

Utilización de calderines y válvulas de retención intermedias como sistemas de protección contra transitorios hidráulicos.

Tema D (estructuras hidráulicas)

Espert Alemany, V.B.

Grupo ITA. Universidad Politécnica de Valencia

vespert@ita.upv.es

García-Serra García, J.

Grupo ITA. Universidad Politécnica de Valencia

jgarcias@ita.upv.es

Cobacho Jordán, R.

Grupo ITA. Universidad Politécnica de Valencia

rcobacho@ita.upv.es

Soriano Olivares, J.

Grupo ITA. Universidad Politécnica de Valencia

jasool@ita.upv.es

1. Introducción

En los sistemas hidráulicos a presión, tanto aducciones como impulsiones simples o redes de distribución de agua, las maniobras de válvulas o estaciones de bombeo provocan cambios en el punto de funcionamiento del sistema desde las condiciones iniciales de régimen permanente hasta las condiciones finales también de régimen permanente. Pero durante el tránsito entre las dos situaciones inicial y final se producen una serie de transformaciones de energía que van de energía cinética a energía de presión y viceversa. Por ello en el sistema se producen oscilaciones de velocidad, caudal y presión, las cuales con el tiempo tienden a amortiguarse por acción de las pérdidas de carga hasta alcanzar las condiciones finales de equilibrio.

Durante el transitorio, las oscilaciones de presión pueden someter al sistema a presiones máximas que pongan en peligro sus componentes si su resistencia mecánica no es la adecuada. Además, en caso de presiones mínimas negativas se puede producir colapso de tuberías elásticas si su relación espesor/diámetro es relativamente baja. O en caso de que las presiones mínimas alcancen la tensión de vapor del agua, se formarán bolsas de vapor con posible separación de columna líquida. Posteriormente, en la fase sobrepresiva, los aumentos de presión condensarán el vapor de agua formado, con el consiguiente choque de las columnas líquidas cuando la bolsa de vapor desaparece. Esta recuperación de las columnas líquidas puede producir un pico de presión mayor que el transitorio sin separación de columna.

Se justifica de esta manera que se diseñen las tuberías con suficiente espesor para soportar las oscilaciones de presión producidas por los fenómenos transitorios, y así evitar peligro de roturas. O bien se instalen sistemas de protección que consigan disminuir las oscilaciones de presión producidas. De esta manera las presiones máximas serán menores y las presiones mínimas mayores, lo cual permitirá disminuir el espesor de las tuberías a instalar. Todo ello, siempre y cuando el ahorro en costo de tubería compense el costo de instalación y mantenimiento del sistema de protección.

En las estaciones de bombeo, los sistemas de protección más utilizados son los calderines conectados al colector de impulsión de las bombas, los cuales contienen agua y una determinada masa de gas comprimido a la presión de régimen (aire o nitrógeno, según el caso). Tras la parada de las bombas, al disminuir la presión de impulsión por disminución de la velocidad de rotación del rodete, el gas del interior del calderín impulsa el agua almacenada, cerrando la válvula de retención a la salida de las bombas y continuando la alimentación de la tubería de impulsión aunque a caudales decrecientes. De esta manera, al lograr que la detención del flujo no sea tan brusca, se logran reducir las oscilaciones de presión. En esta fase del proceso el gas del calderín se va expandiendo, su presión disminuye, y el flujo por la tubería se va deteniendo.

Al detenerse el fluido, y debido a que en estas condiciones el agua no está en equilibrio, se inicia su retroceso entrando al interior del calderín, comprimiendo el gas y aumentando su presión. Estos aumentos de presión consiguen detener de nuevo el fluido, siendo impulsado otra vez por la presión de compresión del gas y repitiéndose el proceso, con oscilaciones decrecientes hasta la parada completa del fluido.

2. Parámetros de diseño de calderines. Caso de estudio

Se comprende que la efectividad del calderín como sistema de protección contra transitorios hidráulicos, principalmente en estaciones de bombeo, depende de una serie de parámetros de diseño que condicionan tanto las oscilaciones de presión como la amplitud de dichas oscilaciones. Se pretende pues, en la presente comunicación, pasar revista a estos parámetros y, lo que es más importante, comprobar el efecto de sus variaciones de cara a optimizar la capacidad de protección del calderín.

Para ello partiremos de un caso ya resuelto como es el sistema de protección diseñado para la estación de bombeo de Moixent, una de las cuatro estaciones de bombeo del trasvase Júcar-Vinalopó. Las características globales de la instalación son las siguientes:

- Caudal nominal impulsado 4.500 l/s
- Altura geométrica de la impulsión 280'10 m
- Tubería de impulsión de acero helicosoldado, longitud 15.549'25 m, diámetro nominal 1.800 mm, rugosidad absoluta 0'2 mm y celeridad 937'16 m/s
- Instalación de cuatro bombas verticales en paralelo, con punto óptimo de funcionamiento $Q_b = 1.064$ l/s, $H_b = 324$ m, $\eta_b = 87'05$ %, $N = 985$ rpm

El sistema de protección está compuesto por tres calderines horizontales de vejiga, con las siguientes características para cada calderín:

- Volumen total 35 m³
- Diámetro de la tubería de entronque 600 mm
- Diámetro del by-pass 400 mm
- Coeficiente de pérdidas para flujo de salida del calderín 1'75 m/(m³/s)²
- Coeficiente de pérdidas para flujo de entrada al calderín 250 m/(m³/s)², efecto de una placa orificio situada en el by-pass
- Presión de hinchado 120 mca = 11'77 bar

En la figura 1 se indica el perfil de la conducción, con la línea de cavitación en la parte inferior de dicho perfil, y la línea de alturas piezométricas en condiciones de régimen cuando funcionan las cuatro bombas con caudal total impulsado 4.707 l/s. Vemos que este perfil se puede dividir en dos partes, una primera con pendiente media uniforme entre las cotas aproximadas de 375 y 490 m, con una longitud de tubería de 14.800 m (pendiente media 0'81 por mil), y una segunda parte entre las cotas 490 y 650 m con longitud aproximada 750 m (pendiente media 21'33 por mil).

