

Análisis matemático del Golpe de Ariete en la conducción de la Presa de La Loteta

Mathematical analysis of the Water Hammer in the pipelines to the Loteta Dam

Jesús Granell Vicent. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
JESÚS GRANELL, Ingenieros Consultores, S.L. direccion@jgicsa.com

Raimundo Lafuente Dios. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Confederación Hidrográfica del Ebro. rlafuente@chebro.es

Carmen María Baena Berrendero. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
JESÚS GRANELL, Ingenieros Consultores, S.L. cmb@jgicsa.com

René Gómez López de Munain. Ingeniero Técnico de Obras Públicas y Geólogo
Confederación Hidrográfica del Ebro. rgomez@chebro.es

Resumen: Con motivo de la puesta en marcha de la central de bombeo de la presa de La Loteta en 2009, se realizó un protocolo para la primera fase de puesta en marcha, que comprendía la situación de bombeo con el embalse de la Loteta vacío. La casa de bombas dispone de 6 bombas centrífugas de eje vertical, que suministran un caudal de 2.167 l/s cada una. En el Proyecto de construcción, el dimensionamiento de todos los elementos de la conducción reversible desde el Canal Imperial de Aragón hasta la presa de La Loteta, se realizó mediante un modelo matemático basado en el programa ARIETE (desarrollado por Jesús Granell Vicent). En el protocolo, se fijaron los escenarios a reproducir y las variables a medir; para comparar su evolución en el tiempo con los valores obtenidos mediante el cálculo. En este artículo se detalla el modelo realizado y los resultados obtenidos por él, para cada escenario de cálculo; y se comparan con los resultados suministrados por el sistema de control. Como conclusión se puede afirmar que los resultados obtenidos en los escenarios de esta primera fase se ajustaron a lo calculado.

Palabras Clave: Central de bombeo; Conducción; Transitorio; Golpe de ariete

Abstract: Prior to the starting up of the pump plant to the Loteta dam in 2009, a protocol was established for the first phase of the start-up operation, concerning the pumping to the empty La Loteta reservoir. The pump station is fitted with six vertical axis centrifugal pumps, each providing 2,167 l/s. In the construction design, all the components of the reversible pipeline from the Canal Imperial de Aragon to the Loteta dam were defined by mathematical modelling based on the ARIETE program (developed by Jesús Granell Vicent). The protocol established the situations to be reproduced and the variables to be measured for ensuing comparison over time with the pre-calculated values. This article describes the model employed and the results obtained from the same for each design situation and their ensuing comparison with the results supplied by the control system. By way of conclusion, the results obtained for the different situations over this first stage were seen to coincide with the calculated values.

Keywords: Pump plant; Pipeline; Transient; Water hammer

1. Descripción de la conducción

La construcción de la Presa de la Loteta y la Conducción hasta el Canal Imperial de Aragón fue realizada por la UTE FFC Construcción S.A. y ALDESA Construcciones S.A. bajo la dirección de La Confederación Hidrográfica del Ebro, siendo el autor del proyecto JESÚS GRANELL, Ingenieros Consultores S.L.

La conducción de la Presa de la Loteta tiene uso reversible, pues se utilizará para llenar este embalse bombeando desde el Canal Imperial de Aragón y para en-

1. Description of the pipeline

The Loteta Dam and the Pipeline from the Canal Imperial de Aragon were built by a consortium formed by FFC Construcción S.A and ALDESA Construcciones S.A., under the auspices of the Ebro Water Board and following the project design of JESÚS GRANELL, Ingenieros Consultores S.L.

The pipeline of the Loteta Dam is reversible, as it will be used to both fill the reservoir when pumping from the Canal Imperial and to return stored water to

Jesús Granell Vicent, Raimundo Lafuente Dios, Carmen María Baena Berrendero, René Gómez López de Munain

Fig.1. Esquema hidromecánico de la conducción/ Hydro mechanical schema.

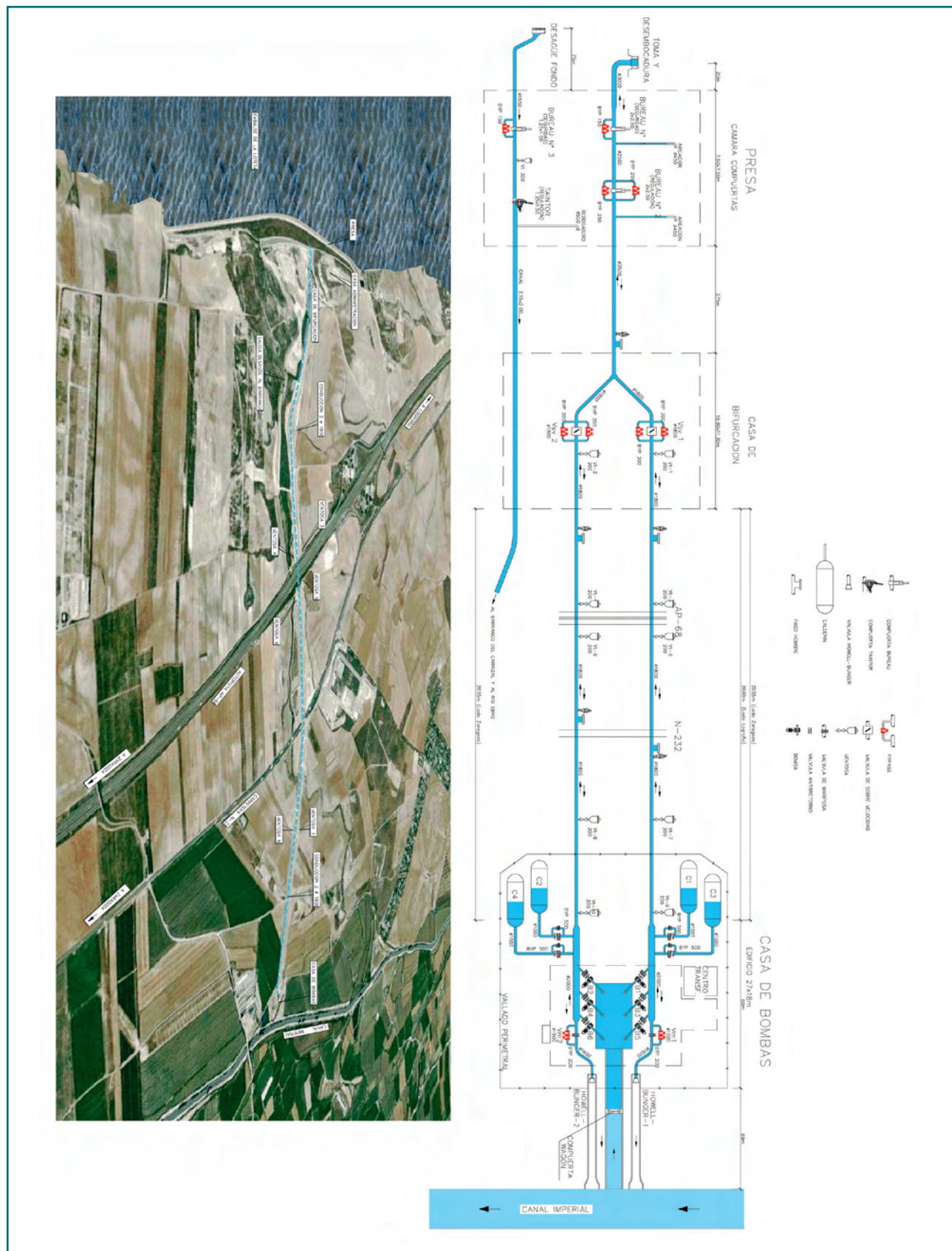




Fig. 2. Toma-desembocadura/intake-outlet.

