, pero no para las de impulsión, como dice muy acertadamente el autor en el preámbulo; de ahí que consideremos de interés el presente estudio, en el que se analizan con claridad y detalle las principales características del fenómeno en las impulsiones.

I. Preámbulo.

El golpe de ariete es un fenómeno que se presenta siempre que en una conducción a presión se modifican bruscamente las condiciones que determinan el caudal.

Los casos más importantes en los que se presenta son las tuberías forzadas de las centrales hidroeléctricas y las tuberías de impulsión. En realidad, el fenómeno físico y su método de cálculo es el mismo para ambos, pero las circunstancias distintas establecen características especiales para uno y otro tipo, que deben tenerse muy en cuenta.

En España es mucho más conocido el estudio del primer caso que el del segundo, debido, sin duda, a que ha sido necesario en toda su plenitud en los numerosos e importantes saltos de producción de energía eléctrica, mientras que la mayoría de las estaciones de elevación que se han construido eran de tan pequeña importancia que o no era de consideración el efecto del golpe de ariete, o lo más sencillo era sobredimensionar la resistencia de la tubería, sin profundizar demasiado en largos y prolijos cálculos.

Pero la inminente necesidad de estaciones de acumulación en saltos hidroeléctricos, el ya no raro estudio de oleoductos, la posible puesta en riego por aspersión de grandes zonas (que necesiten impulsiones largas) y hasta el frecuente número de abastecimientos de agua potable, en los que por necesidades topográficas no es posible seguir el sabio consejo de colocar el depósito en un punto dominante próximo a la captación, aconsejan la recopilación de los dispersos conocimientos existentes sobre el estudio del golpe de ariete en tuberías de impulsión largas, con una discusión de las soluciones más indicadas en cada caso.

II. Fenómeno físico del golpe de ariete en tuberías de impulsión.

La interrupción de la corriente eléctrica a un grupo motobomba en funcionamiento, suele ser la causa del golpe de ariete más grave que se puede presentar en una estación de elevación, no sólo por la radical

variación de caudal que entraña, sino porque casi todas las otras causas, tales como puesta en marcha del grupo, modificaciones del consumo necesario, etc., pueden paliarse actuando adecuadamente sobre los mandos; el estudio del golpe de ariete suele limitarse, por tanto, a la primera causa.

En el momento que se produce un corte de corriente, el grupo gira exclusivamente por su efecto de inercia.

Como el par resistente que actúa sobre el rotor es importante (está formado no sólo por los rozamientos y resistencia del aire, sino por la carga de agua de la tubería de impulsión) el grupo se frena rápidamente.

La primera consecuencia es que el brusco frenado del agua en el tubo de aspiración origina una sobrepresión en el mismo. Aunque en general este efecto es de poca importancia, a causa de la corta longitud de la aspiración, en algún caso puede exigir un refuerzo del tubo.

Simultáneamente, el agua de la tubería de impulsión y que sigue ascendiendo por inercia, provoca una depresión junto al grupo, que se transmite con una celeridad dada por la fórmula homogénea:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left[\frac{1}{\epsilon} + \frac{d}{E e} \right]}}$$

en la que:

a = celeridad de onda.

d = diámetro de la tubería.

e = espesor de la tubería.

g = aceleración de la gravedad.

γ = peso del líquido por unidad de volumen.

ϵ = módulo de elasticidad del líquido (si es agua es $2,07 \times 10^8$ Kg./m.²).

E = módulo de elasticidad del material de la tubería.

Esta onda de depresión produce, por reflexión en el final de la tubería, otra onda que retrocede con la misma celeridad, sumando sus efectos a la primitiva. Únicamente cuando la tubería desemboca en el fondo de un depósito de capacidad prácticamente infinita, la

onda reflejada es igual y de signo contrario a la incidente, destruyéndose ambas. Al llegar al grupo motobomba, esta segunda onda produce, por reflexión, una tercera de sobrepresión que asciende por la tubería, etc.

La teoría general del golpe de ariete (1) nos enseña que si el tiempo de parada del grupo motobomba

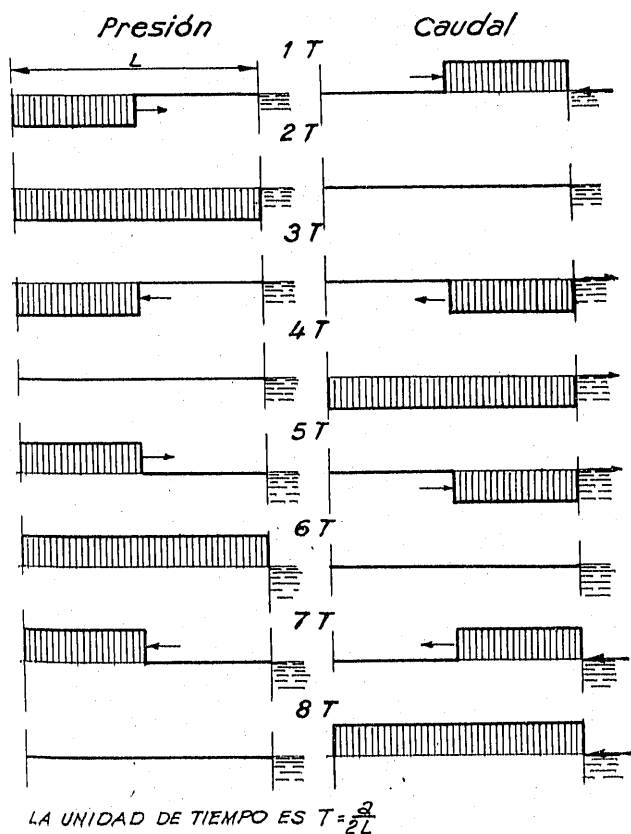


Figura 1.^a

es más corto que el tiempo que tarda la onda en recorrer la tubería, en su doble longitud de ida y vuelta, el golpe de ariete de depresión alcanza el valor máximo de Allievi $\frac{a v}{g}$ en el momento final de parada del grupo (v es la velocidad de régimen en la tubería).

La onda de depresión puede tener frontalmente un largo tramo de crecimiento si el tiempo de parada del grupo es corto. En el caso teórico de una parada instantánea del grupo, la onda sería rectangular. Como recordatorio para el lector, incluimos en la figura 1.^a un esquema del movimiento de las ondas en este úl-

timo caso, y suponiendo un depósito infinito al final de la tubería y una válvula de pie en su comienzo, se ha prescindido del rozamiento.

Si por el contrario, el grupo tiene un tiempo de parada más largo que el que tarda la onda en recorrer la tubería en su viaje de ida y vuelta, la onda de reflexión llega a él antes de que se alcance el valor máximo de Allievi y se obtiene una depresión máxima menor. Sólo en este caso se podría aplicar en una primera aproximación la fórmula de Micheaud (1):

$$p = \frac{2 L v}{g T}$$

en la que:

p = sobrepresión o depresión debida al golpe de ariete.

L = longitud de la tubería.

v = velocidad de régimen en la misma.

T = tiempo de parada del grupo o, en general, tiempo de maniobra del obturador.

Lo corriente es, sin embargo, que, a poco larga que sea la conducción, y por ser siempre muy corto el tiempo de parada del grupo, se obtenga la depresión máxima de Allievi.

Las depresiones y sobrepresiones debidas al golpe de ariete y a las que estamos haciendo referencia, se refieren al caso de tubería horizontal, debiendo añadirse las de altura estática. Puede ocurrir entonces que esta última no compense las depresiones formadas, obteniéndose valores negativos de presión, que además de tener el peligro de aplastamiento de la tubería, por la presión atmosférica exterior, rompan la columna líquida. Consideramos que el efecto nocivo del golpe de ariete queda agravado por las siguientes causas:

En primer lugar, existe un fenómeno de cavitación, poco conocido, pero de efectos destructivos y que proporciona unas sobrepresiones locales importantes en el momento de cierre de la cavidad abierta en la columna líquida, que se suman a las propias del golpe de ariete.

En segundo lugar, el movimiento del agua para cerrar la cavidad abierta, tolera unos caudales de retroceso que no existirían si no se rompiese la columna

(1) La fórmula de Micheaud, simpática por su sencillez, debe usarse con precaución. Para tiempos de parada iguales al que tarda la onda en ir y volver por la tubería, da variaciones de presión iguales al valor de Allievi, $\frac{a v}{g}$. Para

tiempos de parada menores, la fórmula es errónea y debe adoptarse aquel valor.

En la deducción de esa fórmula, se ha supuesto una ley lineal de cierre, que no se cumple, en general, como puede comprender el lector, si sigue leyendo este artículo, y, por tanto, los resultados no son exactos.

Para tiempos de parada superiores al tiempo que necesita la onda de depresión en regresar al grupo, la fórmula es aún más dudosa, pues el fenómeno es más complejo y el golpe de ariete máximo se puede producir, después de retroceder por primera vez, la onda de depresión.

(1) Al lector que desee estudiar los fundamentos de la teoría del golpe de ariete, le recomendamos el libro de Pastor Rupérez *Régimen variable en tuberías. Teoría general del golpe de ariete*.

líquida, y que aumentan considerablemente el golpe de ariete, alcanzándose a veces un valor muy superior al que se obtendría en caso contrario (1).

La valoración cuantitativa puede hacerse por el método gráfico.