Para esta instalación se va a simular el transitorio originado por la parada simultánea de las cuatro bombas en marcha pero modificando el valor de los parámetros de diseño más importantes del sistema de protección, para comprobar el efecto que producen dichas modificaciones. Todas estas simulaciones se van a realizar haciendo uso del programa ALLIEVI, programa de análisis y simulación de transitorios hidráulicos desarrollado por el ITA de la Universidad Politécnica de Valencia. En la figura 2 se indica el esquema utilizado para la simulación.

3. Transitorio originado por parada de bombas con o sin protección

Se simula en primer lugar el transitorio originado por la parada simultánea de las cuatro bombas en marcha sin o con calderines de protección. En la figura 3 se presentan las envolventes de altura piezométrica máxima y mínima a lo largo de la tubería de impulsión en ambas simulaciones. Se observa que, en caso de parada de bombas sin protección, se obtienen presiones negativas en la parte final de la tubería, tramo de mayor pendiente, dando origen en esta zona a presiones incluso menores que la tensión de vapor del agua. En el tramo de menor pendiente las presiones mínimas son aún positivas, ya que la presión de régimen (del orden de 225 mca) es superior al pulso máximo de Joukowski (del orden de 180 mca). La presión máxima alcanza el valor de 434 mca, figura 4, inadmisibles al ser la tubería de PN40.

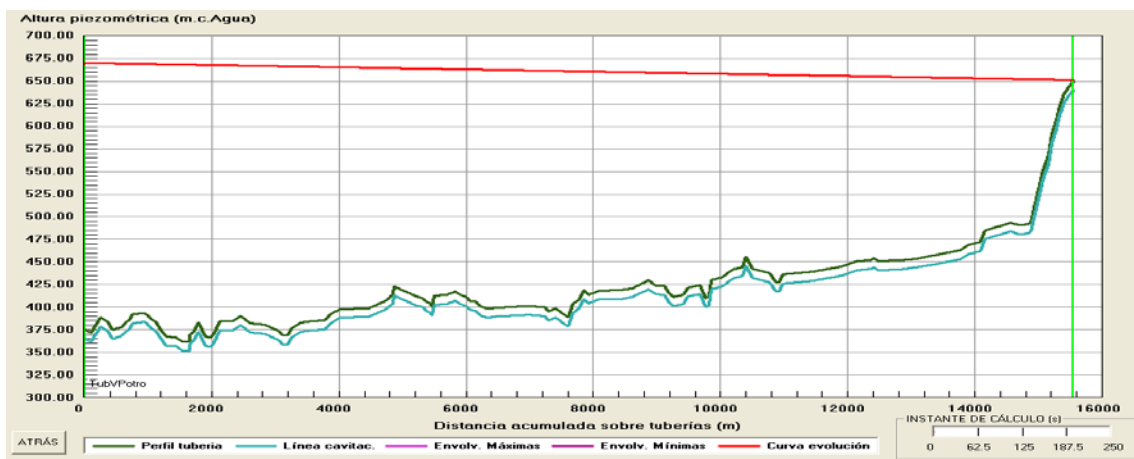


Figura 1. Perfil de la impulsión objeto de estudio

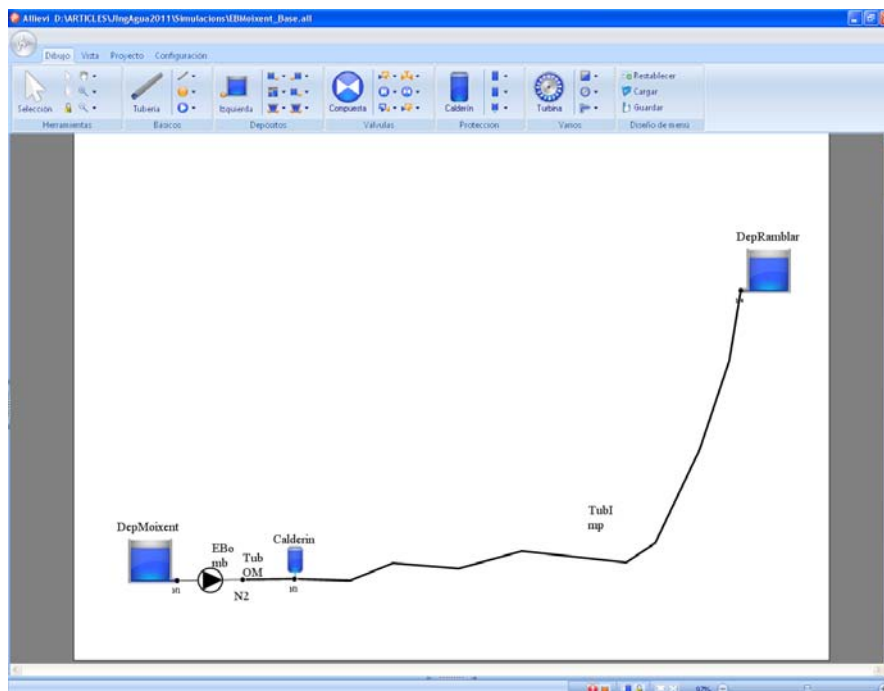


Figura 2. Esquema de la impulsión para el desarrollo de las simulaciones

En caso de parada de bombas con calderines de protección, figura 3, las presiones mínimas son todas positivas, excepto un pequeño tramo al final de la conducción donde llegan a darse presiones ligeramente menores que la atmosférica. La presión máxima se da a la salida de la estación de bombeo y vale 400 mca, figura 4, valor admisible al ser una presión puntual y no permanente. En la misma figura se indica la evolución del volumen de agua en el interior de cada calderín, la cual resulta totalmente admisible.