tregar al canal, en época de riegos, el agua almacenada. Se muestra el esquema de la fig. 1.

La conducción se inicia en el embalse, en una estructura de toma-desembocadura. Consta de tres tramos diferenciados: El primero comprende desde la toma-desembocadura hasta la cámara de compuertas de la presa, donde se controla mediante dos compuertas BUREAU en serie y está constituido por una tubería ($\varnothing = 3.000$ mm). El segundo está formado por una tubería de palastro ($\varnothing = 2.500$ mm) que atraviesa el cuerpo de la presa de materiales sueltos alojada en una galería que se prolonga hasta unos 160 m del pie de presa y llega hasta la casa de bifurcación donde se divide en dos tuberías de hormigón con camisa de chapa ($\varnothing = 1.800$ mm), alojadas en zanja. Este tercer tramo, de 2.650 m de longitud, se prolonga hasta la Casa de Bombas, situada en la margen derecha del Canal Imperial. A través de un cuenco de impacto, se produce la toma o restitución de caudales al canal.

Se muestra la estructura de toma-desembocadura (fig. 2).

Los elementos principales de la conducción son:

• Válvulas HOWELL-BUNGER

Dos válvulas de 1.600 mm de diámetro, una por línea. Desaguan a un cuenco de impacto, en el funcionamiento por gravedad.

• Bombas de la central de bombeo

Tres bombas centrífugas de eje vertical por línea, de 2.167 l/s de caudal y 46 m de altura geométrica nominal.



Fig. 3. Válvula Howell-Bunger/Howell-Bunger valve.

the canal to suit seasonal irrigation demands. The layout of the pipeline is shown in schematic form fig. 1.

The pipeline starts off at an inlet/outlet structure at the reservoir and is made up of three different sections: the first section, formed by a 3000 mm \varnothing pipe, runs from the inlet/outlet to the gate chamber of the dam, where two BUREAU type gates are controlled in series. The second section is formed by a 2500 mm \varnothing sheet iron pipe that passes through a tunnel set within the body of the earth and rock fill dam and extends a further 160 m from the foot of the dam before reaching the pipeline branch where it



Fig. 4. Bomba TR800/9/815/
Pump TR800 / 9 / 815.

Jesús Granell Vicent, Raimundo Lafuente Dios, Carmen María Baena Berrendero, René Gómez López de Munain

Fig. 5.
Calderines de la
central/ Surge
tanks at the
pumping station.



• Calderines de la central de bombeo

Dos por línea, para intercambiar agua con la conducción en los fenómenos de golpe de ariete, de volumen 160 m³ cada uno y 11 m de altura.

El diámetro del conducto de entrada es de 500 mm y el del de salida de 1000 mm.

• Ventosas y pasos de hombre

2. Modelo de cálculo

El esquema topológico que representa el conjunto de la conducción y que se ha utilizado para el cálculo, tanto en régimen permanente como transitorio, se muestra en la fig. 8.

En régimen permanente, para el funcionamiento en impulsión, el máximo caudal circulante es de 16,2 m³/s (con embalse vacío) y para el funcionamiento por gravedad, el máximo es de 26,2 m³/s (con embalse lleno).



Fig. 6. Tuberías de entrada y salida/Inlet and outlet pipes to the surge tanks.

then divides into two 1800 mm diameter steel sheathed concrete pipes, set in trenches. This 2,650 m long section extends to the Pump Station set on the right bank of the Canal Imperial. Water is then taken or returned from the canal via a stilling basin (fig. 2).

The main components of the pipeline are:

• HOWELL-BUNGER valves

Two 1600 mm diameter valves, one on each line, which discharge into a stilling basin when operating under gravity.

• Pumping Station pumps

Three vertical axis centrifugal pumps per line, with flow of 2,167 l/s and 46 m nominal geometric height.

• Surge tanks at pumping station

Two per line, to transfer water and offset potential pressure surge or water hammer, each 11 m high and with a volume of 160 cubic metres.

The diameter of the inlet pipe is 500 mm and that of the outlet 1000 mm.

• Vents and manholes

2. Calculation Model

The topological arrangement of the pipeline, used in the calculation for both the permanent and transient regime, is shown fig. 8.



Fig. 7. Ventosa de la línea derecha junto al calderín/Vent on the right-hand line next to the surge tank

Análisis matemático del Golpe de Ariete en la conducción de la Presa de La Loteta
Mathematical analysis of the Water Hammer in the pipelines to the Loteta Dam