Debemos puntualizar aquí que la columna líquida no se rompe más que con depresiones superiores a 8 ó 9 metros de altura de agua. Este valor, que no está bien definido y que varía con las condiciones de temperatura y altitud, proporciona un margen de seguridad que puede tenerse en cuenta con precaución.

La aspiración del Ingeniero proyectista debe ser, a nuestro juicio, conseguir que, en la primera fase de depresiones, no se rompa la columna líquida, junto con la reducción a límites admisibles de la sobrepresión consiguiente.

Para ello existen procedimientos que consiguen uno u otro cometido y a veces ambos, pero en muchos casos deben asociarse los procedimientos a emplear. Vamos a pasar revista a ellos, estudiando su influencia.

III. Influencia del momento de inercia del grupo motobomba.

Como hemos dicho antes, si consiguiéramos que el grupo siguiese funcionando (y dando presión a la tubería) cuando la onda reflejada llegase a él, conseguiríamos que la máxima depresión inicial fuese menor, en valor absoluto, que la fórmula de Allievi.

Sin embargo, no podemos poner grandes esperanzas en resolver los problemas del golpe de ariete a base de aumentar el momento de inercia del rotor, para aumentar así el tiempo de parada.

Los motores eléctricos comerciales tienen unas características que ligán su momento de inercia con la potencia y la velocidad (y por tanto, con el par resistente). La función que los relaciona es tal, que cualesquiera que sean las características de la impulsión, el tiempo de la parada del motor que le corresponde varía relativamente poco de unos casos a otros (2).

Siendo la velocidad de propagación de la onda del golpe de ariete casi constante (del orden de 900 ó 1 000 m./seg.), únicamente en tubería de impulsión corta puede esperarse que la sola influencia del momento de inercia del rotor reduzca aceptablemente el golpe de ariete.

Como, por otra parte, la posibilidad de aumento del momento de inercia acoplado un volante al rotor, queda limitada en la práctica por no poder pasar de un cierto tamaño de volante, únicamente en grupos

pequeños y con no muy larga longitud (1 Km. o algo más) puede esperarse resolver el problema con este procedimiento, ya que en estos casos la inercia del volante puede ser grande en comparación con la del rotor. Esta solución suele exigir que el motor sea de anillos rozantes, para su puesta en marcha.

Para el cálculo del frenado del grupo motobomba, una vez desconectado bruscamente, no tenemos otro medio que el cálculo gráfico. Sabido es que este procedimiento se basa en la conocida propiedad de que un observador que se moviera por la tubería con la velocidad de propagación a de la onda del golpe de ariete, se encuentra siempre unos estados de caudal-presión por todos los puntos por donde pasa, que en un diagrama de caudales-presiones están ligados por la ecuación de una recta de pendiente $+\frac{a}{g s}$ (según

que el observador se acerque a la bomba o se aleje de ella), en la que s es la sección de la tubería. Partiendo, por tanto, de un punto de caudal-presión conocido, la recta de pendiente antes dicha que pasa por ese punto, nos define los estados posibles que puede encontrar el observador.

La intersección de la recta con la curva característica que relacione los caudales y las presiones en un momento determinado en un punto de la tubería, nos define las características hidráulicas de ese punto en ese momento (1).

Las curvas características del grupo motobomba son conocidas, pues por lo menos la que relaciona la presión y el caudal para el número de revoluciones normal, puede darla la casa suministradora, y las correspondientes a velocidades menores se obtienen de ella por las leyes de semejanza hidráulica.

En la figura 2.^a hemos representado las curvas de que hablamos, definiendo cada una por la velocidad expresada en porcentaje de la velocidad normal de régimen. Obsérvese que los puntos de corte de estas curvas con el eje caudal $= 0$, dan presiones proporcionales al cuadrado de las velocidades. Para una vertical correspondiente a otro caudal, la ley es más complicada, pero en la práctica se obtiene exactitud aceptable dibujando las curvas de forma que cumplan la condición anterior y que sean tanto más aplastadas cuanto más pequeña sea la velocidad.

La parte de curvas del semiplano de caudales negativos, corresponde al caso de que no existiendo válvulas de retención, el movimiento del agua, a causa de su retroceso por efecto del golpe de ariete, es de sentido inverso al que corresponde al movimiento del motor, que sigue girando por inercia. Este fenómeno se llama desviración, y existiendo o no, puede ocurrir que después el grupo motobomba gire en sentido contrario, siguiendo el movimiento de retroceso del agua y funcionando, por tanto, como turbina.

(1) Ejemplos de este efecto pueden verse en el libro de Bergeron *Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité*.

(2) Bergeron: "Complexité des Phenomènes du coup de bélier sur les installations de Pompage et essai des classifications des solutions générales pour y remédier". *Houille Blanche*, núm. B, 1949.

(1) Véase REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, números de marzo y abril de 1945: "El golpe de ariete. Solución gráfica general", por Eugenio Vallarino.

Unas y otras curvas, correspondientes al retroceso del agua, hay que obtenerlas por experimentación.

Para saber en cada instante la velocidad que corresponde al grupo, hay que ir calculando por intervalos de tiempo finitos el par de frenado y la consiguiente reducción de velocidad (1).

Llamando ω a la velocidad de giro, W la potencia, que expresada en Kg.m/segundo tiene por

Sustituyendo, obtenemos:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{120}{\pi} \frac{gM}{GD^2}$$

y operando en diferencias finitas:

$$\Delta n = \frac{120}{\pi} \frac{gM}{GD^2} \Delta t.$$

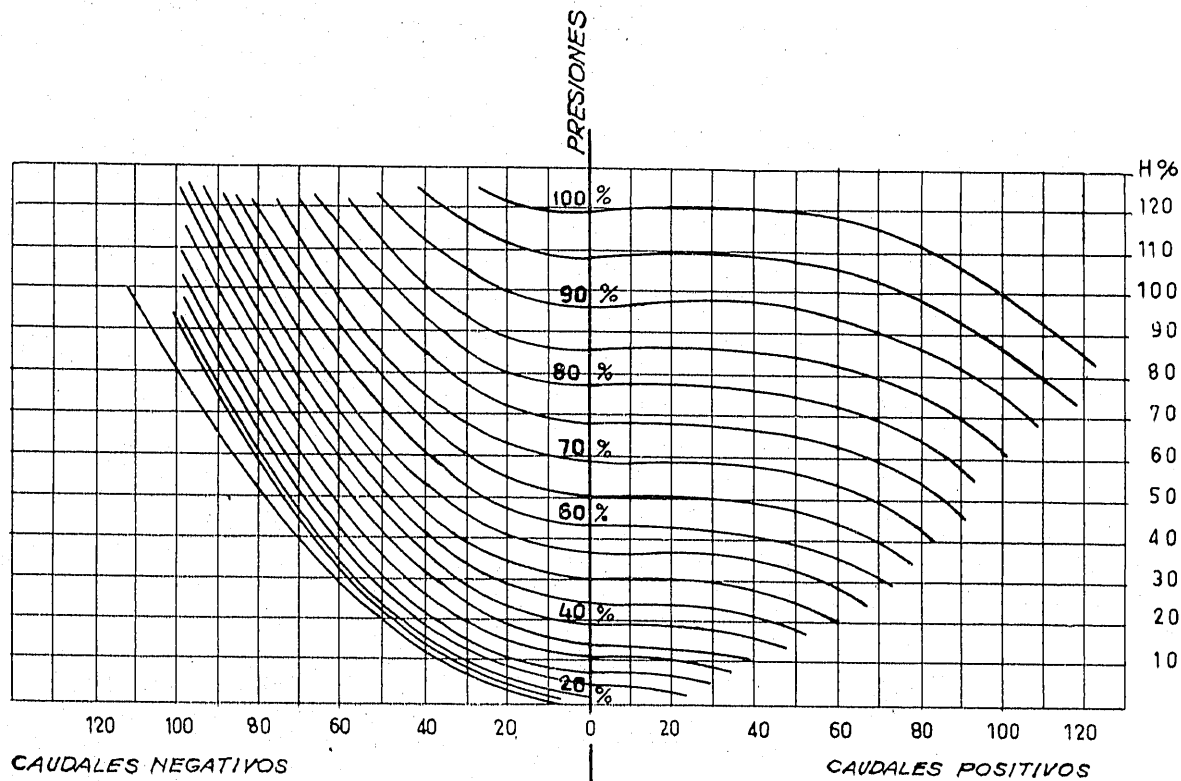


Fig. 2.a — Curvas características de la bomba definidas por la velocidad, expresada en porcentaje de la de régimen.

valor el que en cada instante se obtiene de la fórmula $\frac{1000 H Q}{\tau}$, siendo τ el rendimiento, M el par resistente (igual a $\frac{W}{\omega}$) y Ω al momento de inercia polar del rotor y H la presión manométrica en la bomba, será $\frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{\Omega}$. Expresando, como es normal, Ω en función del factor comúnmente llamado GD^2 y la velocidad en las revoluciones por minuto que llamaremos n , será:

$$\Omega = \frac{GD^2}{4g} \quad \text{y} \quad \omega = \frac{\pi n}{30}.$$

(1) Este tema puede verse tratado en la revista *Sulzer*, número 1 de 1955, y en el antes citado libro de Bergeron, *Du coup de bélier...*

Partiendo del instante inicial en el que conocemos el par de frenado y que suponemos constante en un intervalo de tiempo tanto más pequeño cuanto más exactitud queramos, obtenemos la disminución de velocidad al final del mismo y, por tanto, la velocidad y curva característica que corresponde a ese instante. Partiendo de ese momento (puesto que conocemos los nuevos valores del caudal y de la presión, conocemos también la nueva potencia) obtenemos la velocidad para el final del intervalo de tiempo siguiente, y así sucesivamente.

