

TIEMPOS DE PARADA EN LAS IMPULSIONES

Por ENRIQUE MENDILUCE ROSICH

Doctor Ingeniero Industrial.

Premio Fundación March para la investigación técnica industrial.
(Jefe del Departamento Técnico Comercial de Uralita, S. A.)

Da cuenta el autor de las experiencias realizadas en numerosas impulsiones de distintas características que le han permitido llegar a una fórmula experimental que presenta y aplica, haciendo un breve resumen de su trabajo, que ha de ser objeto del Primer Coloquio Nacional sobre esta materia el próximo mes de abril.

Son, a nuestro juicio, varias las circunstancias que han contribuido a que no exista un criterio generalizado para traducir a atmósferas, la sobrepresión que hay que prever en una impulsión por parada brusca de bomba, siendo destacables tres de estos motivos que pueden explicar, en parte, esta situación anacrónica, en tiempos en que se hace blanco en la Luna, a pocos kilómetros del punto previsto.

El primero es el poco conocimiento físico del golpe de ariete, ya que estudiando la bibliografía de que se dispone, se observa esta falta de identificación con el desarrollo físico del fenómeno, lo que evidentemente dificulta la comprensión del sistema de cálculo y prevención.

En segundo lugar, podemos señalar la utilización generalizada del sistema gráfico de Bergeron, que es insustituible, si deseamos conocer las leyes de variación de las presiones, de interés en saltos de agua, pero que no resulta el adecuado para el cálculo en caso de impulsiones, aportando, además, una laboriosidad excesiva.

En tercer lugar, y de forma destacada, hay que señalar la falta de antecedentes o estudios sobre el valor del tiempo, que en caso de impulsiones no es de cierre o de apertura, sino de parada, cuyo conocimiento es imprescindible para la elección de la fórmula que procede aplicar al cálculo.

Es curioso observar, como decimos, la ausencia de orientación alguna a este respecto, ya que si en saltos de agua este tiempo es el de accionamiento de válvulas o reguladores y, por lo tanto, perfectamente conocido, en impulsiones, al producirse la parada por corte brusco de corriente, es un factor impuesto por la naturaleza y sobre el que no podemos actuar, salvo utilizando algún sistema de prevención.

Por este motivo, la fundamental preocupación que nos produjo la investigación sobre el tema, que hemos ultimado bajo los auspicios de la Fundación Juan March, ha sido aportar nuestra contribución en el relleno de esta laguna, que los técnicos vienen salvando de manera caprichosa, tomando valores para el tiempo de forma estimativa, o bien eligiendo el sistema gráfico de Bergeron, que elimina este dilema al tratar de la misma forma el problema, cualesquiera que sean las características de la impulsión.

Según la discusión clásica, la fórmula de Michaud es de aplicación en el caso en que $T > \frac{2L}{a}$, pero puesto que el tiempo de parada ya hemos indicado que no puede considerarse como auténtica variable en las impulsiones, la transformación de la anterior expresión en $L < \frac{aT}{2}$ aclara perfectamente las ideas, puesto que nos dice que esta fórmula será de aplicación, con exclusión de la de Allievi, en aquellas instalaciones cuya longitud sea menor que la mitad del recorrido de la onda en el tiempo de parada y, por lo tanto, llamaremos "cortas".

En los múltiples trabajos sobre el golpe de ariete que tenemos consultados, no hemos encontrado, como ya hemos indicado, alusión alguna al valor adecuado de T o a la forma de calcularlo y esto es lo que nos propusimos establecer, como primer obstáculo en el camino que nos marcamos.

Nos parecía lógico pensar que T debía ser el tiempo que tarda el grupo en pararse, y por ello, la iniciación de nuestras investigaciones fué encaminada a efectuar esta medición en el mayor número de casos.

Elegimos en primera instancia una impulsión

“corta” con un grupo motobomba vertical con bomba sumergida a 30 m. l., lo que permitía prever una parada rápida, debida al rozamiento del árbol de transmisión, en los varios cojinetes de sujeción.

En estas condiciones, cronometramos reiteradamente el tiempo transcurrido desde el instante del corte de corriente provocado intencionalmente y la parada del grupo, obteniendo en todos los ensayos el tiempo de doce segundos.