4. Coeficiente de pérdidas para flujo de entrada al calderín

Los coeficientes de pérdidas para flujo de salida y entrada al calderín tienen que reflejar las pérdidas en la tubería de entronque, en la cual se dispondrá una válvula de retención para el flujo de salida y un by-pass para el flujo de entrada. Además, estos coeficientes deberán incluir las pérdidas en la boca de conexión del calderín, en la cual se dispondrá una rejilla, en caso de calderín con vejiga, para evitar que dicha vejiga penetre en la tubería de entronque durante el proceso de hinchado.

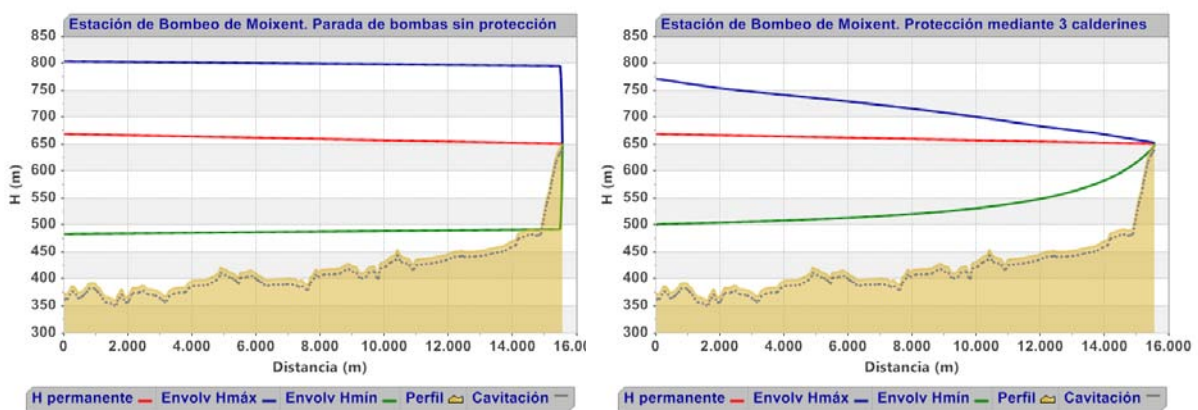


Figura 3. Envolturas de altura piezométrica máxima y mínima en caso de parada de bombas sin y con protección mediante calderines

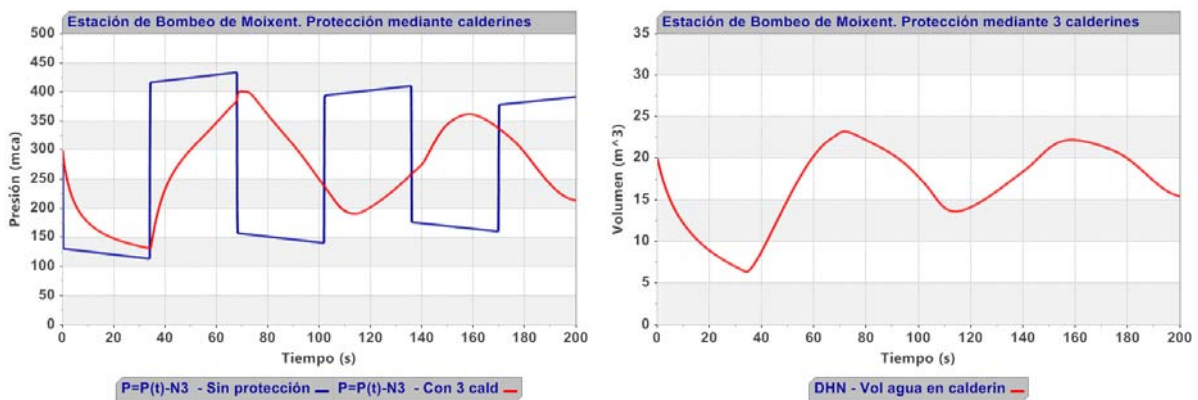


Figura 4. Evolución de presiones a la salida de la estación de bombeo para parada de bombas sin y con protección, y evolución del volumen de agua en el interior de cada calderín

En general, durante el transitorio se deberá facilitar la salida de agua del calderín para mantener la alimentación de la tubería cuando circula caudal ascendente. Esta alimentación de la tubería desde su extremo inferior evita, o deberá evitar, presiones mínimas excesivamente bajas y, en todo caso, presiones negativas. Se consigue reduciendo al máximo las pérdidas en la conexión de entronque, eligiendo adecuadamente la válvula de retención que abre en el sentido de salida del flujo desde el calderín.