Podemos aplicar el método gráfico, puesto que partiendo del final de la tubería en distintos momentos (siempre conocemos su curva característica, si por ejemplo termina en un depósito infinito es presión = constante), obtenemos por intersección de la recta de pendiente $+\frac{a}{g \cdot s}$ con la curva característica que

corresponda al momento de llegada del observador a la bomba, la presión y el caudal del grupo en distintos momentos.

Partiendo de estos estados de caudal-presión en la bomba y marchando el observador hacia el final de la tubería, obtendremos, por intersección de la

ción; los tiempos de parada y, por tanto, los valores del golpe de ariete (antes de sumarle las alturas estáticas) no variarán mucho. No obstante, tenemos que reconocer que la afirmación de que el tiempo de parada del grupo varía poco de unas impulsiones a otras es sólo una primera y burda aproximación.

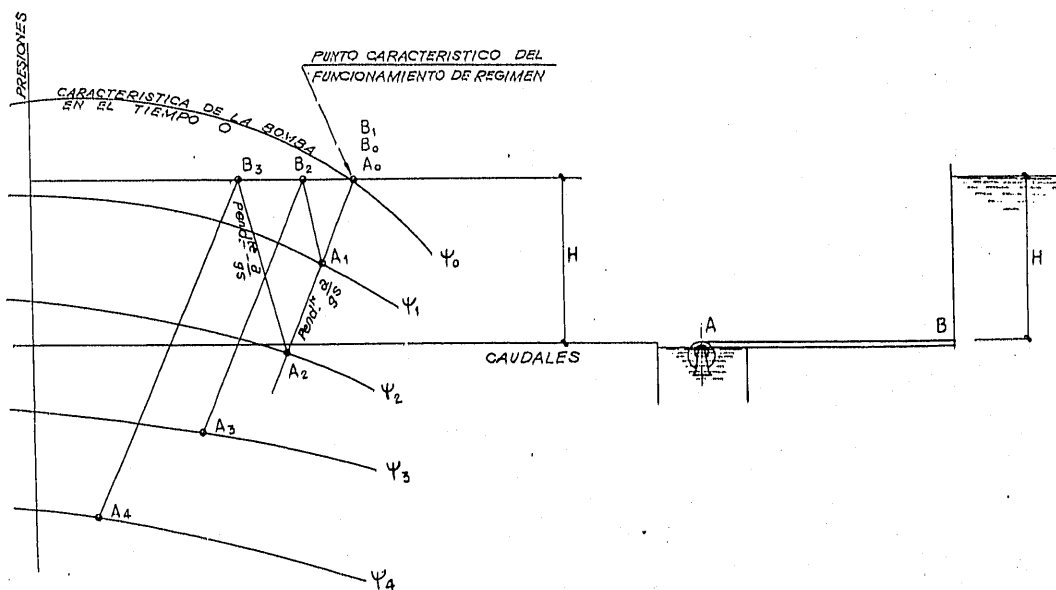


Figura 3.ª

curva característica de este punto con las rectas de pendiente $\frac{a}{gs}$, nuevos estados de caudal-presión al final de la tubería, de los que podemos partir para obtener otros en la bomba en otros momentos, etc.

En la figura 3.ª puede verse en esquema el método de cálculos; se han puesto dos subíndices que corresponden, uno al punto de la tubería y otro al instante considerado.

De todo este apartado se deduce que no es exacta la común creencia de algunos de que la sobrepresión máxima del golpe de ariete es igual a la altura de elevación. Pueden ponerse ejemplos de elevaciones bajas con grandes velocidades de impulsión en que el golpe de ariete es muy superior a la altura manométrica. Ni siquiera puede afirmarse que el golpe de ariete viene influido de forma decisiva por la altura de elevación; basta considerar dos impulsiones del mismo caudal en las que la altura de impulsión de una sea el doble de la otra. Para que ambos grupos tengan la misma velocidad específica y de régimen, una bomba será igual a la otra, pero con doble rodete. Los momentos de frenado estarán en la relación de 2 a 1, pero el factor GD^2 también habrá variado casi en la misma propor-

IV. Estudio del funcionamiento de un calderín de aire conectado a la tubería.

A veces es muy conveniente la colocación de un calderín de aire en derivación con la tubería (fig 4.ª).

Durante el funcionamiento normal, el aire está comprimido a la misma presión que la manométrica de la tubería en el punto de conexión.

Al presentarse la depresión inicial del golpe de ariete, el aire se dilata, impulsando la columna líquida mientras cede parte de su energía de compresión. Por el contrario, al presentarse la onda de sobrepresión, el aire se comprime, absorbiendo energía. El resultado es que el golpe de ariete queda disminuido.

Como la onda de depresión se origina en la bomba, y la de sobrepresión también, éste es el punto lógico de situar el calderín, mientras sea posible.

Antes de entrar en el método de cálculo de las dimensiones del calderín, es conveniente considerar su campo de aplicación, ventajas, inconvenientes, etc.

La primera limitación que encontramos es que con presiones manométricas de elevación de unos 100 m. o más, el aire se disuelve en gran proporción en el agua y el aire del calderín disminuye.

No es conveniente utilizar este sistema cuando la presión manométrica normal es superior a 100 me-

tros, y es prohibitiva para alturas de más de 150 metros.

La segunda limitación con la que fácilmente tropezamos, es el tamaño que se obtiene para el calderín, que fácilmente resulta prohibitivo.

En efecto, al pararse bruscamente el grupo motobomba, la masa líquida sigue ascendiendo por la tubería a expensas de la energía del calderín. Como la

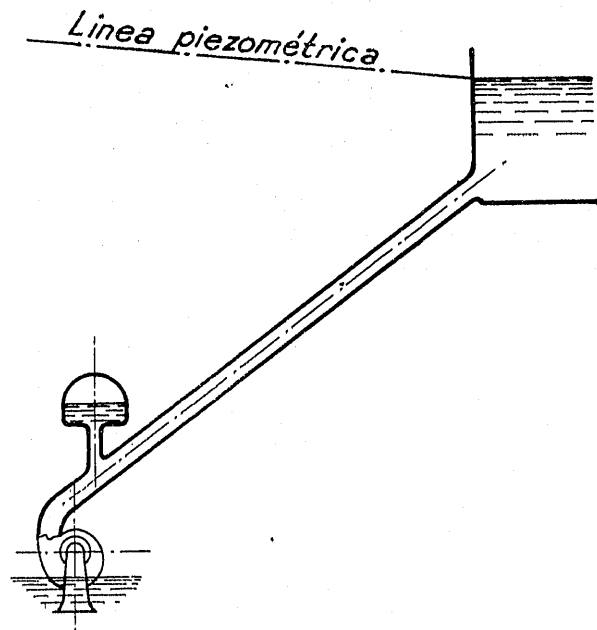


Figura 4.^a

energía cinética inicial de la columna líquida es proporcional a $L Q v$ (siendo L = longitud de la tubería, Q = caudal inicial, v = velocidad inicial), en una primera aproximación, en la que prescindamos de los rozamientos, de la altura de elevación, etc., podemos decir que el volumen necesario del calderín es proporcional a $L Q v$, y como v suele ser generalmente en las impulsiones poco distinto de 1 m./segundo, será proporcional a $L Q$. Por tanto, esta solución será aplicable, en principio, a caudales pequeños y longitudes grandes (hasta 100 l./seg. y 10 Km.), bien a caudales grandes y longitudes pequeñas (hasta 1 m.³/seg. y 1 Km.). Si suponemos fijas las características de la impulsión y variamos la altura de elevación, cuanto más grande sea ésta deberá ser proporcionalmente mayor la energía cedida por el calderín y, por tanto, el volumen de éste. Ello hace que el calderín sea económico sólo para alturas de elevación de hasta 40 ó 50 metros.

Para el cálculo de las dimensiones del calderín, debemos dilucidar, en primer término, si las compresiones y dilataciones del aire contenido en aquél pertenecen al tipo isotérmico o adiabático. Como todos los casos reales, es más bien intermedio de ambos, pero en nuestra opinión, se parece mucho más al tipo

adiabático, ya que, en general, el fenómeno es lo bastante rápido como para que no haya tiempo de intercambio de energía calorífica con el exterior. No obstante, hay casos en los que por simplificar los cálculos, se supone es compresión isotérmica.