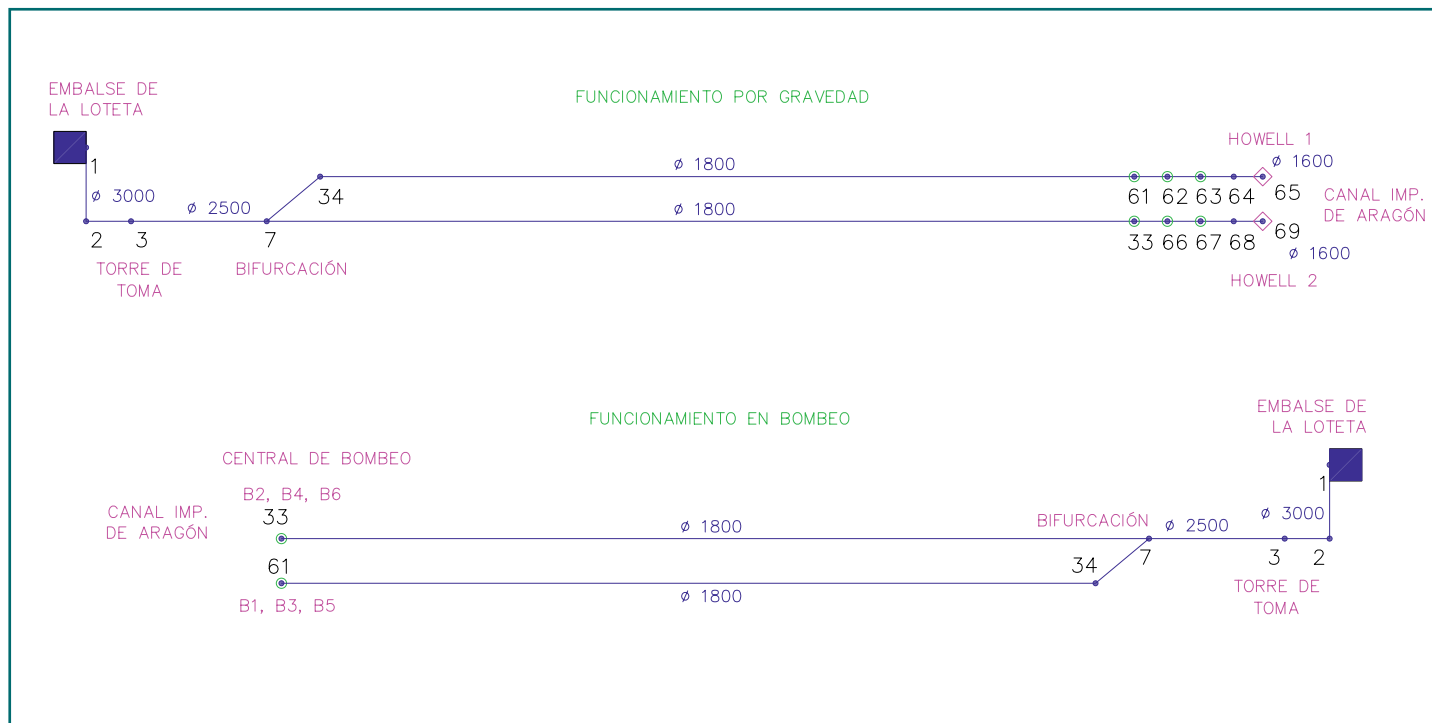


Fig. 8. Esquema de cálculo/
Calculation layout.

En régimen transitorio, en conducciones de gran longitud como la proyectada, el fenómeno del golpe de ariete tiene una importancia capital en el dimensionamiento de la misma desde el punto de vista resistente, es decir en la determinación de las máximas presiones internas de trabajo a que va a estar sometida dicha conducción.

Para el cálculo de las presiones desarrolladas durante la parada de las bombas (en el caso de funcionamiento por bombeo) o durante el cierre las válvulas Howell de la conducción (en el caso de funcionamiento por gravedad), se ha utilizado el programa ARIETE que simula el régimen transitorio de un fluido en el interior de redes de tuberías abiertas o malladas, producido por una alteración en el régimen permanente provocada, a su vez, por diversas causas tales como el cierre o apertura de válvulas, o la parada o arranque de bombas.

El programa resuelve, utilizando el método de las líneas características, las ecuaciones que rigen el flujo en régimen transitorio en tuberías ligeramente deformables, y que se expresan así:

Ec del movimiento:

$$gH_x + V_t + \frac{FV}{2D} |V| = 0$$

Under the permanent or steady regime, during pumping operation, the maximum circulating flow is 16.2 m³/s (with empty reservoir) and when operating by gravity, this is then 26.2 m³/s (with full reservoir).

Under the transient regime and in very long pipelines such as that designed here, the effect of pressure surge or water hammer takes on particular importance in the design of the pipeline with regards to resistance and determines the maximum internal operating pressures that the pipeline will be subject to.

In order to calculate the pressures built up during the stopping of pumps (in the case of pump operation) or while closing the Howell valves on the pipeline (in the case of gravity operation), the ARIETE programme has been employed which simulates the transient regime of a fluid within the system of open or grated piping, produced by a change in the steady regime which is, in turn, provoked by various causes such as the closing or opening of valves or the stopping or starting of pumps.

By employing the method of characteristic lines, the programme solves the equations governing the flow in transient regime in slightly deformable pipes, which are given as follows:

Ec. de la continuidad:

$$\frac{\alpha^2}{g} V_x + V H_x + H_t V \operatorname{sen} \alpha = 0$$

El programa necesita como datos la geometría de la tubería, las características del material, la topología de tubos y nudos y la línea piezométrica de la situación de partida a lo largo de ella.

Como condiciones de contorno se fijan las características geométricas de los depósitos que existan, las de las bombas si las hay, y las de los elementos antiarriete que se dispongan, tales como chimeneas de equilibrio, calderines de aire, válvulas de descarga o clapetas.

Como resultados, el programa lista a lo largo del tiempo que dura el proceso, la altura piezométrica y velocidad del agua en todos y cada uno de los nudos de la conducción, dando finalmente un resumen de los valores máximos y mínimos alcanzados. Posee además una salida gráfica de los resultados en tiempo real de cálculo.

3. Escenarios de la Fase 1

Se decidieron realizar para la Primera Fase (con embalse de la Loteta vacío y bombeando el agua desde el Canal) cuatro escenarios:

- A.1) Arranque sucesivo de las tres bombas del colector izquierdo y parada sucesiva de las tres bombas del colector izquierdo.
- A.2) Arranque sucesivo de las tres bombas del colector derecho y parada sucesiva de las tres bombas del colector derecho.
- A.3) Arranque sucesivo de las seis bombas de la central hasta dar el caudal máximo nominal de la central y parada sucesiva de las seis bombas de la central.
- A.4) Arranque sucesivo de las seis bombas de la central hasta dar el caudal máximo nominal de la central y parada brusca de las seis bombas de la central, simulando un corte general de energía.

En una segunda fase (con el embalse de la Loteta lleno) se prevén 4 escenarios similares para el bombeo y 5 escenarios para el caso de funcionamiento por gravedad.

Ec of movement:

$$g H_x + V_t + \frac{FV}{2D} |V| = 0$$

Ec of continuity:

$$\frac{\alpha^2}{g} V_x + V H_x + H_t V \operatorname{sen} \alpha = 0$$

The data fields required by the programme include the geometry of the pipe, the characteristics of the material, the topology of the pipes and nodes and the piezometric line at start-up throughout the length of the same.

The boundary conditions concern the geometric characteristics of existing deposits, those of the pumps and those of any surge mitigating elements that be installed, such as surge tanks, surge drums, discharge valves or swing check valves.

Throughout the time of the process, the programme records the piezometric height and water velocity in each and every one of the nodes in the pipeline, and finally provides a summary of maximum and minimum values. The programme also provides a print-out of the results as these are calculated.