Por otra parte, en el retroceso el flujo el agua entrará al calderín a través del by-pass instalado en la tubería de entronque (la válvula de retención cierra), hasta detenerse al aumentar la presión del gas por efecto de la compresión. En esta fase las pérdidas en el entronque deberán ser altas, para ayudar junto a la fricción a disipar la energía del agua en su movimiento entre tubería y calderín. En la estación de bombeo que nos ocupa estas pérdidas elevadas se consiguen mediante una placa orificio instalada en el by-pass, cuyo coeficiente de pérdidas para flujo de entrada al calderín se añadirá al coeficiente de pérdidas de los accesorios en del entronque.

Para los calderines de la estación de bombeo de Moixent, el coeficiente de pérdidas en el entronque para flujo de salida del calderín se ha tomado de $1,75 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$. En principio no hay necesidad de bajar el valor de este coeficiente, pues las presiones mínimas producidas son perfectamente asumibles.

Respecto del coeficiente de pérdidas para flujo de entrada al calderín, el valor adoptado es de $250 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$, conseguido mediante una placa orificio instalada en el by-pass de la tubería de entronque. Se ha simulado el transitorio por parada de bombas pero modificando este coeficiente, con objeto de observar la diferencia entre los resultados obtenidos. Estas simulaciones se han llevado a cabo tomando como valores del coeficiente de pérdidas de 125, 250 y $375 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$, presentándose los resultados en la figura 5. En esta figura vemos la evolución de presiones a la salida de la estación de bombeo y del volumen de agua en los calderines. Se observa que la presión máxima disminuye con el aumento de este coeficiente, y ello por el efecto de disipación de energía que produce. Como no interesa que este coeficiente de pérdidas sea excesivamente alto, pues ello requeriría una válvula muy cerrada o una placa con orificio relativamente estrecho, el valor de $250 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2$ se ha considerado suficiente ya que la presión máxima que produce está dentro de los límites admisibles.

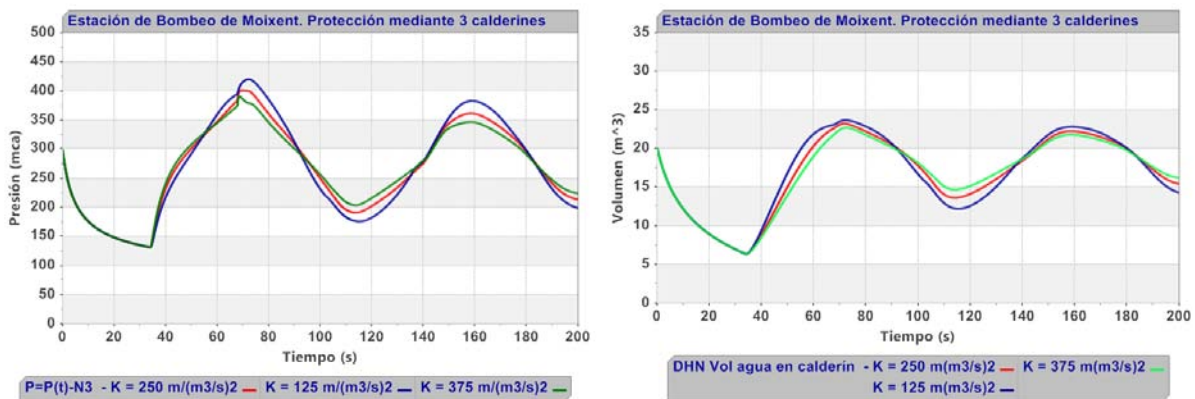


Figura 5. Evolución de presiones a la salida de la estación de bombeo, y evolución del volumen de agua en cada calderín. Parada de bombas con diferentes valores del coeficiente de pérdidas para flujo de entrada al calderín

5. Presión de hinchado de calderines

Los calderines de vejiga, antes de la puesta en marcha de la instalación, con las tuberías vacías y a presión atmosférica, se deberán hinchar con nitrógeno para disponer de una masa de gas que consiga el efecto de protección deseado. En el proceso de hinchado la vejiga llenará totalmente el volumen del calderín, alcanzándose la presión necesaria para que, tras el llenado y puesta en marcha de la instalación, el agua penetre al interior del calderín comprimiendo el gas de la vejiga hasta la presión de régimen. En estas condiciones iniciales el gas tendrá el volumen suficiente para amortiguar las oscilaciones de presión producidas durante el transitorio, a la vez que en el interior del calderín habrá reserva de agua suficiente para alimentar la tubería tras la parada de las bombas hasta el instante en que finalice la fase depresiva.

En caso de calderín sin vejiga el hinchado equivale a inyectarle aire comprimido manteniendo cerrada la válvula de entrada al calderín. Esta válvula se abrirá lentamente cuando la instalación se encuentre llena y en condiciones de régimen.

La presión de hinchado se calcula a partir de la evolución del gas, supuesta isoterma, entre las condiciones de hinchado y las condiciones de funcionamiento en régimen permanente, según la expresión:

$$P_h^* \cdot \nabla_{cald} = P_0^* \cdot \nabla_0$$

En esta expresión las presiones vienen indicadas en valor absoluto, siendo V_0 el volumen de aire en el interior del calderín en condiciones de régimen. En general la presión de hinchado es un invariante de la instalación, mientras que el volumen inicial de aire dentro del calderín depende del punto de funcionamiento a través de la presión en condiciones de régimen.