El cálculo del funcionamiento, sabiendo operar con el método gráfico, es fácil (1). En el instante posterior a la parada del grupo, t_0 , la presión dentro del calderín es la manométrica de elevación, H_0 , y el caudal que sale de éste es el normal, Q_0 , de funcionamiento, si la parada del grupo es instantánea, y se prescinden de las pérdidas de carga en el estrangulamiento de conexión. (Si no se prescinde de estas pérdidas, el caudal que sale del calderín es bruscamente inferior al nominal, adquiriendo un valor tal, que restando las correspondientes pérdidas de carga a la presión interior del calderín, se obtenga una presión igual a la que se deba encontrar, según la teoría del golpe de ariete, para ese caudal). Cogiendo un incremento de tiempo Δt tanto más pequeño cuanto más exactitud se quiera, la variación de volumen en el calderín será $Q_0 \Delta t$. Si el volumen inicial era V_0 , se habrá transformado en el volumen $V_{t_0 + \Delta t} = V_0 + Q_0 \Delta t$. Entrando en la ecuación fundamental $V_{t_0}^\gamma H_{t_0} = V^\gamma H$, en la que $\gamma = 1$, si la compresión es isotérmica; $\gamma = 1.4$, si es adiabática y alcanza valores intermedios para los casos reales, obtenemos el valor $H_{t_0 + \Delta t}$. Como sabemos que el punto característico del calderín, en un gráfico caudales-presiones, debe encontrarse en la recta que teniendo de

pendiente $+\frac{a}{g s}$ parte del punto característico del final de la tubería, conociendo $H_{t_0 + \Delta t}$ en el calderín, conocemos inmediatamente $Q_{t_0 + \Delta t}$, que nos puede servir de base para seguir calculando el fenómeno en el tiempo $t_0 + 2 \Delta t$, etc.

Si quiere tenerse mayor exactitud, puede corregirse cada uno de los resultados obtenidos rehaciendo los cálculos, operando con un caudal igual a la semisuma de los caudales inicial y final correspondientes a cada intervalo.

Del estudio del fenómeno se deduce si las dimensiones supuestas al volumen inicial de aire (y por tanto de calderín) son adecuadas o deben modificarse.

Existe otro procedimiento para hacer esta comprobación y que prescindiendo de los estados intermedios sólo se basa en la conservación de la energía total del sistema (2).

Si llamamos E a la energía, comparando el momento inmediatamente anterior al corte de corriente con el instante de parada de la columna líquida (que coincide con la máxima expansión del aire del calderín), tendremos:

(1) Más detalles y ejemplos de este caso concreto, pueden verse en *La Technique Moderne*, marzo 1935, y en el citado libro *Du coup de bélier*, etc.

(2) Puede verse expuesto en el "Manual Uralita", junto con tablas de compresibilidad adiabática para su aplicación.

E cinética + E expansión = E gravedad + E rozamiento. La E cinética es fácil de expresar en función del caudal de régimen y de los datos geométricos de la tubería; la E expansión se expresa en función del volumen inicial de aire, de un porcentaje de variación final de volumen (que es la incógnita) y de un coeficiente que se obtiene de las tablas de expansión isotérmica o adiabática. En función de ese mismo cambio de volumen de aire se expresa la cantidad de agua elevada durante el intervalo en estudio y se obtiene, por tanto, E gravedad. En cuanto a la E rozamiento, basta tomar la mitad del valor que correspondería a la cantidad de agua elevada si se hubiera mantenido la velocidad de régimen, ya que el valor exacto es difícil de hallar.

De la ecuación resultante se obtiene la variación del volumen y, por tanto, la presión final.

Si a continuación comparamos el instante de máxima expansión del aire del calderín con el de máxima compresión, al final del retroceso de la columna líquida, tendremos:

E gravedad = E rozamiento + E compresión, que se trata de la misma forma y cuya incógnita es el volumen final de aire. Conocido éste, conocemos la presión final, que nos dirá si el calderín tiene o no el tamaño adecuado.

Creemos que la mayor objeción que puede ponerse a este procedimiento son los errores introducidos en la energía de rozamiento, sobre todo en la segunda fase, en la que la velocidad inicial, nula, acaba en el mismo valor después de alcanzar un máximo totalmente desconocido.

Por lo demás, esta forma de operar es bastante sencilla y útil en muchos casos.

Ocorre con frecuencia que en el movimiento de retroceso del agua se obtienen reducciones importantes en el volumen de aire, con sobrepresiones importantes, a no ser que se adopten dimensiones grandes para el calderín. Es solución útil colocar a la salida de éste una válvula de retención perforada, que se cierra al retroceder el agua, dejando pasar a ésta con una pérdida de carga suplementaria que tiende a frenar la columna líquida, obteniéndose valores menores para la presión máxima. Su cálculo gráfico no tiene dificultad y el procedimiento equivale a las chimeneas de equilibrio con estrangulamiento inferior.

Anteriormente hemos dicho que el calderín solía situarse junto a la bomba. Inducen a este criterio no sólo las razones técnicas que entonces apuntábamos, sino una mejor vigilancia durante la explotación.

Sin embargo, en saltos de más de 70 ó 100 m. de altura, puede estar más indicado colocar el calderín en un punto intermedio de la tubería, para evitar no sólo las pérdidas de aire por disolución, sino un volumen excesivo del calderín.

Puede elegirse su situación de forma que el tramo de tubería situado por debajo de él, tenga una presión estática suficiente para compensar las depresio-

nes iniciales. Esto suele ser siempre posible, puesto que el valor máximo de Allievi $\frac{a v}{g}$, para los valores normales en las impulsiones, suele tener valores de 70 a 100 m. de altura de agua.

De esta forma, el calderín beneficia principalmente al tramo superior de la tubería, y el inferior, mucho menos influido por él, carece de depresiones y debe soportar las sobrepresiones del golpe de ariete.

En el apartado siguiente veremos cómo se pueden disminuir éstas.

Para hacer el cálculo gráfico correspondiente, basta tener en cuenta que en el nudo de la bifurcación del calderín, la presión debe ser la misma y que la suma de caudales debe ser nula.

Si suponemos dos espectadores que parten de los extremos de la tubería en tiempos adecuados, para que con la velocidad de propagación de onda a , lleguen al calderín simultáneamente, conocemos las rectas que representan los estados de caudal-presión que van encontrando. Dibujamos la recta que se obtiene restando los caudales de ambas para los mismos valores de presión, y operando con ella de la misma forma que hemos explicado para el caso de que el calderín estuviese junto a la bomba, podemos ir resolviendo el problema, ya que los valores de caudal-presión obtenidos cumplen las condiciones exigidas en la bifurcación.

V. Válvulas descargadoras.

Existen casos (y en el capítulo anterior hemos hecho referencia a uno de ellos) en los que las depresiones no son de temer, por venir compensadas por las presiones estáticas o por otra razón, y hay que luchar sólo contra las sobrepresiones.

En estos casos es interesante el empleo de válvulas descargadoras, que estando taradas por una determinada presión, se abren, dejando salir el agua al sobrepasarse aquélla, que ya no supera un cierto valor calculable.

Para que estas válvulas sean recomendables, han de estar perfectamente construídas, no tener guías que puedan originar un fatal acodamiento del elemento móvil y deben tener reducida al mínimo la inercia de éste.

Este último punto es importante, pues siendo enormes las velocidades de crecimiento de la sobrepresión, si la válvula no tiene una respuesta rápida, puede que antes de que llegue a actuar se presenten presiones inadmisibles.

A este respecto, y puesto que la válvula siempre tendrá una cierta inercia, consideramos ventajosa su aplicación simultáneamente al acoplamiento de volantes al grupo motobomba, que sin resolver por sí solos el problema del golpe de ariete, sirven por lo menos para sustituir el frente escarpado de la onda de sobrepresión por otro mucho más suave, dando tiempo a la respuesta adecuada de la válvula, que debe situarse

junto al grupo, ya que allí se origina la onda de sobrepresión.

En la figura 5.^a se representa el esquema de una de estas válvulas, y en la figura 6.^a la curva característica de su funcionamiento, indispensable para el cálculo gráfico. P_0 es la presión a la que se abre la válvula. En el tramo $P_0 A$ la característica es prácticamente una recta, pues la deformación del muelle que comprime el elemento móvil no es proporcional a la presión hidráulica, sino inferior, ya que cuanto mayor es la apertura, hay más facilidad para la curvatura de las líneas de corriente y, por tanto, la presión real sobre el elemento móvil de la válvula queda disminuída. La sección abierta de salida crece entonces aproximadamente con la raíz cuadrada de la presión hidráulica, y como la velocidad también crece de la misma forma, el caudal crece linealmente con la presión. El punto A corresponde a la apertura máxima de la válvula. Para presiones mayores, la curva característica está formada por el tramo AB de una parábola, ya que la apertura no puede aumentar.

Las válvulas descargadoras suelen tener un tornillo para regular la compresión inicial del muelle y, por tanto, la presión inicial de actuación P_0 .

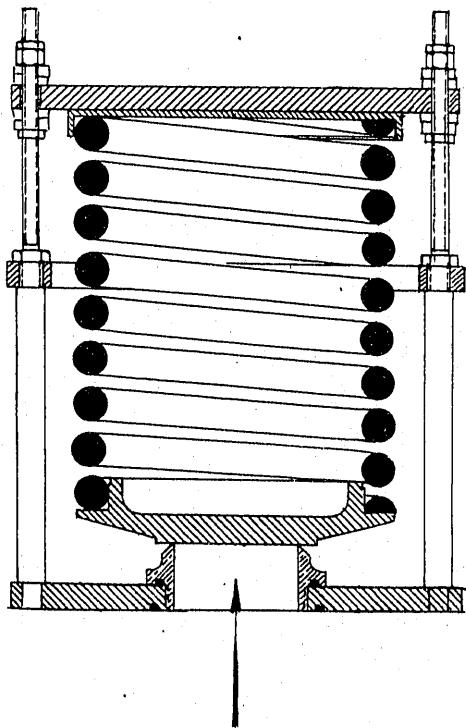


Figura 5.^a

La curva característica es entonces una recta $P_0 C$, que se continúa por otro tramo parabólico CD , correspondiente a la nueva apertura máxima.