3. Phase 1 scenarios

Four different scenarios were considered for the First Phase (with the Loteta reservoir empty and pumping water from the Canal):

- A.1) Successive start up of the three pumps to the left collector and the successive stopping of the three pumps of the left collector.*
- A.2) Successive start up of the three pumps to the right collector and the successive stopping of the three pumps of the right collector.*
- A.3) Successive start up of the six pumps of the station until providing the maximum nominal flow of the same and the successive stoppage of the six pumps.*
- A.4) Successive start up of the six pumps of the station until providing the maximum nominal flow of the same and the sudden stoppage of the six pumps, simulating a general power cut.*

Tabla 1. Lista de Transductores/ Table 1. List of Transducers

T1	Conducción Izquierda (en Ventosa nº 9) <i>Left pipeline (on Vent no. 9)</i>
T2	Calderín nº 1 <i>Surge tank No. 1</i>
T3	Calderín nº 3 <i>Surge tank No. 3</i>
(T1, T2 y T3 → generan gráficas conjuntas, Gráficas lado Impar o Izquierdo) <i>(T1, T2 and T3 → generate joint charts, Odd or Left side Charts)</i>	
T4	Conducción derecha (en Ventosa nº 10) <i>Right pipeline (at Vent No. 10)</i>
T5	Calderín nº 2 <i>Surge tank No. 2</i>
T6	Calderín nº 4 <i>Surge tank No. 4</i>
(T4, T5 y T6 → generan gráficas conjuntas, Gráficas lado Par o Derechos) <i>(T4, T5 and T6 → generate joint charts, Even or Right side Charts)</i>	

4. Parámetros a establecer y variables a medir

El dato clave para la puesta en marcha de la central es el volumen inicial de aire en los calderines. Este dato se ha fijado una vez que se han analizado todos los cálculos de bombeo y debe comprobarse antes de arrancar las bombas, en cualquier situación de funcionamiento.

El volumen de aire en cada calderín antes de arrancar las bombas, debe ser $62,5 \text{ m}^3$ y la altura de agua correspondiente es de 5,4 m (medida desde la base de la superficie cilíndrica) (Fig. 9).

Se han colocado 3 sensores de nivel de agua por calderín (marcados con un círculo rojo):

- A +5,4 m de la base inferior de la superficie cilíndrica: correspondiente al volumen inicial de aire necesario para empezar a bombear en cualquier escenario. Autoriza o inhibe el arranque de la instalación.
- A +7,4 m de la base inferior: corresponde al volumen máximo de agua (mínimo de aire) en el calderín, más un resguardo de 0,8 m. Emite señal de alarma si el nivel rebasa el establecido.
- A -0,6 m de la base inferior: corresponde al volumen mínimo de agua (máximo de aire) en el calderín, más un resguardo de 0,8 m. Emite señal de alarma si el nivel baja respecto del establecido.

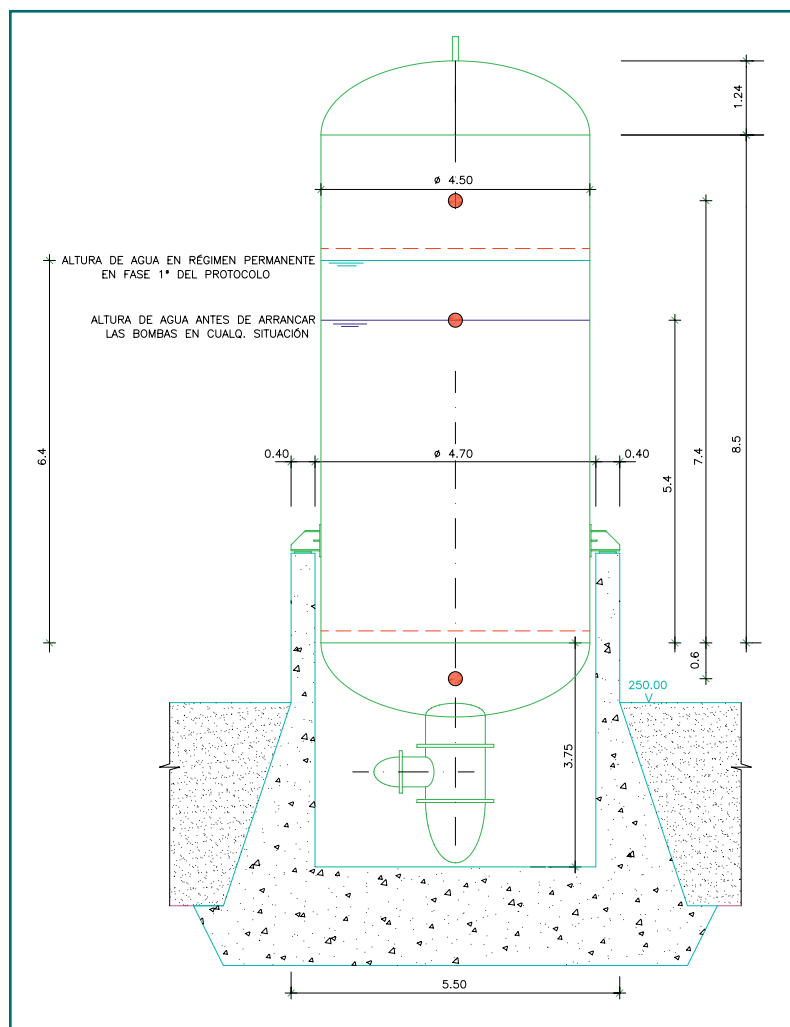


Fig. 9. Esquema de niveles en el calderín/Diagram of levels in the surge tank

Four similar pumping scenarios were considered for the second stage (once the Loteta reservoir was fill) together with five scenarios for the case of gravity operation.