Simultáneamente, mediante un manómetro registrador colocado en la iniciación de la impulsión, determinamos el valor de la sobrepresión máxima, y con ello ya tuvimos todos los datos que intervienen en la fórmula de Michaud, pero nuestro entusiasmo investigador sufrió un rudo golpe, ya que para la sobrepresión registrada, el tiempo cronometrado resultaba cuatro veces mayor que el debido, para que la aplicación de esta fórmula diera el resultado observado.

Comprendimos el error que estábamos cometiendo después de realizar otros ensayos de esta forma, ya que no interesa conocer el tiempo empleado por la bomba en pararse, sino el

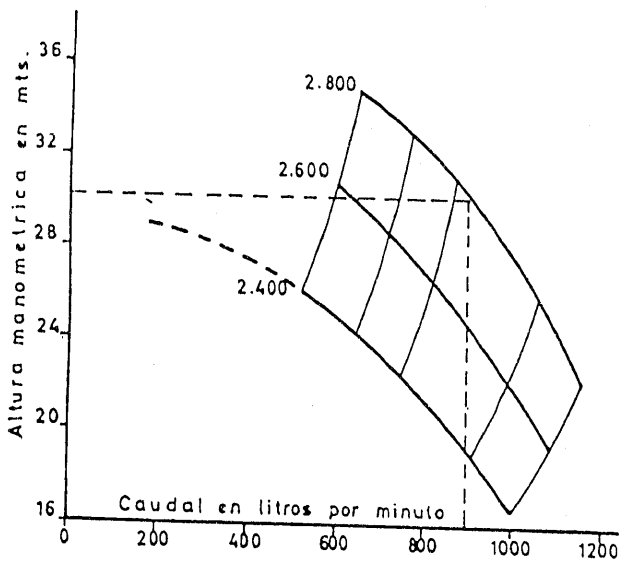


Fig. 1.ª — Curva característica de una bomba.

tiempo que tarda en anularse la velocidad del agua, que es notablemente menor, ya que a partir de una pérdida relativamente pequeña de revoluciones de la bomba, el agua deja de ser impulsada a la altura de impulsión.

Efectivamente, si nos fijamos en la curva característica de una bomba elegida al azar, figura 1.ª, comprobamos que a 2 800 revoluciones

nos elevaría 900 l./m. a 30 m. de altura. Suponiendo el corte de corriente y parada progresiva de la bomba, vemos que bastaría una pérdida de 400 revoluciones para que dejase de alcanzar la altura de impulsión de 30 m., lo que representa que con una pérdida del 15 por 100

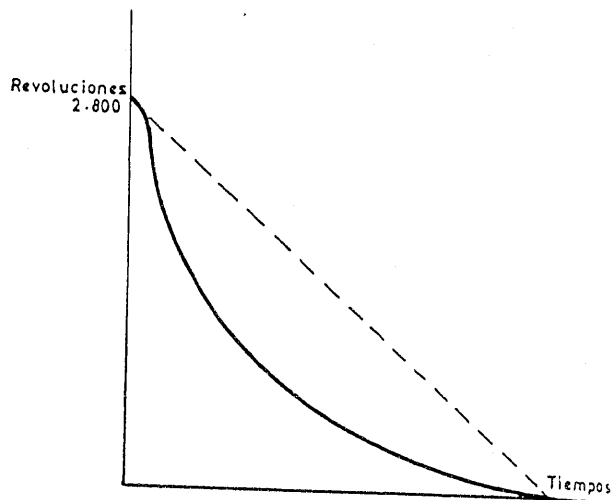


Fig. 2.ª — Gráfico de parada de bomba.

de las revoluciones de régimen, la bomba deja de impulsar a la altura prevista convirtiéndose en un agitador. Si la pérdida de revoluciones fuese lineal, el tiempo de parada de la elevación sería el 15 por 100 del que tardase el grupo en pararse, pero como esto no ocurre así, sino que la caída de revoluciones viene representada por una curva parabólica semejante a la de la figura 2.ª, el tiempo que tarda en dejar de elevar agua la bomba resulta proporcionalmente más pequeño aún.