Una presión de hinchado excesivamente baja significa poca masa de gas en el calderín, y un volumen pequeño de gas en condiciones de régimen. Con ello se reduce la capacidad de protección del calderín, aumentando la amplitud de las oscilaciones de presión durante el transitorio. Sin embargo, una presión de hinchado excesivamente alta hará que en condiciones de régimen la reserva de agua dentro del calderín sea baja, con peligro de vaciado del calderín en las fases depresivas del transitorio. Y si la presión de hinchado es mayor que la presión de régimen, el agua no podrá entrar al calderín, por lo que su capacidad de protección será nula.

En caso de calderín sin vejiga, el vaciado del mismo supone el paso de parte del aire a la tubería de entronque y posiblemente a la tubería principal, con pérdida de masa de aire y reducción de la capacidad de protección. Si el calderín es con vejiga el vaciado hace que en ese momento dicha vejiga obture la conexión con la tubería de entronque, originando la interrupción súbita del caudal de alimentación de la tubería de impulsión y provocando un pulso depresivo que hace bajar la envolvente de presiones mínimas del transitorio.

Se ha simulado el transitorio hidráulico por parada de bomba en los casos de presión de hinchado 50 mca y 200 mca, siendo la presión de hinchado en las condiciones de diseño de 120 mca como hemos indicado anteriormente. En la figura 6 se presenta la evolución de presiones a la salida de la estación de bombeo, así como la evolución del volumen de agua en el interior de cada calderín, para los tres casos de presión de hinchado.

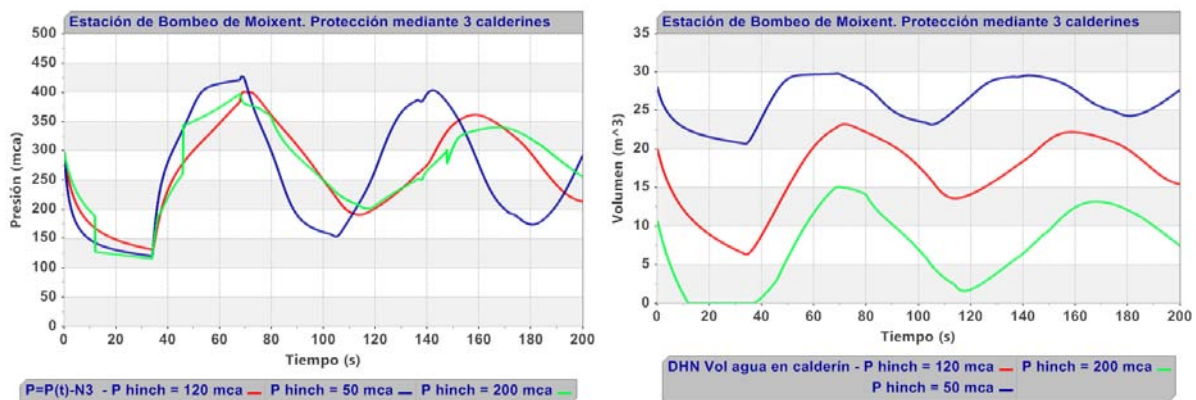


Figura 6. Evolución de presiones a la salida de la estación de bombeo, y evolución del volumen de agua en el interior de cada calderín, en caso de parada de bombas con diferentes valores de la presión de hinchado de los calderines

Vemos en la figura 6 que al disminuir la presión de hinchado (50 mca), la capacidad de protección de los calderines disminuye al haber menor volumen inicial de gas (7 m^3), obteniéndose una presión máxima del orden de 430 mca. En caso de aumentar la presión de hinchado (200 mca) el volumen inicial de gas aumenta (24 m^3), vaciándose el calderín a los 12 s de producirse la parada de las bombas y permaneciendo vacío hasta los 36 s.

En la misma figura observamos también que, para el caso de presión de hinchado 200 mca, en el instante de vaciado de los calderines (12 s) se produce una caída instantánea de presión de 60 mca a la salida de la estación de bombeo, originada por la interrupción súbita del caudal de alimentación de la tubería de impulsión. En la figura 7 se presenta la envolvente de alturas piezométricas máxima y mínima para las simulaciones del transitorio con presión de hinchado de 120 y 200 mca. Se observa que los valores más bajos de altura piezométrica se obtienen en el caso de presión de hinchado más alta, efecto de la caída instantánea de presión al vaciarse los calderines. Y se observa también que en este caso aparecen presiones negativas, incluso por debajo de la tensión de vapor del agua, en la parte final de la tubería de impulsión. Con un perfil de tubería que tuviese una pendiente más uniforme o puntos altos relativos, podríán aparecer presiones negativas en muchos más tramos de su trazado.

6. Instalación de válvula de retención intermedia para reducir el volumen total de calderines

Debido a la forma que tiene el perfil de la impulsión que nos ocupa, la parada de bombas sin protección produce una envolvente de alturas piezométricas mínimas que llega a cortar al perfil de la tubería al inicio del tramo con mayor pendiente, figura 3. Ello sugiere que, si se reduce el volumen de calderines respecto del valor de diseño, las presiones mínimas seguirán siendo positivas al menos en todo el tramo con menor pendiente. Y si se instala una válvula de retención con by-pass al final de este tramo, dicha válvula reducirá las sobrepresiones en el mismo, de manera que combinando ambos sistemas de protección se podría conseguir una protección similar al caso de diseño y casi con toda seguridad con un menor coste económico.