Escogiendo adecuadamente las características de

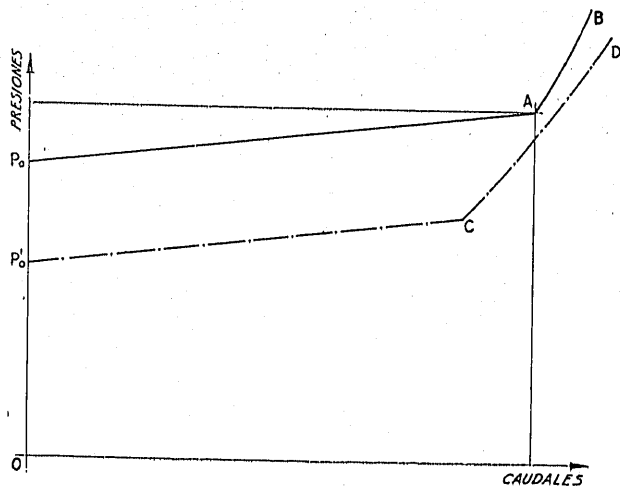


Figura 6.^a

la válvula descargadora, se puede reducir a un mínimo la máxima sobrepresión en la tubería; el cálculo gráfico es fácil.

VI. Válvulas de retención.

Los montadores de tubería aconsejan con frecuencia la colocación, en puntos intermedios de la misma, de válvulas de retención, de características iguales a las que se colocan en el tubo de aspiración para el cebado de la bomba.

Las razones intuitivas que mueven a sospechar su efecto reductor sobre el golpe de ariete, quieren reforzarlas a veces alegando que, como según la fórmula de Micheaud, el golpe de ariete tiene un valor de depresión o sobrepresión proporcional a la longitud de la tubería, al seccionar ésta se reducen las variaciones de presión en la misma proporción. Sin embargo, el fenómeno del golpe de ariete es demasiado complejo como para quedar explicado por una fórmula tan sencilla.

Como no conocemos ninguna publicación que estudie el efecto de válvulas de retención intercaladas en la tubería, es conveniente esclarecer las ideas sobre este punto y no disponemos de otro medio que el cálculo gráfico.

En la figura 7.^a se representa el esquema de una impulsión horizontal que desemboca en un depósito infinito, C . Para simplificar, supondremos que no existen pérdidas de carga en la tubería.

A la salida de la bomba colocaremos siempre una válvula de retención (que llamaremos A), aconsejable en la práctica, ya que libera a la válvula de pie del tubo de aspiración de recibir los efectos de la onda de sobrepresión, que podrían producir tracciones catastróficas sobre dicho tubo y quizá sobre la ban-

cada del grupo. En cambio, los efectos de la sobre-presión sobre la válvula *A* pueden absorberse fácilmente con un anclaje en la tubería.

Dada la proximidad existente entre la válvula *A* y la de pie, podemos prescindir de los efectos de

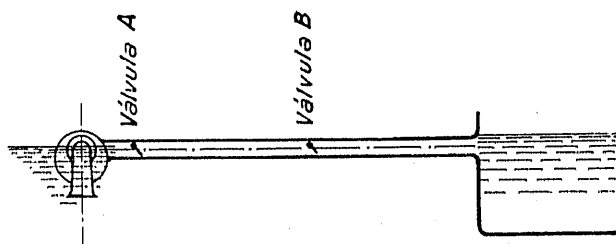


Figura 7.^a

ésta, ya que la que primero y realmente actúa es la *A*.

Compararemos los resultados con los que se obtengan al intercalar una válvula *B* en el punto medio de la tubería.

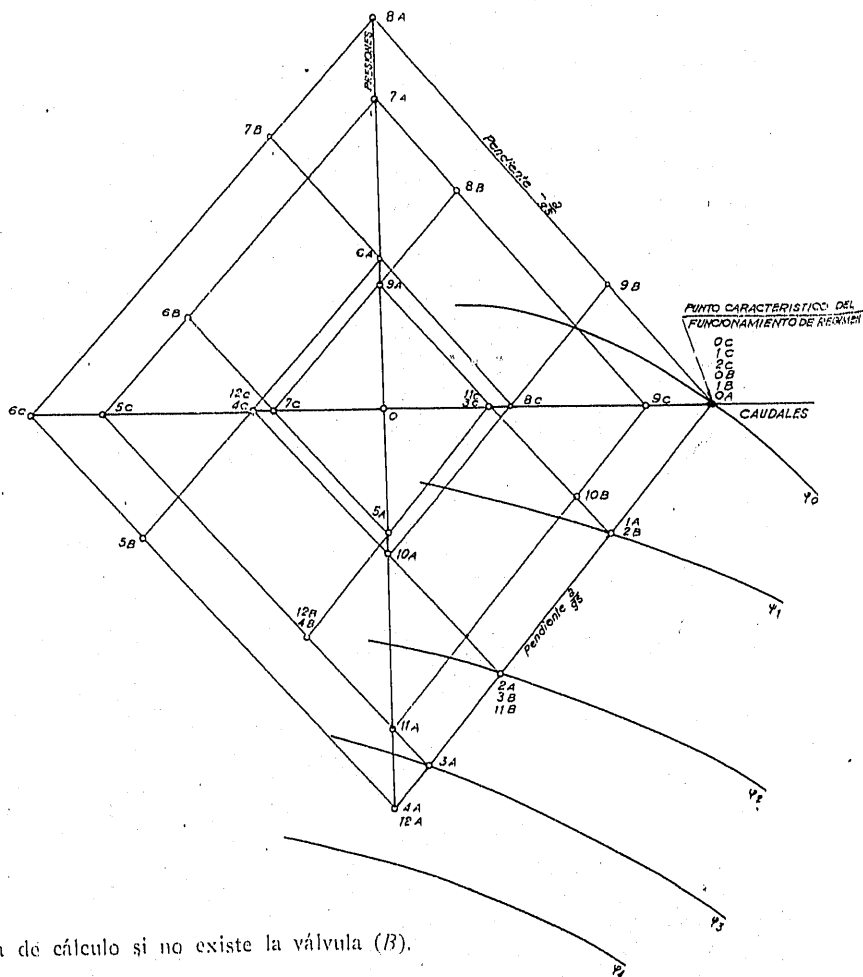
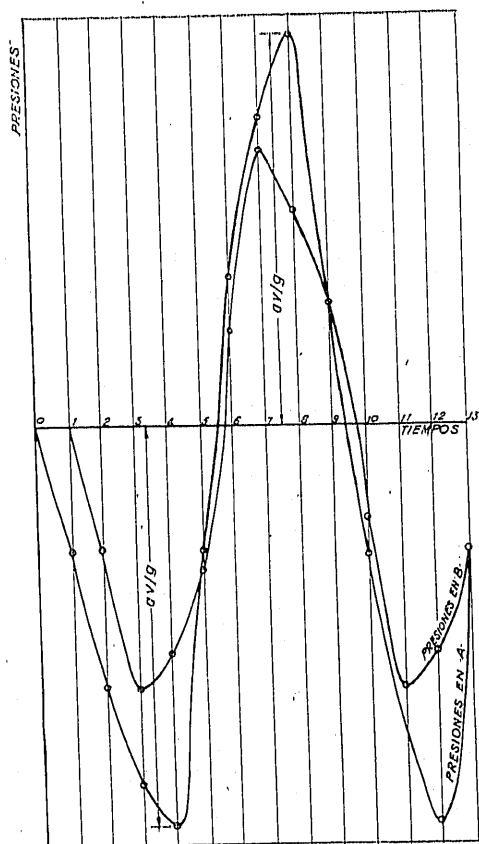


Fig. 8.^a — Presiones y diagrama de cálculo si no existe la válvula (*B*).

Denominaremos con un número y una letra a cada punto del plano; el primero, define el tiempo, y la letra, el punto de la tubería a que se refiere.

La intersección de φ_0 con el eje de caudales nos da el punto de funcionamiento antes de que ocurra la desconexión, y también los puntos $0A$, $0B$, y $1B$,

$\equiv 0$, condición impuesta por el hecho de que el depósito sea infinito) los puntos $3C$, $4C$ y $5C$.