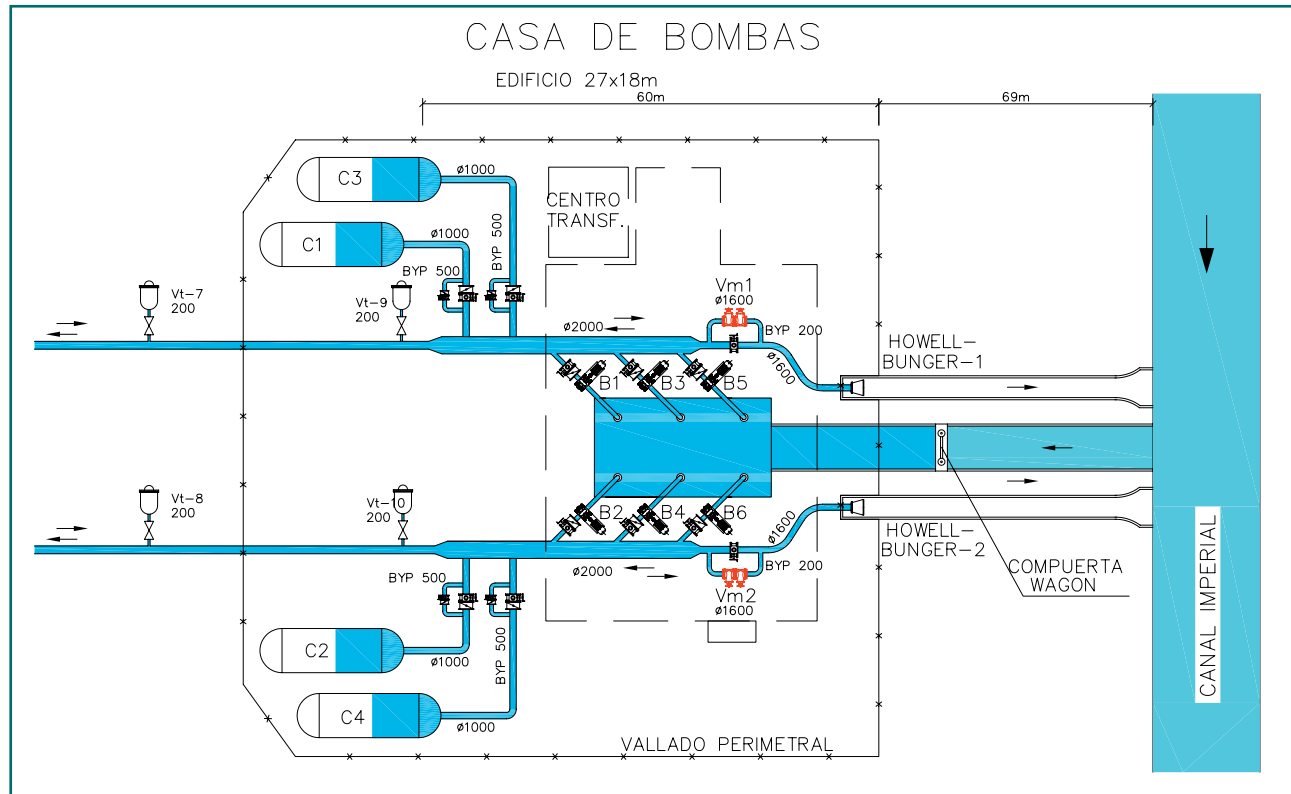
4. Parameters and variables to be established and recorded

The key information for the starting up of the station is the initial volume of air in the surge tanks. This information is established after analysing all the pumping calculations and should be verified prior to starting the pumps, under any operating situation.

The volume of air in each surge tank prior to starting the pumps should be $62,5 \text{ m}^3$ with a corresponding water height of 5,4 m (measured from the base of the cylindrical surface) (fig. 9).

Jesús Granell Vicent, Raimundo Lafuente Dios, Carmen María Baena Berrendero, René Gómez López de Munain

Fig. 10. Casa de Bombas/Pump Station.



Para realizar las comprobaciones de cada escenario se ha dotado a cada línea con un transductor que suministre la curva tiempo-presión en todo el proceso de cada escenario; está próximo a los calderines (en concreto en la ventosa de cada línea ubicada junto a ellos). También se dispuso un transductor por calderín (Ver tabla 1).

Los valores suministrados por los transductores T1 y T4 son los que se han comparado con los obtenidos con los de cálculo mediante el programa ARIETE.

En cuanto a los sensores de nivel máximo y mínimo, nunca deberían emitir señal de alarma en las condiciones previstas de funcionamiento de la central.

El esquema detallado de la casa de bombas, con la denominación de cada elemento, se muestra en la figura 10.

5. Resultados obtenidos. Comparativa

En este apartado se muestran los gráficos de las variables medidas en los 4 escenarios. Para cada escenario se han realizado cuatro gráficos, con este orden:

Three water level sensors have been placed in the tank (marked by a red circle):

At +5.4 m from the lower base of the cylinder: corresponding to the initial volume of air necessary for the starting of pumping under any scenario. Permitting or preventing the start-up of the installation.

At +7.4 m from the base: corresponding to the maximum volume of water (minimum air) in the surge tank, together with a clearance of 0.8 m. An alarm is sounded if the level exceeds the established limit.

At -0.6 m from the base: corresponding to the minimum volume of water (maximum air) in the surge tank, together with a clearance of 0.8 m. An alarm is sounded if the level exceeds the established limit.

In order to verify each scenario, transducers were fitted on both lines to establish the time-pressure curve throughout the entire process. These transducers were fitted close to the surge tanks (on the vents of each line next to the same). Additional transducers were also placed at each surge tank (Table 1).

Análisis matemático del Golpe de Ariete en la conducción de la Presa de La Loteta
Mathematical analysis of the Water Hammer in the pipelines to the Loteta Dam