Queda en evidencia, en primer lugar, que el tiempo en que la bomba deja de elevar el agua a la altura de impulsión, es muy pequeño en comparación con el que tarda el grupo en pararse, y en segundo lugar, que este camino de cálculo no puede resultar práctico por su dificultad material y por el desconocimiento por parte del proyectista de las características exactas del grupo, que en definitiva pueda instalarse al ejecutar las obras.

Por otra parte, el cálculo de la potencia del grupo se efectúa partiendo de las pérdidas de carga de un tipo determinado de tubería, siendo muy frecuente que en la ejecución de la obra se adopten tuberías con pérdidas de carga distintas a las previstas, y entonces el grupo funcio-

na más o menos holgado, influyendo en el tiempo que tratamos de determinar.

A través de todas estas consideraciones, llegamos a la conclusión de que el tiempo que tarda el grupo en perder su acción elevadora a la altura de la impulsión, a partir del instante del corte de corriente, es menor de forma general que el que tarda en consumirse la energía cinética del agua en ese instante, por la acción de la gravedad y el rozamiento con las paredes de la tubería.

En la teoría general del golpe de ariete el tiempo T es el intervalo entre la iniciación del cierre de válvula y su cierre total, instante este último que coincide con la anulación del caudal y, por consiguiente, de la velocidad. En impulsiones, este tiempo habrá de ser el que transcurre entre el corte de corriente y la anulación de la velocidad del agua.

Podemos plantear el cálculo analítico partiendo del balance de energías que intervienen, despreciado el efecto del rozamiento, de escaso valor en general, frente a la altura geométrica, y de esta forma simplista obtener la relación de dependencia de los elementos que caracterizan una impulsión.

Si consideramos que la energía cinética, en el momento del corte de corriente, ha de absorberse por la acción de la gravedad sobre el agua elevada después de este corte, tenemos:

Energía cinética:

$$\frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \frac{1000}{g} \frac{\pi D^2}{4} L V^2 = \frac{1000}{2g} Q L V \text{ Kgm.}$$

Energía de la gravedad:

Suponiendo el decrecimiento lineal del caudal desde Q a 0 , en el tiempo T , el volumen de agua elevada es $\frac{Q T}{2}$ y la energía gastada es

$$1000 H \frac{Q T}{2} \text{ Kgm.}$$

Iguando estas energías:

$$\frac{1000 Q L V}{2g} = \frac{1000 H Q T}{2},$$

de donde:

$$T = \frac{L V}{g H}.$$

Evidentemente, el resultado obtenido es atractivo, y por ello, sin perder de vista este cálculo analítico, que recoge dos circunstancias

que ya estaban en nuestra imaginación en espera de su experimentación práctica, que son la influencia directa de la velocidad y la indirecta de la pendiente de la instalación en el valor de T , orientamos nuevamente nuestro trabajo hacia la obtención de datos experimentales, para contrastarlos con la vía analítica.

Hemos dicho que en impulsiones el tiempo T tiene que ser el intervalo entre el corte de corriente y la anulación de la velocidad o del caudal. Cabe, por tanto, una investigación directa estableciendo comunicación entre la casa de máquinas y el depósito final para cronometrar el tiempo citado.

La toma de tiempos puede hacerse, en la mayoría de los casos, por dos sistemas, que sirven de comprobación, ya que coincide sensiblemente el cese de la llegada de agua al depósito con el cierre de la válvula de retención, perfectamente audible en la mayoría de los casos.

A este fin, provistos de radio-teléfonos, de valor inestimable para estos trabajos de campo, nos dedicamos a tomar tiempos de parada de diversas impulsiones en servicio, de características muy diferentes, obteniendo resultados que si bien demuestran que la relación que establece la vía analítica entre T , V y la pendiente, es real; sin embargo, los valores obtenidos resultan de una disparidad notable en determinados casos.

Estudiando las discrepancias entre los resultados prácticos obtenidos directamente de la experimentación y los proporcionados por la fórmula elemental establecida, apreciamos que en ésta no se ha tenido en cuenta la energía aportada por la inercia del grupo, que aunque sea por un tiempo muy corto, continúa elevando agua después del corte de corriente, circunstancia que tiene proporcionalmente más influencia en los tiempos de paro cortos.