Para obtener las presiones en B , basta que dos observadores partan en los mismos instantes de A y de C (para llegar simultáneamente a B), y la intersección de las rectas que definen los estados de caudal-

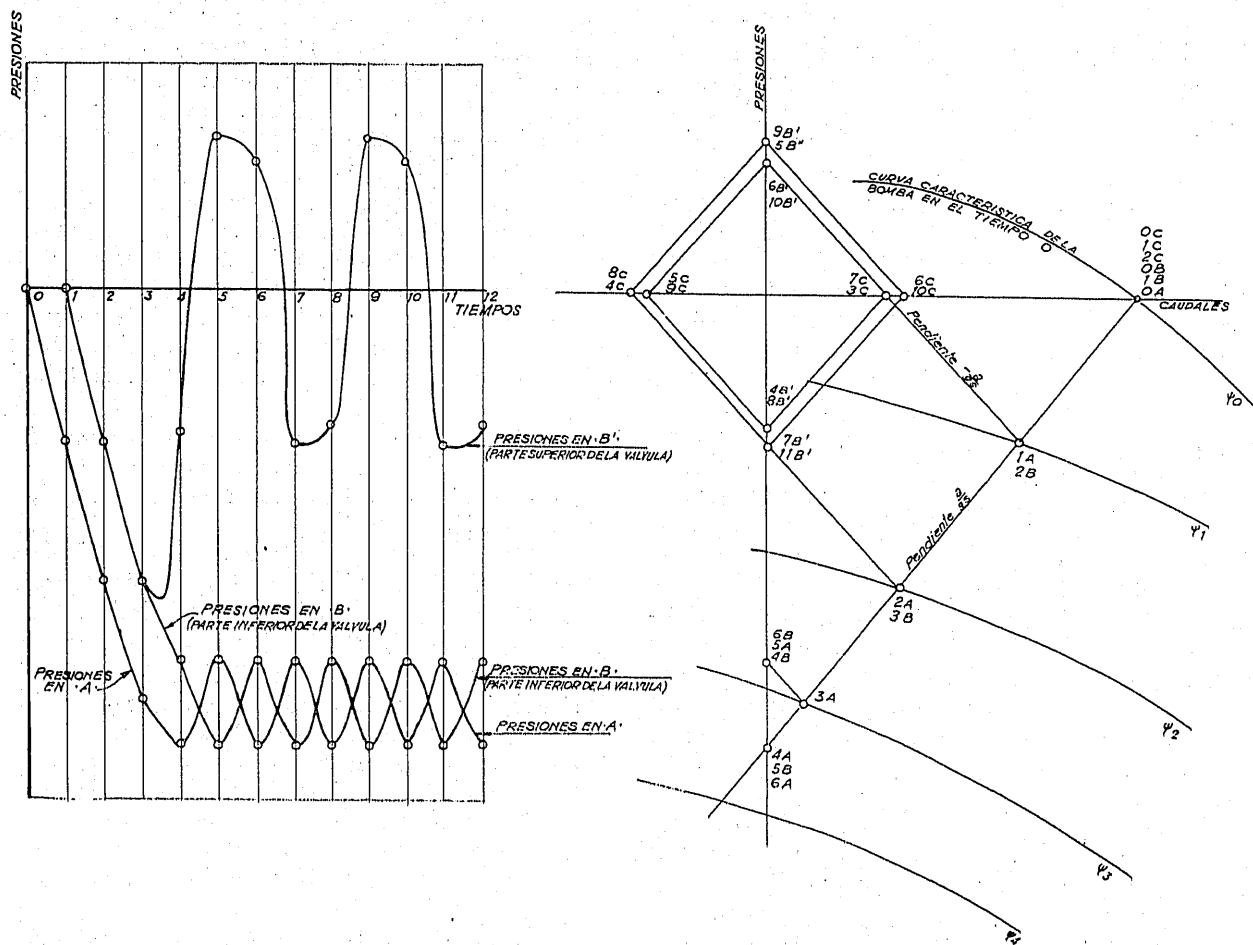


Fig. 9.ª — Presiones y diagrama de cálculo existiendo válvula en (B).

$0C$ y $2C$, que representan estados no influidos aún por el frenado del grupo.

La recta $(0A, 1A)$, de pendiente $+\frac{a}{gs}$, nos define los puntos $1A$, $2A$ y $3A$, situados sobre las curvas características correspondientes. El punto $4A$ no se encuentra sobre la curva 4, ya que sería necesario un caudal negativo, que no puede producirse porque la válvula A se cierra para impedirlo; se encuentra, por tanto, sobre el eje caudal $\equiv 0$. Trazando desde estos puntos rectas de pendiente $-\frac{a}{gs}$, obtenemos sobre la curva característica de C (presión

presión que van encontrando, nos proporciona los puntos $2B$, $3B$, $4B$ y $5C$.

Proseguimos de la misma manera y obtenemos las leyes de presión en A y B , que resultan periódicas por el hecho de haber despreciado los rozamientos.

Es aconsejable introducir en el cálculo las pérdidas de carga, de las que nosotros, para simplificar, hemos prescindido. La forma de hacerlo puede verse en la bibliografía citada oportunamente.

La figura 9.ª corresponde a las mismas hipótesis y curvas características, con la sola adición de una

válvula de retención en *B*. El comienzo del diagrama es el mismo, pero como en *B* no podemos tener caudales negativos, puesto que se cierra la nueva válvula, tenemos presiones distintas en la cara superior *B'* de la válvula y en la inferior *B*. Por lo demás, el cálculo es análogo.

Comparando los resultados de las figuras 8.ª y 9.ª, podemos deducir las siguientes conclusiones:

1.ª La ley inicial de depresiones junto a la bomba es la misma, se ponga o no la válvula intermedia. Si la tubería es larga, la depresión obtenida es $\frac{av}{g}$.

2.ª Las sobrepresiones consiguientes junto a la bomba quedan eliminadas; se mantienen valores próximos a la depresión anterior, sin superarla. Esta conclusión puede aconsejar las válvulas intercaladas en impulsiones de gran altura, en las que las grandes presiones estáticas junto a la bomba compensan las depresiones y no tolerarían sobrepresiones.

3.ª Queda muy agravada la situación de la parte inferior de la válvula intermedia, en el sentido de que ve aumentadas sus depresiones a valores iguales a los máximos posibles junto al grupo. Como la presión estática en el punto intermedio de la tubería es menor que la existente en su comienzo, no será, en general, suficiente para que no se rompa la columna líquida. Bien es verdad que, como no sobrevienen sobrepresiones posteriores, quedan, posiblemente, algo disminuídos los efectos nocivos de la depresión a que nos referimos en el apartado II; pero creemos que no son, a pesar de ello, aconsejables, aun cuando no haya peligro de aplastamiento de la tubería.

4.ª Respecto del tramo superior de la tubería, podemos decir que las depresiones en la parte superior de la válvula son las mismas que si no existiese ésta y que las sobrepresiones consiguientes han quedado disminuídas. Desgraciadamente no debe generalizarse esta última conclusión, pues existen muchos casos en los que las sobrepresiones que se obtienen son las mismas que sobrevendrían si no existiese la válvula intermedia, llegando incluso a obtenerse el valor máximo $\frac{av}{g}$. Debemos hacer notar que la figura 9.ª se refiere a un caso en que la tubería puede calificarse de "larga", pues cuando la onda de depresión iniciada en la bomba vuelve a ésta después de su reflexión en el final de la conducción, se encuentra la válvula *A* ya cerrada. Sin embargo, puede deducirse del gráfico que el momento de cierre ha sido muy poco anterior. Si la tubería hubiese sido mucho más larga, las sobrepresiones en *B* hubiesen sido, existiendo o no una válvula de retención en ese punto, las correspondientes al valor máximo. En consecuencia, no debe contarse *a priori* con una disminución de las sobrepresiones en la parte superior de la válvula intermedia.

Es fácil demostrar con el cálculo gráfico que en el caso teórico de una parada instantánea del grupo motobomba (el caso real más parecido es el de una tubería enormemente larga, pues siendo poco variables la velocidad de traslación de la onda del golpe de ariete, y el tiempo de parada del grupo, éste es muy pequeño en relación al tiempo que tarda dicha onda en recorrer la tubería), las variaciones de presión en la parte superior de la válvula intermedia son las mismas que si no existiese ésta, y que las presiones en su parte inferior adquieren un valor constante igual a la depresión máxima. Este resultado es independiente del punto de la tubería en que se coloque la válvula intermedia.

Una conclusión que puede sacar el lector es que conviene entonces poner la válvula *B* lo más cerca posible del extremo superior de la tubería, liberando así a la totalidad de ésta de sobrepresiones. Es peligroso pensar así, pues la posibilidad de rotura de la columna líquida (a causa de las depresiones) es tanto mayor cuanto más cerca del final de la tubería se coloque la válvula *B*.

Sin contar con que entonces no se cumplirían las hipótesis de cálculo, y por tanto los resultados obtenidos, podría llegarse a que no actuase esta válvula de retención.

De todo esto se deduce que es aconsejable la interposición de la tubería de una válvula de retención cuando, existiendo grandes alturas de impulsión, existe un largo tramo junto a la bomba con poco desnivel.

En otro caso hay que eliminar las bajas depresiones, bien colocando una ventosa que garantice que la presión no baja de la atmosférica, bien con la conexión de un depósito de agua, como explicaremos en el apartado próximo, bien con el uso combinado de un calderín de aire, o utilizando válvulas de retención perforadas que, al dejar pasar caudales estando cerradas, igualen algo las presiones aguas arriba y aguas abajo de ellas, obteniéndose resultados intermedios entre la válvula normal y la ausencia de ésta.

No adjuntamos estos cálculos, pues como el lector comprende fácilmente son análogos a los anteriores, así como el estudio de la colocación de más de una válvula intermedia.

Como contrapartida de las ventajas que representan las válvulas de retención, no hay que olvidar que aumentan las pérdidas de carga totales.

VII. Depósitos elevados.

A veces queda muy mejorado el golpe de ariete comunicando en derivación la tubería con un depósito elevado. No nos referimos, naturalmente, al caso en que el depósito tenga una altura tan grande que sea capaz, con su altura estática, de dar la altura piezométrica necesaria en el punto final de la impulsión; si esto fuera posible, es evidente que quedaría com-

pletamente resuelto el problema en el tramo de la tubería situado aguas arriba del depósito.