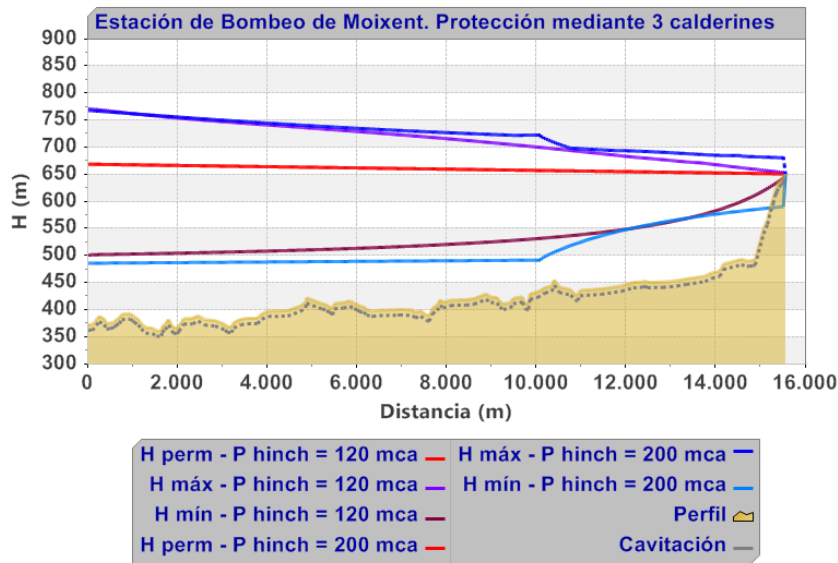


Figura 7. Envolventes de altura piezométrica máxima y mínima en caso de parada de bombas con presión de hinchado de calderines de 120 y 200 mca

En el sentido que estamos comentando, la simulación del transitorio por parada de bombas con solamente dos calderines proporciona unas envolventes de altura piezométrica máxima y mínima con mayor amplitud que el caso de tres calderines, como se puede observar en la figura 8. Vemos también que con dos calderines la presión máxima a la salida de la estación de bombeo es de 416 mca.

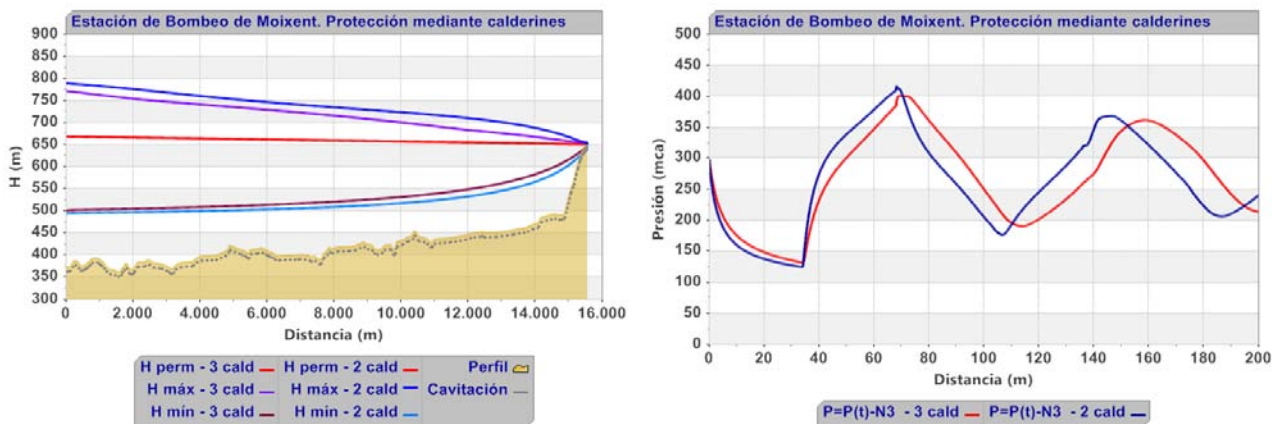


Figura 8. Envolventes de altura piezométrica máxima y mínima en caso de parada de bombas con 3 y 2 calderines. Evolución de presión a la salida de la estación de bombeo en ambos casos

Con objeto de reducir la presión máxima obtenida en caso de protección mediante dos calderines se ha simulado el caso de instalar dos válvulas de retención en paralelo, de DN 1000 mm, en el punto de la tubería donde se inicia la pendiente mayor (distancia de 14.827'94 m respecto del origen de la tubería). El hecho de disponer de dos válvulas de retención es porque una sola requeriría un DN de 1800 mm, el mismo que la tubería de impulsión. El esquema de esta nueva disposición se indica en la figura 9. En lo que sigue nos referiremos a estas dos válvulas de retención como si se tratase de una sola.

En la figura 10 se indican los resultados obtenidos en la simulación del transitorio por parada de bombas con dos calderines, sin o con válvula de retención en la tubería de impulsión. Se observa el efecto de la válvula de retención intermedia la cual, al final del transitorio mantendrá, en la parte de aguas abajo, la altura piezométrica estática debida al nivel del agua en el depósito de impulsión, y en la parte de aguas arriba una altura piezométrica residual entre válvulas de retención cerradas, unas a la salida de los grupos de bombeo y la otra en la tubería de impulsión. Esta altura piezométrica residual producirá una presión a la salida de la estación de bombeo de unos 150 mca (figura 10).