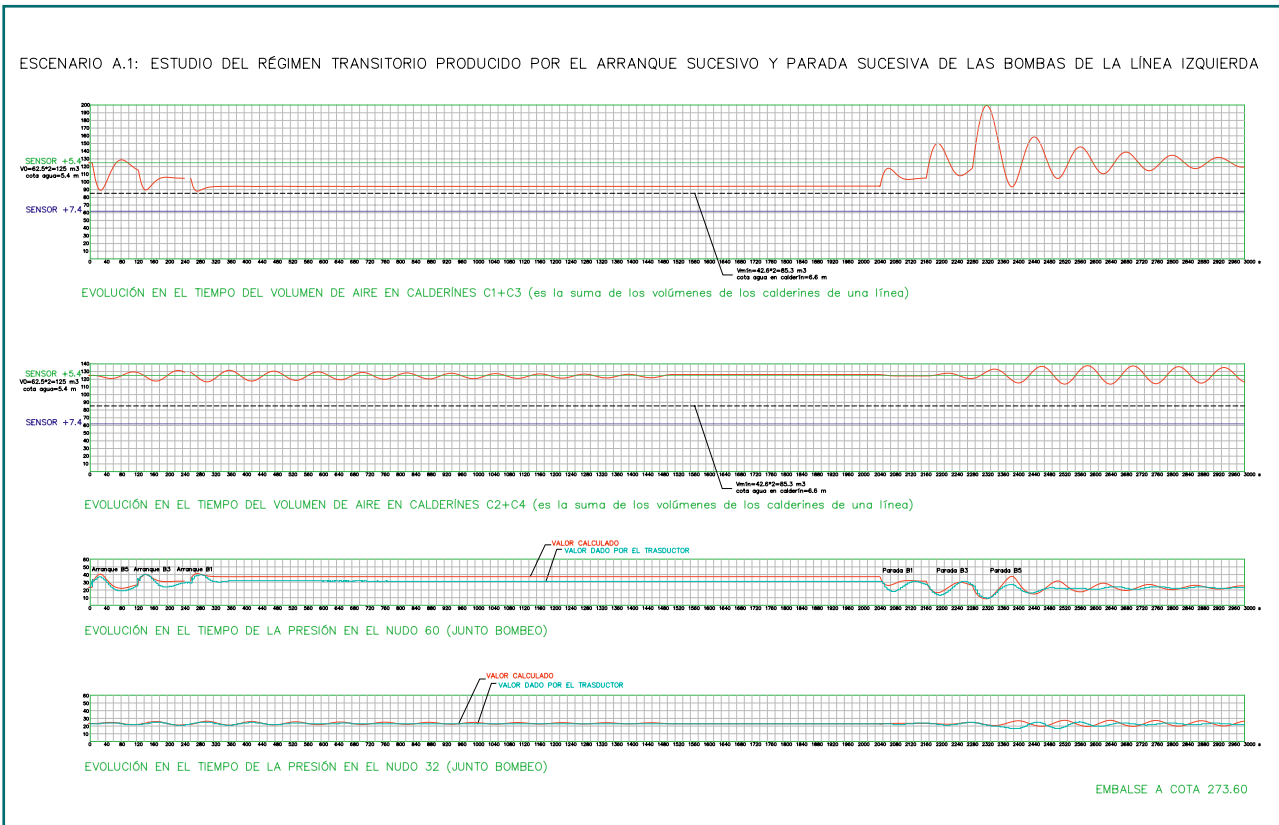


Fig. 11.
Escenario A1
/Scenario A1.

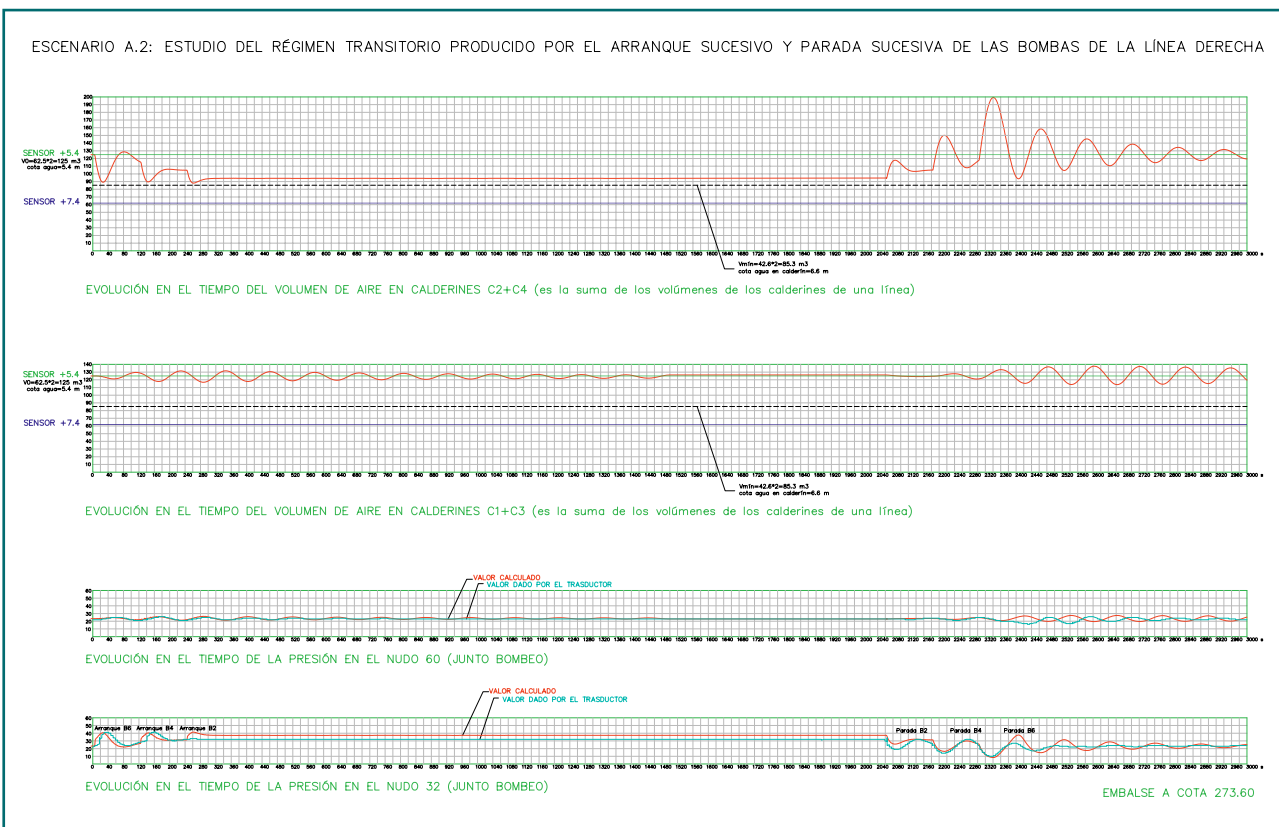
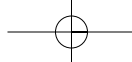


Fig. 12.
Escenario A2
/Scenario A2.



Jesús Granell Vicent, Raimundo Lafuente Dios, Carmen María Baena Berrendero, René Gómez López de Munain

Fig. 13.
Escenario A3
/Scenario A3.