Nos referimos al caso representado esquemáticamente en la figura 10. En la parte inferior del depósito se coloca una válvula que, normalmente, está cerrada por efecto de la presión de la bomba. Únicamente se abre cuando la presión decrece más que la

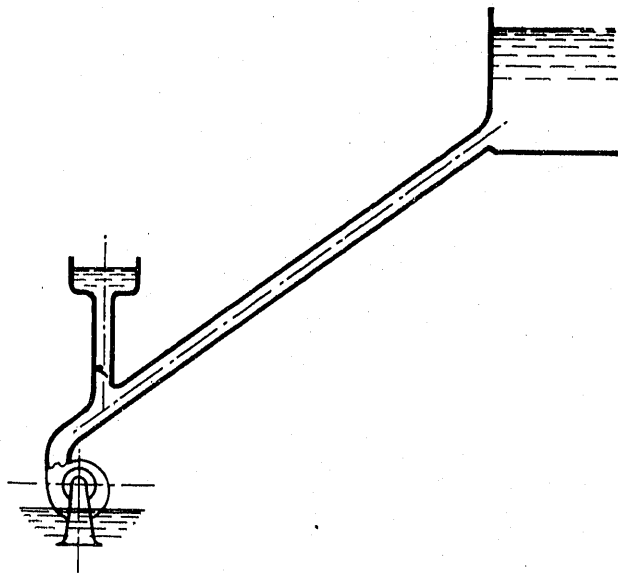


Figura 10.

que corresponde al nivel del depósito, garantizándose este valor en los puntos próximos de la tubería de impulsión mientras dure la fase de depresión y reduciendo en general los máximos de la siguiente fase de sobrepresiones.

No siempre es fácil que la válvula tenga un cierre estanco; por ello es imprescindible situar un aliviadero en el depósito.

Este sistema es análogo al del calderín de aire ya estudiado, pero que puede competir con él en casos en que, siendo grandes el caudal y la longitud de la impulsión (y, por tanto, el calderín de aire necesario), es, sin embargo, débil la altura geométrica de elevación.

Un caso claro de posible aplicación es el de los riegos por aspersión. Constan éstos de una impulsión ramificada, con poco desnivel topográfico en general, al final de cuyas derivaciones se colocan los aspersores, que necesitan presiones de funcionamiento de 20 a 50 m. de altura de agua (1).

Un depósito elevado que casi domine la zona regable, puede reducir las depresiones a valores in-

capaces de romper la columna líquida y las sobrepresiones a valores inofensivos.

Presentamos a continuación un ejemplo (1).

En la figura 11 puede verse el esquema de la instalación. Para mejor comprensión de lo que sigue, se han introducido simplificaciones que no afectan al método operatorio ni a la categoría de los resultados.

Las ramificaciones con aspersores que partían de los finales de la conducción, se han sustituido por dos únicos aspersores equivalentes llamados *C* y *D*; se ha prescindido de las pérdidas de carga en las tuberías y se supone un corte instantáneo.

El caudal en el punto *D* es el mismo que se necesita en *C*, y la velocidad es la misma en todos los puntos de la tubería, pues la sección del tramo *AB* es doble de la de los otros tramos. Las rectas características del método gráfico, correspondientes al tramo *AB*, tendrían, por tanto, una pendiente igual a la mitad de la de las otras rectas (suponemos que la velocidad de propagación *a* es la misma).

En la figura 12 se presenta el cálculo en el caso de la colocación de un depósito elevado junto al grupo. La unidad de tiempo adoptada es la que tarda la onda en ir de *A* a *B* o de *B* a *C*.

Por origen de presiones se ha tomado la cota topográfica de los regadores (igual para ambos), y la curva dibujada es la característica de estos aparatos. La recta *MN* representa el nivel, que consideramos constante, del depósito elevado, habiéndole descontado la diferencia de cota existente entre él y los regadores, para que, cuando al final del cálculo se sume a cada punto de la conducción las presiones estáticas, se obtengan los valores reales.

El punto que define las situaciones *A*₀, *B*₀, *B* (puntos *A* y *B* en los instantes 0 y 1 a partir de la desconexión del grupo) tiene la misma presión y doble caudal que el que define las situaciones de funcionamiento normal *D*₁, *D*₂, *D*₃; *C*₀, *C*₁, *C*₂, etc.

La recta de pendiente $+\frac{a}{gS}$ que parte del punto *B*₀, *B*₁, nos proporciona, por su intersección con la recta, características del depósito del punto *A*₁, *A*₂ (*S* es la sección del tramo *AB*).

Un observador que parta de *A* en el tiempo 3, encontrará en el tiempo 4 en *B* a observadores que hayan partido de *C* y *D* en los tiempos 3 y 2, respectivamente. Los estados caudal-presión que van encontrando dichos observadores, se hallan, respectivamente, en las rectas que parten de los puntos correspondientes y de pendientes $-\frac{a}{gS}$, para el

(1) Para documentarse sobre riego por aspersión, puede leerse el libro de García Lozano *Riegos por aspersión*, o el artículo de José M.^a Palá Catarineu, aparecido en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, julio de 1958.

(1) Las características de este ejemplo son muy parecidas a las de un caso real estudiado por nosotros. Se trata de una gran zona regable (de 1 000 Ha.), que se va a poner en riego por aspersión, servida por un único punto de impulsión, superficie que no es frecuente.

primero, y $+\frac{a}{g s}$, para los segundos, siendo s la sección de los tramos BC y CD .

Como en el punto B la suma de caudales ha de ser nula y la presión la misma, el punto característico B_4 se encontrará en la intersección de la primera recta con la obtenida sumando los caudales de las dos

1.ª La depresión inicial junto a la bomba, que si existe depósito elevado queda limitada a la correspondiente altura de éste, hubiera alcanzado en otro caso el valor máximo $\frac{a v}{g}$.

2.ª La sobrepresión consiguiente es inofensiva por alcanzar valores inferiores a los de régimen; de

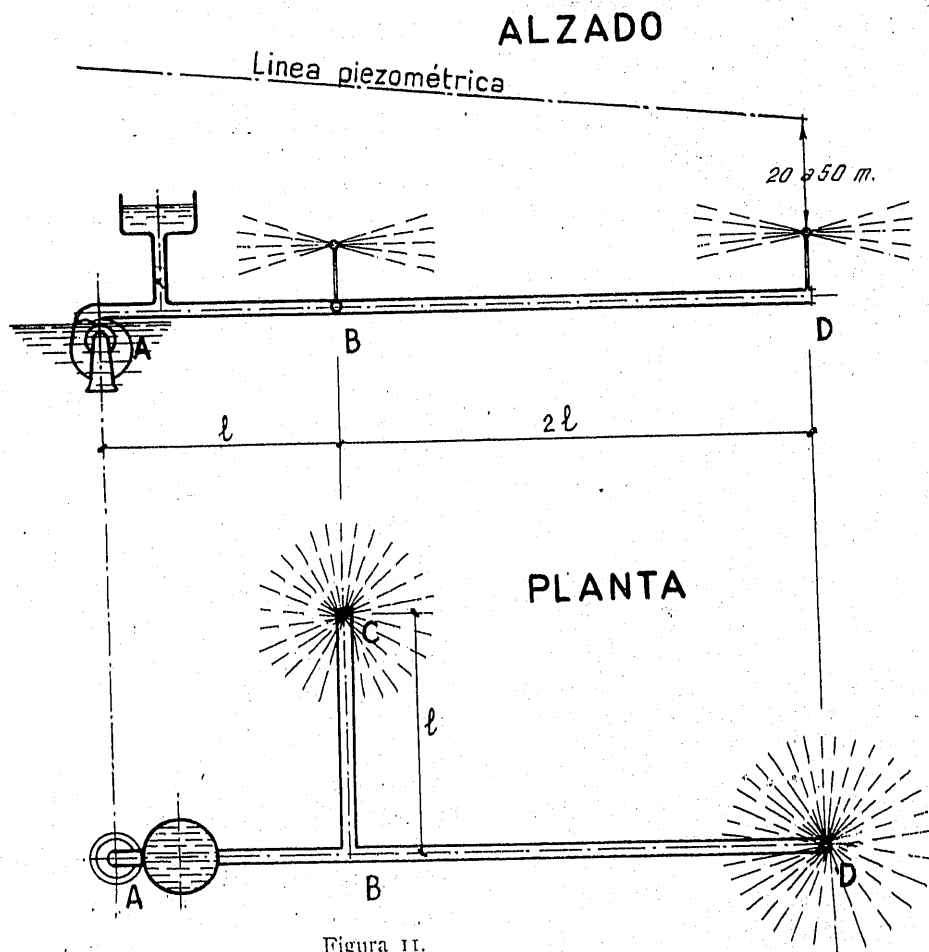


Figura 11.

últimas para los mismos valores de presión y que llamaremos $C_3 + D_2$. Los puntos B'_4 y B''_4 se encuentran en las intersecciones de la horizontal que pasa por B_4 con las respectivas rectas que han originado la $C_3 + D_2$.

El cálculo continúa de la misma forma, teniendo en cuenta que los estados correspondientes a los puntos C y D deben encontrarse siempre sobre la curva característica de los regadores. Las leyes de presión y caudal que se deducen del cálculo pueden verse en la misma figura 12. Es interesante cotejarlas con las de la figura 13, en la que se representa el mismo estudio sin la existencia del depósito elevado. Las conclusiones evidentes son:

no existir depósito, se hubieran alcanzado presiones muy superiores, aunque inferiores a $\frac{a v}{g}$.

3.ª La sobrepresión y la depresión inicial en el punto de bifurcación B quedan muy mejoradas por la existencia del depósito, aunque no queda garantizada la máxima depresión por la altura de éste.