Por otra parte, si bien es cierto que la pérdida de carga o rozamiento tienen en general muy escaso valor en relación con la altura de elevación en las impulsiones cortas, puede haber casos en que así no ocurra, y esto mismo sucede en las impulsiones largas, en las que precisamos el tiempo de parada, para determinar el punto de coincidencia de Michaud y Allievi, por lo que es muy conveniente tenerla en cuenta en este cálculo.

Conjuntando todo ello hemos llegado al establecimiento de una fórmula, que conservando

la estructura básica, obtenida analíticamente, tiene en cuenta la energía aportada por la bomba después del corte de corriente, mediante un parámetro fijo y un coeficiente, y la pérdida de carga es introducida al operar con la altura manométrica.

Esta fórmula es la siguiente:

$$T = 1 + \frac{K L V}{g H m}$$

que proporciona una aproximación muy aceptable y en consonancia con la de los valores de caudal y alturas geométricas y manométricas que habitualmente se manejan en los proyectos y que en el momento de la ejecución sufren variaciones a causa de distintos rendimientos de los grupos, pérdidas de carga de la tubería elegida, emplazamiento de motores o depósito, etc.

Esta fórmula, pone fin a la marcada desorien-

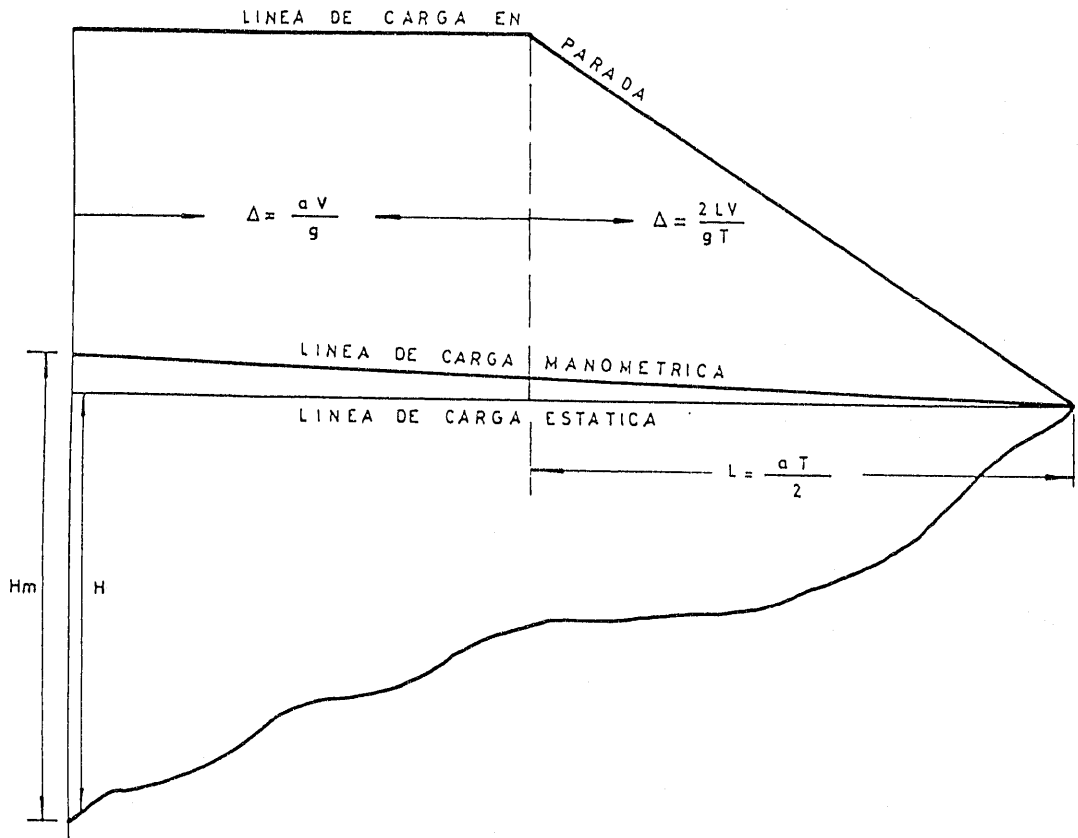


Fig. 3.ª — Representación gráfica del golpe de ariete máximo.