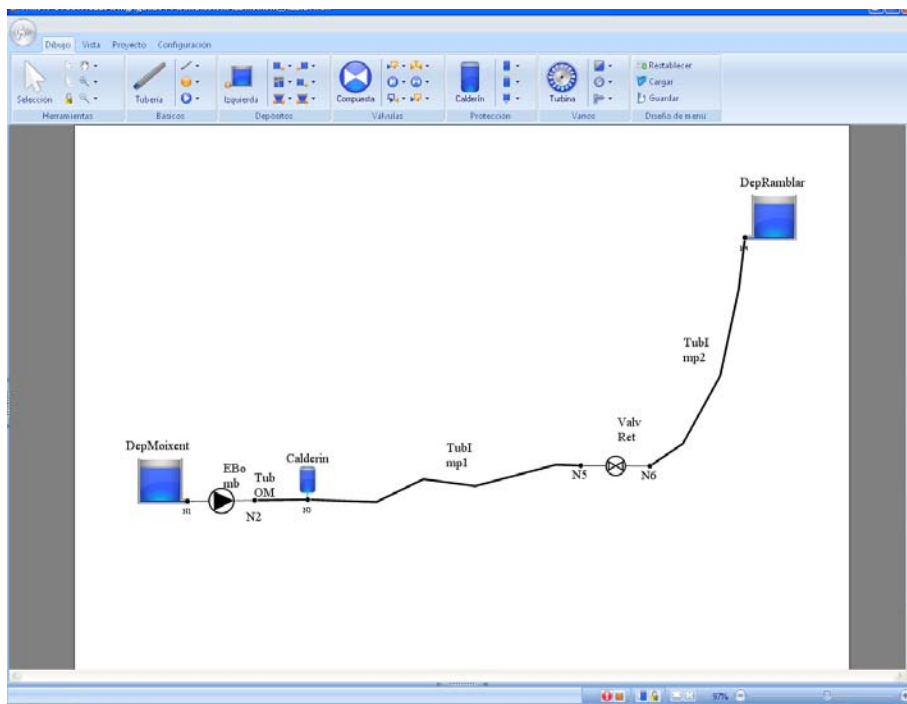


Figura 9. Esquema de la impulsión con válvula de retención intermedia

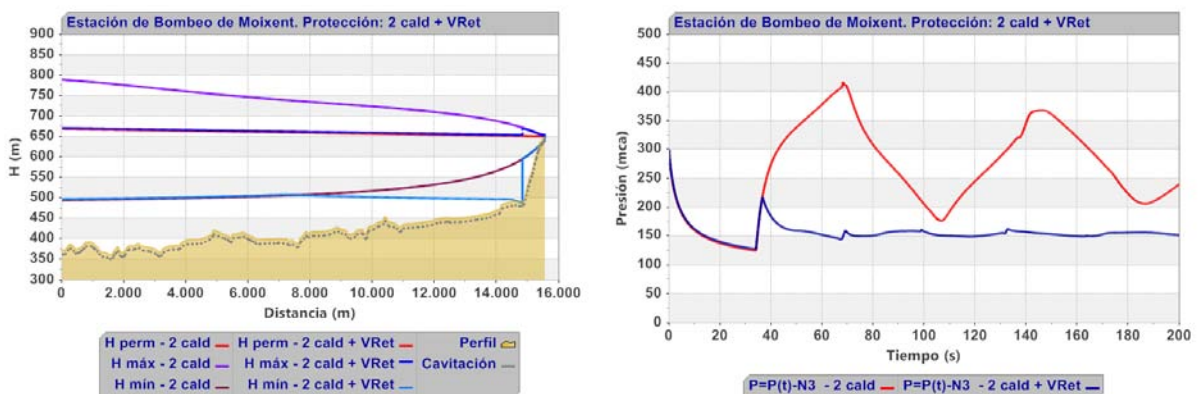


Figura 10. Envoltentes de altura piezométrica máxima y mínima en caso de parada de bombas con 2 calderines, sin y con válvula de retención intermedia. Evolución de la presión a la salida de la estación de bombeo en ambos casos

No obstante, es necesario tener en cuenta que esta simulación se ha realizado suponiendo un comportamiento ideal de la válvula de retención. En el caso real, el cierre de la misma se retrasa unos instantes tras la detención del flujo, de manera que se puede producir un flujo de retorno a través de la misma hasta el momento de su cierre definitivo. En ese instante, si el flujo de retorno es importante, puede generarse un pulso de presión positiva que viajará hacia el depósito aguas abajo y un pulso negativo que viajará hacia la estación de bombeo. Estos pulsos pueden provocar en ocasiones daños en las conducciones. A este fenómeno se le conoce en la literatura inglesa como check valve slam.

7. Instalación de válvula de retención intermedia con by-pass en paralelo

El efecto comentado en el párrafo anterior puede evitarse colocando un by-pass en la válvula de retención, de manera que el flujo de retorno no se anule de manera brusca (podrá pasar a través del by-pass). Éste actuará a modo de válvula de alivio permitiendo que el flujo de retorno continúe hacia la parte de aguas arriba de la instalación.

Asimismo, cabe reseñar el hecho de que no es conveniente que el agua de la mayor parte de la tubería de impulsión se quede encerrada entre las válvulas de retención cerradas, pues cualquier fuga en un punto bajo haría entrar en depresión dicha tubería, al menos en sus puntos altos; o bien haría entrar aire por dichos puntos. La existencia del by-pass en la válvula de retención intermedia permite la transmisión de la presión estática a toda la tubería de impulsión cuando la instalación se encuentre parada.

Se simula, pues, el transitorio por parada de bombas con los datos del caso anterior (dos calderines), pero disponiendo un by-pass en paralelo con la válvula de retención intermedia. Se admite para el by-pass un DN de 700 mm y un coeficiente de pérdidas, adimensional, de 30. Este coeficiente de pérdidas se podría obtener mediante una válvula parcialmente cerrada o mediante un elemento disipador de energía como puede ser una placa orificio.