4.ª La existencia del depósito elevado disminuye enormemente la entrada del aire en la tubería por los aspersores y puede anularla totalmente.

5.ª La capacidad necesaria del depósito elevado es fácilmente deducible integrando la curva de caudales suministrados por él y que se deduce inmediatamente del cálculo gráfico.

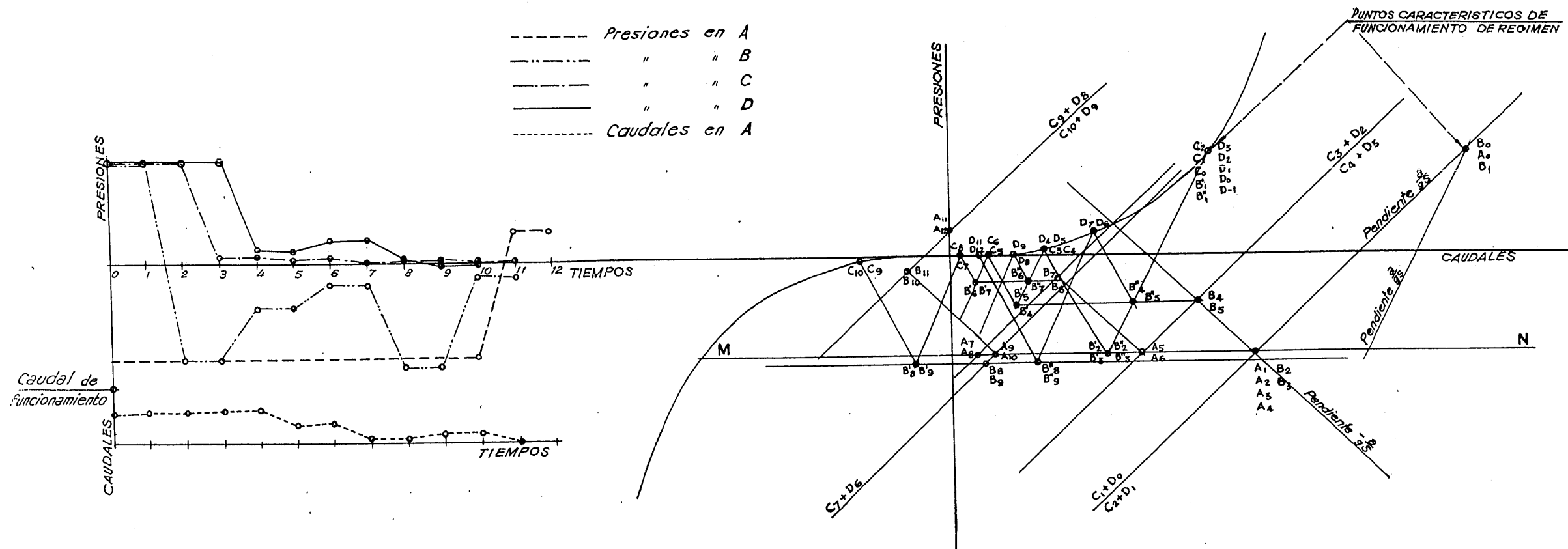


Figura 12.

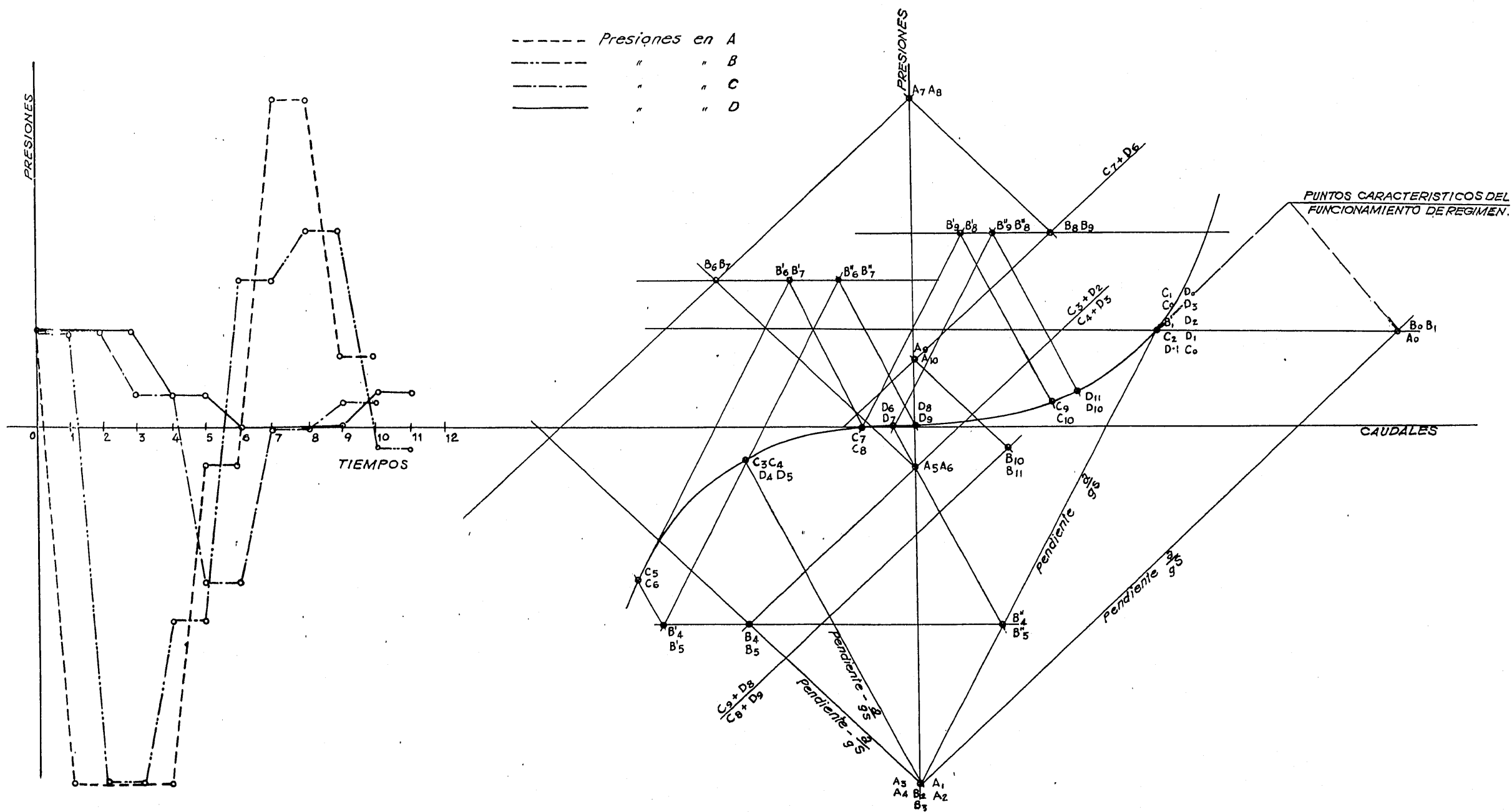


Figura 13.

VIII. Observaciones finales.

Quisiéramos haber resumido el problema de forma tal que sirviese para resolver todos los casos prácticos; pero lamentamos reconocer que no es así. El fenómeno del golpe de ariete es demasiado complejo para admitir un encasillado de soluciones, y cada caso particular merece un estudio especial en el que el Ingeniero debe mostrar sus conocimientos y su ingenio, sobre todo si se trata de grandes instalaciones.

Por ejemplo, en las grandes centrales hidroeléctricas de acumulación son imprescindibles los estudios de desviración del grupo motobomba e incluso tolerar el embalamiento de éste funcionando como turbina (1). En estos casos es necesaria la íntima colaboración del Ingeniero civil y del mecánico, y con frecuencia la subordinación de aquél a las soluciones aconsejadas por éste.

Mención especial merece el estudio de oleoductos, a los que es aplicable todo lo dicho, con las correc-

(1) Referencias de estos estudios pueden verse en diversos números de la revista *Sulzer*, concretamente en el número 1 de 1955.

ciones impuestas por su distinta densidad y sobre todo por su viscosidad (1).

No podemos terminar este artículo sin recordar que, puesto que casi todas las tuberías de impulsión están provistas de ventosas para la expulsión de aire, no debe olvidarse que, al presentarse la fase de depresiones, estos aparatos ponen en comunicación la columna líquida con la atmósfera, garantizando la presión de ésta en el punto correspondiente de la tubería y dejando entrar el aire. El cálculo queda entonces complicado, pero siempre asequible al método gráfico. De hecho existen en Francia impulsiones que han resuelto el problema del golpe de ariete por la mera colocación de ventosas, habiendo tenido la precaución de que éstas sean de cierre retardado, para dejar salir el aire que haya entrado previamente. Debemos concluir entonces con que el Ingeniero puede lucirse encontrando soluciones originales, y que la lista de éstas no está en absoluto agotada.

(1) A este respecto es interesante el artículo de John Green, "Pressure Test on oil Pipe Lines" (*Proceedings of the twenty-ninth annual meeting of the American Petroleum Institute*, 7 a 10 de noviembre de 1949) y el de Milton Ludwid y Sydney Johnson, "Prediction of Surge Pressures in Long Oil Transmission Lines" (*Proceedings of the thirtieth annual meeting of the American Petroleum Institute*, 13 a 16 de noviembre de 1950).