Siendo:

L = Longitud de la tubería en metros.

V = Velocidad en metros por segundo.

Hm = Altura manométrica de elevación.

T = Tiempo de parada en segundos.

K = Coeficiente experimental $\left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ para } L < 500 \\ 1,5 \text{ para } 500 < L < 1500 \\ 1 \text{ para } L > 1500 \end{array} \right.$

No pretendemos que esta fórmula experimental aporte un rigor matemático a los valores de T deducidos de ella, pero garantizamos

tación en cuanto al tiempo de parada, permitiéndonos establecer con gran aproximación el punto $L = \frac{aT}{2}$ de coincidencia de los valores de Michaud y Allievi y, por tanto, nos proporciona la seguridad en la correcta elección de la fórmula que debe aplicarse en cada caso.

Una consecuencia inmediata de nuestras deducciones en este terreno, es la ampliación del campo de aplicación de Michaud, ya que con pendientes pequeñas, la longitud de las impulsiones "cortas", en las que $L < \frac{aT}{2}$ puede alcanzar valores elevados.

En efecto, en nuestras experiencias hemos llegado a controlar tiempos de parada desde 1 hasta 27 segundos para pendientes desde el 30 por 100 al 0,35 por 100, cuyos valores reales encajan en la fórmula expuesta.

La sobrepresión en parada brusca registrada en una impulsión de 1370 m. de tubería de amianto-cemento de 400 mm., con una velocidad de 0,9 y altura manométrica de 7 m., fué de 9 m., correspondiente a los 27 segundos de parada. Si, según el criterio internacional, se aplica a este caso el método gráfico de Bergeron, es decir Allievi, el resultado teórico obtenido sería de 75 m. de golpe de ariete, lo que habría de representar un encarecimiento notable e innecesario de la tubería.

Se deduce igualmente de lo que indicamos, que en impulsiones horizontales, con vertido libre en su extremo, no se produce sobrepresión alguna en parada brusca.

Aconsejamos, por el contrario, gran precaución en las impulsiones con pendientes superiores al 50 por 100, para las cuales nuestra fórmula no es de aplicación por dar resultados superiores a los reales y, por ello, debe efectuarse el cálculo por Allievi e incluso afectar el resultado del coeficiente 1,75 recomendado por Spurre para mayor seguridad.

Es preciso advertir que la altura manométrica a tener en cuenta, se refiere a la tomada inmediatamente aguas arriba de la bomba y por ello, en los casos de bombas sumergidas, será imprescindible partir del nivel del agua del

pozo, circunstancia que, sin embargo, no influirá si las bombas son horizontales.

Como consecuencia de lo que antecede, ya podemos efectuar la discusión inicial de las fórmulas que deben utilizarse en el cálculo del golpe de ariete con perfecto conocimiento de todos los datos necesarios, recomendando que en lugar de efectuarla en la forma tradicional:

$T > \frac{2L}{a}$, se efectúe partiendo de $L \leq \frac{aT}{2}$ que nos proporciona una idea más clara, para poder calificar de "corta" o "larga" la instalación que se estudia.

Si la impulsión es "corta", es decir, si $L < \frac{aT}{2}$, el cálculo debe hacerse exclusivamente por la fórmula de Michaud, y si resulta "larga" será necesaria además la aplicación de Allievi en la parte de la instalación que le corresponda.

La representación gráfica de la línea de carga en parada imprevista de bomba, será la de la figura 3.ª, en la que claramente queda definido el método operatorio.

Puede compararse la situación en que hemos encontrado el cálculo de esta sobrepresión al iniciar nuestras investigaciones, a un rompecabezas parcialmente desordenado al cual le faltaba la pieza fundamental.

Confiamos que nuestro trabajo, objeto del Primer Coloquio Nacional sobre esta materia, del mes de abril de este año, contribuya a la completa ordenación, simplificación y divulgación del método de cálculo del golpe de ariete y de su posible prevención.