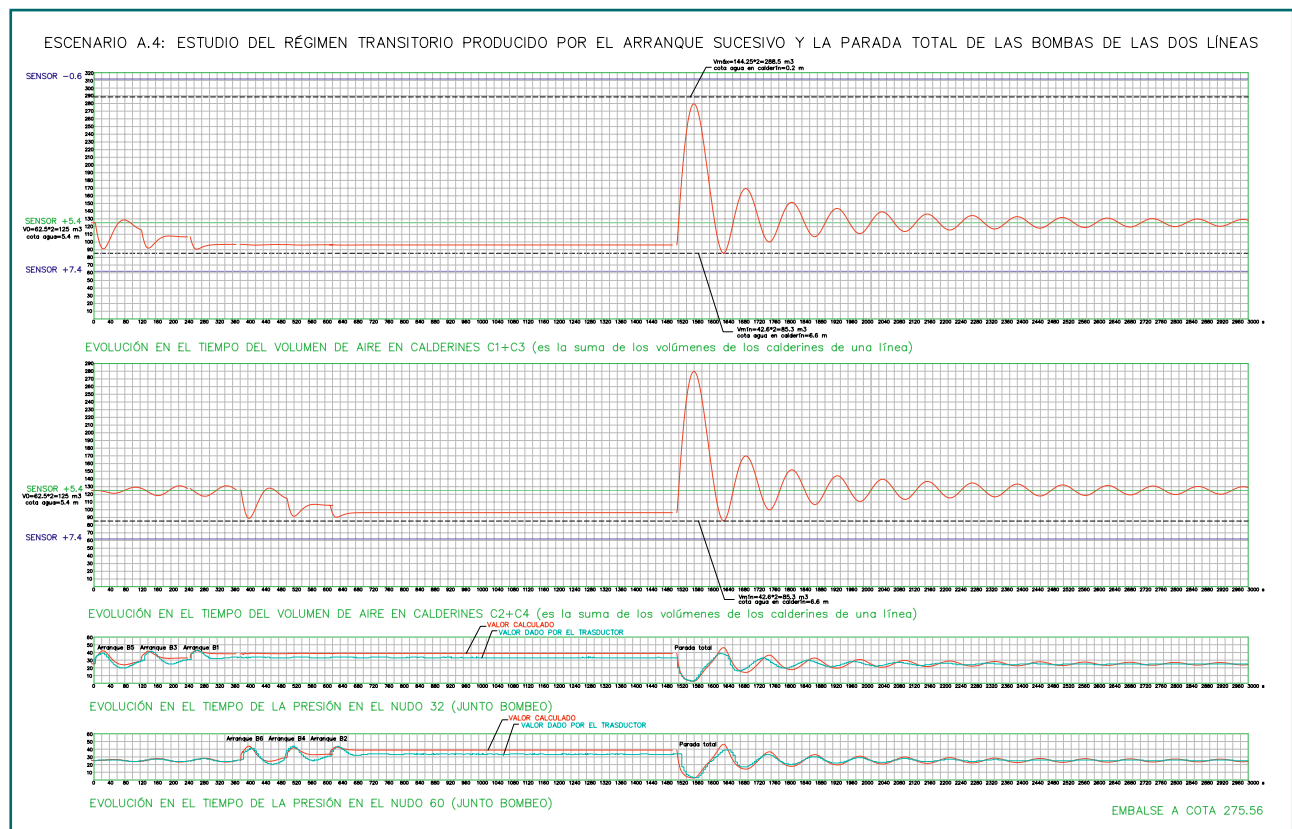
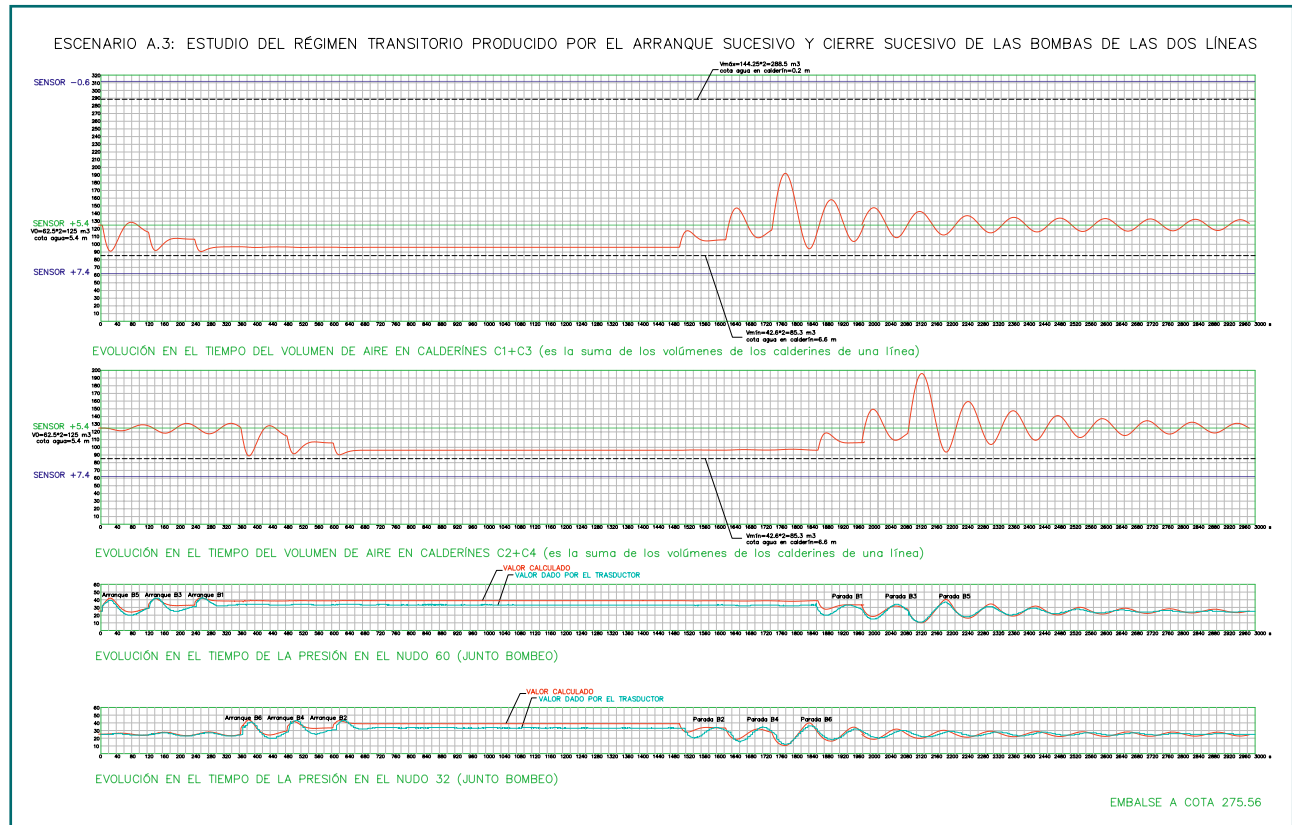
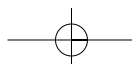


Fig. 14.
Escenario A4
/Scenario A1.



- Evolución en el tiempo (en segundos) del volumen de aire (m^3) en los calderines N° 2 y N° 4 obtenido mediante el cálculo con ARIETE. Se observa junto al eje de abscisas la ubicación de los sensores de nivel de los calderines y la comprobación a realizar, en este caso, es que la evolución del volumen de aire está comprendida en el intervalo definido por los sensores.
- Evolución en el tiempo del volumen de aire en los calderines N° 1 y N° 3 obtenido mediante el cálculo con ARIETE. La comprobación a realizar es similar a la de gráfico anterior.
- Evolución en el tiempo (en segundos) de la presión (en m.c.a.) dada por el transductor T1 (en azul) y la suministrada por el cálculo en el nudo 60 mediante ARIETE (en rojo). Se comprueba la similitud entre ambas curvas.
- Evolución en el tiempo de la presión dada por el transductor T4 (en azul) y la suministrada por el cálculo en el nudo 32 (en rojo). Se comprueba la similitud entre ambas curvas.

Se indica el arranque o la parada de cada bomba, para poder comprobar el efecto que produce cada maniobra en las presiones y en el volumen de aire en los calderines.

6. Conclusión

A lo largo del presente artículo se han expuesto las características de la conducción reversible de la presa de la Loteta hasta el Canal Imperial de Aragón.

