ANEJO Nº 9

CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1
2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN 2
3. CONDICIONES OPERATIVAS DE FALLO 3
4. FUNDAMENTOS DE CÁLCULO 6
5. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA PARA RESOLVER EL TRANSITORIO 9
5.1. MODELIZACIÓN DE LA TOMA DEL CANAL 10
5.2. MODELIZACIÓN DE LA IMPULSIÓN 12
5.3. MODELIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO 12
5.4. MODELIZACIÓN DE LA BALSA 16
5.5. MODELIZACIÓN DE LA RED DE RIEGO 16
6. ANÁLISIS DEL TRANSITORIO 18
6.1. RÉGIMEN PERMANENTE 18
6.2. RÉGIMEN TRANSITORIO SIN ELEMENTOS DE PROTECCIÓN 19
6.3. PROPUESTA DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN 23
6.3.1. ESTUDIO DE CALDERÍN 24
6.3.2. ESTUDIO DE CHIMENEA DE EQUILIBRIO 28
6.3.3. ESTUDIO DE TANQUE UNIDIRECCIONAL 30
6.4. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN 33
7. RESUMEN DEL ESTUDIO 42

APÉNDICE Nº 1. Elementos del modelo: tuberías, nudos y leyes de caudal
APÉNDICE Nº 2. Bombeo a balsa vacía sin y con conexión a la red de riego. Transitorio impulsión sin protección
APÉNDICE Nº 3. Bombeo a balsa vacía sin y con conexión a la red de riego. Evolución del transitorio a la salida de la EB sin protección
APÉNDICE Nº 4. Bombeo a balsa vacía con conexión a la red de riego. Transitorio en el ramal T-2 sin protección
APÉNDICE Nº 5. Bombeo a balsa vacía sin conexión a la red de riego. Transitorio impulsión con protección calderín y aductor

1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas hidráulicos a presión, tanto aducciones como impulsiones simples o redes de distribución de agua, las maniobras en válvulas o en las 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 dedique un anejo a diagnosticar los potenciales estados transitorios y sus efectos que puedan presentarse en el sistema proyectado (impulsión a balsa elevada) ante un corte accidental de energía eléctrica con parada incontrolada de bombas de las futuras instalaciones, analizando los resultados por si conviene adoptar alguna medida de seguridad con la finalidad de aminorar los fenómenos transitorios que en un futuro puedan darse o que sea necesaria en condiciones de régimen permanente para el correcto funcionamiento de la instalación.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La instalación a analizar forma parte de la modernización del regadío del Canal de Campillo de Buitrago (Soria). En concreto, se trata de la conducción de impulsión que parte desde la estación de bombeo (en adelante EB) y que da servicio a la balsa elevada que está previsto construir en el alto de una loma y que alimentará por gravedad a la red de riego colectiva para el suministro de agua de riego de toda la zona regable.

El objetivo principal de esta conducción es la transferencia de caudales (máximo 2.357 l/s) desde la toma del canal anexado a la EB hasta la salida de agua en la balsa elevada (punto de vertido a la atmósfera). La tubería de impulsión entre la EB y la balsa es de uso reversible y sirve, según el sentido del agua, tanto para llenar la balsa como para alimentar a los hidrantes que estén demandando agua para el riego de los cultivos a través de una red colectiva. La distribución del agua en la zona regable se realizará mediante una serie de ramales secundarios que salen desde los ramales principales T-1 y T-2. Las tuberías se irán ramificando, pudiendo haber hidrantes dispuestos a lo largo de los ramales y subramales hasta la finalización de los mismos en donde hay un hidrante de final de ramal.

La impulsión a analizar está proyectada como suma de dos tramos: “Tramo red de riego” que es la tubería perteneciente a la red de riego y que está compuesta por el inicio del ramal T-1 que va desde la salida de la EB (aguas abajo del caudalímetro general) hasta el punto de encuentro con la tubería denominada en planos como “Impulsión”; y el tramo denominado “Tramo impulsión” que es el tramo que une la red de riego (ramal T-1) con la balsa y que se corresponde con la tubería denomina en planos como “Impulsión”. De cara a facilitar la compresión del análisis, al conjunto de ambos tramos a efectos del transitorio se le ha denominado en conjunto como “Impulsión”, si bien es necesario diferenciar ambos tramos para la correcta modelización. En cualquier caso, para ambos tramos se trata de una tubería de hormigón postesado con camisa de chapa (HPCCH) DN 1.500 mm PN 10 con una longitud total desde la salida de la EB hasta el punto de vertido en la balsa de 805 m, siendo los últimos 103 m realizados en tubería de acero.

La balsa cuenta con una capacidad de unos 143.275 m^3 y tiene una cota de fondo de 1.097,5 m.s.n.m., cota de nivel mínimo operativa 1.098 m.s.n.m., y cota 1.105 m.s.n.m para el NMN.

La instalación de bombeo para el llenado de la balsa constará de los siguientes grupos cuyos puntos de diseño son los siguientes:

- 4 grupos principales. Caudal unitario de 520 l/s para una altura manométrica de 82,3 mca (potencia hidráulica de 419 kW). El rendimiento estimado es del 84,5 % (potencia bomba de 495 kW). Se estima un motor con potencia nominal de

650 kW. Los 4 grupos funcionarán sin variador de frecuencia, facilitando el arranque y parada mediante arrancador electrónico. La velocidad de rotación es de 985 rpm.