En la figura 11 se indican los resultados obtenidos al simular el transitorio con protección mediante dos calderines, válvula de retención intermedia, y sin o con by-pass en la válvula de retención. Se observa la mejora de resultados al disponer el by-pass, con presiones máximas a la salida de la estación de bombeo del orden de la presión de régimen, en concreto unos 310 mca. Además, se eliminará el posible efecto del check valve slam producido por el cierre de la válvula con flujo de retorno.

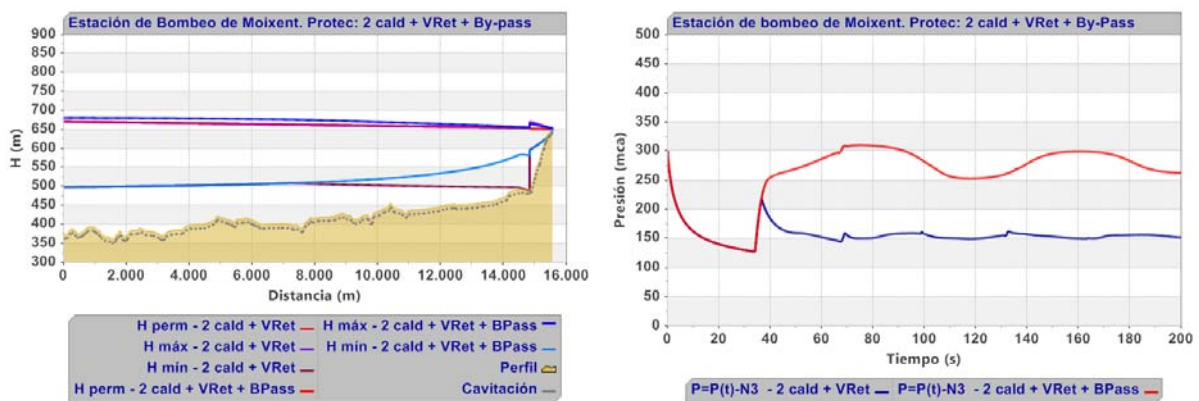


Figura 11. Envolventes de altura piezométrica máxima y mínima en caso de parada de bombas con 2 calderines, válvula de retención intermedia, y sin o con by-pass en esta válvula. Evolución de presión a la salida de la estación de bombeo en ambos casos

8. Conclusiones

Se han simulado diferentes soluciones de protección contra los efectos transitorios en una impulsión por parada simultánea de todas las bombas en marcha. En concreto se ha estudiado la utilización de calderines a la salida de la estación de bombeo de Moixent (trasvase Júcar-Vinalopó), modificando diferentes parámetros de diseño de los mismos, así como la instalando una válvula de retención intermedia con objeto de reducir el volumen necesario de calderines.

En caso de utilizar calderines es importante prestar atención al efecto que sobre las presiones máximas y mínimas produce la modificación de parámetros tales como los coeficientes de pérdidas en el entronque, así como la presión de hinchado de los calderines. En caso de instalar válvula de retención intermedia, con by-pass, ello permite en ocasiones reducir el volumen total de calderines, aunque para conseguir un diseño acertado del sistema de protección su efecto se deberá simular adecuadamente.

Un inconveniente que tiene la instalación de válvulas de retención intermedias es la necesidad de un adecuado mantenimiento, pues el punto de la tubería de impulsión donde se dispone puede ser de difícil acceso. Por el contrario, el mantenimiento de los calderines es mucho más fácil, pues se disponen en la estación de bombeo o en sus inmediaciones.

Por otra parte, las válvulas de retención intermedias no limitan las primeras ondas de depresión sino solamente las de sobrepresión. Por ello, y al reducir el volumen total de calderines, la envolvente de alturas piezométricas mínimas desciende, pudiendo intersectar con la el trazado de la tubería de impulsión y provocar presiones negativas. Esto llega a ocurrir en el caso que nos ocupa, pues se provocan presiones negativas en los últimos 200 m de la tubería si se observan con detalle las figuras 8, 10 y 11.

Si bien la combinación de dos calderines más válvula de retención intermedia resulta más económica consiguiendo una protección razonable del sistema, por las razones que hemos apuntado en la impulsión que nos ha servido de ejemplo se instalaron finalmente tres calderines.

9. Bibliografía

Abreu, J.M.; Guarga, R.; Izquierdo, J. (Edit.) (1995). *Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión*. U.D. Mecánica de Fluidos. U.P.V.

Betamio de Almeida A.; Koelle, E. (1992). *Fluid Transients in Pipe Networks*. Ed. Computational Mechanics Publications and Elsevier Applied Science. Southampton (UK)

Chaudhry, M.H. (1987). *Applied Hydraulic Transients*. Ed. Van Nostrand Reinhold Company. New York.

Koelle, E. (2004). *An Overview of the Methods for Transient Control and of the Effectiveness of the Protection Equipment and Device Specifications: Cases and Accidents*. Published in *The Practical Application of Surge Analysis for Design and Operation. 9th International Conference on Pressure Surges. Volume. 1* (Murray, S.J., Ed.), BHR Group Limited, Bedfordshire (UK). pp. 13-31.

Thorley, A.R.D. (2004). *Fluid Transients in Pipeline Systems*. Ed. Professional Engineering Publishing. London (UK)

Wylie, E.B.; Steeter, V.L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Ed. Prentice Hall. Englewood New Jersey. USA