El funcionamiento de la conducción en la fase 1ª de su puesta en marcha ha sido correcto y las pruebas realizadas para comprobar los escenarios previstos (A.1, A.2, A.3 y A.4) han resultado satisfactorias, con unos resultados muy similares a los de los cálculos que se adjuntaron en el protocolo. En ningún momento han emitido señal de alarma los sensores de nivel máximo o mínimo de los calderines.

El escenario pésimo es el A.4 porque simula el corte general de la energía, funcionando las 6 bombas, por lo que la parada es simultánea. En ese momento (se produce en el instante 1500 s, es decir, a los 25 minutos desde el arranque de la primera bomba), el golpe de ariete produce un incremento en el volumen de aire de los calderines de una línea de 98 a 280 m^3 , es decir, hay un suministro de agua a la

The readings provided by the transducers T1 and T4 have been compared with those obtained by calculation by the ARIETE programme.

With regard to the maximum and minimum level sensors, those should never produce an alarm signal under the established operating conditions of the plant.

A detailed diagram of the pump station, with indication of each component, is given below fig. 10.

5. Results obtained. Comparison

This section presents the charts of variables measured in the four scenarios. Four charts were prepared for each scenario, in the following order:

- *Evolution in time (seconds) of the volume of air (m^3) in surge tanks No. 2 and No. 4 obtained by calculation by the ARIETE programme. The location of the sensors of the level in the surge tanks may be observed beside the axis of the abscissa and, in this case, it is necessary to verify that the evolution of the volume of air comes within the settings defined by the sensors.*
- *Evolution in time of the volume of air in surge tanks No. 1 and No. 3 obtained by calculation by the ARIETE programme. The verification required is similar to that of the preceding chart.*
- *Evolution in time (seconds) of the pressure (mWc) given by transducer T1 (in blue) and that provided by calculation at node 60 by the ARIETE programme (in red). A comparison is made of the similarity between both curves.*
- *Evolution in time of the pressure given by transducer T4 (in blue) and that provided by calculation at node 32 (in red). A comparison is made of the similarity between both curves.*

The starting and stopping of each pump is indicated to verify the effect of the same on the pressure and volume of air in the surge tanks.

6. Conclusion

The present article has described the characteristics of the two-way pipeline from the Loteta dam to the Canal Imperial de Aragón.

Jesús Granell Vicent, Raimundo Lafuente Dios, Carmen María Baena Berrendero, René Gómez López de Munain

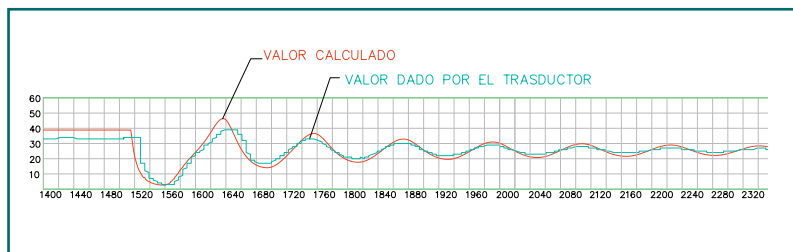


Fig. 15. Detalle del gráfico de presiones.

tubería desde los calderines que evita las depresiones (ver gráficos 1 y 2 del escenario A.4).

A pesar del gran número de parámetros necesarios para el cálculo, si se observa el siguiente gráfico de detalle de la evolución en el tiempo de la presión en un nudo cercano a la casa de bombas (cuando se produce la parada simultánea de las bombas), se aprecia, que los cálculos realizados se ajustan en gran medida a los suministrados por el sistema de control (Fig. 15).

Como reflexión final, es importante señalar que en ciertas ocasiones, por la complejidad de la modelización de todos los elementos que componen una determinada red, no se realizan los cálculos hidráulicos en régimen transitorio y las tuberías se dimensionan con factor de 1,3-1,5 sobre la presión estática para considerar la sobrepresión de golpe de ariete.

Sin embargo, el análisis en régimen transitorio es preciso realizarlo porque si el dimensionamiento de ciertos elementos (como el diámetro de las tuberías de entrada y salida del calderín, la ley de cierre de la válvula Howell, el volumen inicial de aire del calderín, etc.) no es el adecuado, la tubería puede estar sometida a sobrepresiones mucho mayores, o incluso, a depresiones.

O expresado de otro modo, el factor con el que se dimensiona la tubería para soportar el golpe de ariete va ligado a unas características determinadas de cada elemento que compone la red, y sólo puede proyectarse de forma correcta la tubería y sus elementos realizando los cálculos en régimen transitorio. ◆

Referencias/References:

- "Hydraulic Transients": Streeter V.L.; Wylie E.B.
- "ARIETE": Programa de cálculo de redes malladas en régimen transitorio. Jesús Granell, Ingenieros Consultores, S.L.
- "Proyecto del Embalse de La Loteta y de la Conducción desde la Loteta hasta el Canal Imperial de Aragón" (Zaragoza). Diciembre 1995. Jesús Granell, Ingenieros Consultores, S.L.

The operation of the pipeline in phase 1 of the start-up was seen to be correct and the tests conducted to verify predicted scenarios (A1, A2, A3 and A4) have all proved satisfactory and have given very similar results to the calculations provided in the protocol. The maximum and minimum level sensors on the surge tanks did not produce any alarm signals at any time.

The worst-case scenario is that of A.4 as it simulates a general power cut when the six pumps are working and which would subsequently give rise to a simultaneous stoppage. At this moment (occurring 1500 s, or 25 minutes after the starting of the first pump), the water hammer produces an increase in the volume of air in the surge tanks on one line from 98 to 280 m³, which implies a supply of water from the surge tanks to the pipe line to prevent depressions (see charts 1 and 2 for scenario A.4).

In spite of the large number of parameters required for calculation, when observing the following chart of the evolution in time of the pressure at one node close to the pumping station (on the simultaneous stoppage of the pumps), the calculations that were made may be seen to largely coincide with those provided by the control system.

As a final consideration, it is important to underline that on certain occasions, and on account of the complexity of modelling all the components of a specific network, no hydraulic calculations are made for the transient regime and the pipes are then dimensioned with a factor of 1.3-1.5 over the static pressure in order to incorporate the pressure surge created by the water hammer.

However, the analysis of the transient regime has to be performed as in the event that the dimensioning of certain elements (such as the diameter of the inlet or outlet pipe of the surge tank, the form of closing the Howell valve, the initial volume of the air in the surge tank, etc.) is inadequate, the pipeline may be subject to far greater pressure rise or even depressions.

When put in other words, the factor employed to dimension a pipeline to withstand the water hammer is associated with the specific characteristics of each element forming the entire arrangement and the pipeline and related components may only be designed correctly by making the necessary calculations under the transient regime. ◆