- 2 grupos auxiliares. Caudal unitario de 300 l/s para una altura manométrica de 82,3 mca (potencia hidráulica de 242 kW). El rendimiento estimado es del 84,5 % (potencia bomba de 286 kW). Se estima un motor con potencia nominal de 355 kW. Los 2 grupos funcionarán con variador de frecuencia, si bien ambos grupos auxiliares no estarán en marcha cuando estén trabajando los 4 grupos principales. La velocidad de rotación es de 1.495 rpm.

La aspiración de la EB se realiza a partir de una derivación practicada sobre el actual canal, que consistirá en un tramo de canal rectangular de hormigón de sección 2,25 x 2,75 m y que vierte sobre una arqueta profunda en el que hay instalado un filtro de cadenas. De esta arqueta profunda sale una conducción de acero de DN 1.600 mm (cota eje 1.021,3 m.s.n.m) y que se corresponde con el colector principal de aspiración, estando el edificio de la EB que alberga los grupos al lado de la arqueta del filtro, por lo que el colector tiene una longitud total de 32 m entre la salida de la arqueta hasta la aspiración de la bomba más alejada.

El colector general de impulsión es una tubería de acero de DN 1.400 mm con una longitud de 33,5 m desde la primera bomba hasta la salida de la EB, tras pasar el caudalímetro general. A continuación, del caudalímetro se realizará un cono de transición a 1.500 mm para empezar con la tubería de impulsión. Como se ha descrito anteriormente, la tubería de impulsión es de uso reversible, por lo que los primeros metros pertenecen al ramal T-1. Con respecto al ramal T-2, y dentro de la EB, el colector general de impulsión por un sentido sale de la EB hacia la balsa mediante el ramal T-1 y el ramal T-2 sale por el extremo opuesto. Se considerará como referencia para eje de bombas y de colectores de aspiración e impulsión la cota 1.022 m.s.n.m.

En cuanto a la red de riego, consta de una total de 65.700 ml de tuberías repartidos en varios ramales. El ramal principal (T-1) tiene una longitud de 12.390 m, y aguas abajo del ramal de derivación de la impulsión se ha proyectado la instalación de dos filtros en carga de DN 1.000 mm. Los diámetros y materiales de las distintas conducciones de los ramales se corresponden con HPCCH para DN 1.500 mm a DN 700 mm, fundición dúctil desde DN 600 mm a DN 450 mm, y PVC-O PN16 para las tuberías de DN 400 mm a DN 160 mm. Como se describirá más adelante, se modelizará varios ramales y subramales.

3. CONDICIONES OPERATIVAS DE FALLO

La condición de servicio de la instalación cuando esté completamente ejecutada es proporcionar el caudal de diseño de la EB para el llenado de la balsa elevada. Las

condiciones de funcionamiento cambiarán con el tiempo, ya que los caudales demandados al inicio y final de cada campaña serán menores que en los momentos de mayores necesidades de riego (normalmente el mes de julio), incrementando las demandas de caudal en la impulsión hasta un límite máximo operativo correspondiente a la suma de los caudales que proporciona las 4 bombas principales (2.357 l/s).

Con ello se plantea la hipótesis de que pueda producirse un fallo en el suministro eléctrico en la EB cuando se esté demandando el caudal de diseño, supuesto que se desarrollará en los próximos apartados. Otras hipótesis de estudio que pueden plantearse es que el fallo en el suministro eléctrico se produzca cuando esté operativa una única bomba, o dos o tres; o tres bombas grandes y una auxiliar, etc. y que conllevaría a un estudio muy extenso desde la perspectiva del cálculo. En la práctica, en los estudios de transitorios, lo más usual es abordar el análisis de la situación más desfavorable, afirmándose de modo implícito que si el sistema responde bien en esta situación extrema, también lo hará en cualquier otra no tan desfavorable, por lo que se estudia la parada del punto de diseño de la instalación como situación más desfavorable, si bien se comprobará otras situaciones de funcionamiento, a priori menos exigentes en cuanto a transitorios, para dar por correcto la premisa congruente.

Por otro lado, al ser la impulsión una tubería de uso reversible, en el momento en que exista alguna demanda en la red mientras se esté bombeando, el caudal que circula por la tubería de impulsión hacia la balsa será distinto en función de cuáles y cuántos hidrantes estén abiertos, ya que el agua circulará desde la tubería de la EB hasta los hidrantes abiertos por los ramales, existiendo un remanente de caudal menor al caudal total que se estará impulsando y que llegará a la balsa. Con ello, el transitorio por parada brusca de los grupos puede ser relativamente amortiguado por las tuberías de la red de riego acopladas al sistema de impulsión, y/o por la condición de que circule menos caudal hacia la balsa debido a que hidrantes estén abiertos en ese momento, si bien también pueden producirse fenómenos de cavitación en ramales debido a su topografía, a la distancia existente con respecto a la EB, a los hidrantes que estén abiertos en el ramal en cuestión, etc.

En resumen, inicialmente se diagnosticará desde el punto de vista del transitorio la situación más desfavorable que es la parada accidental por fallo de energía eléctrica de todas las bombas y suponiendo que todo el caudal de diseño circula por toda la tubería de impulsión hasta la balsa, analizando los fenómenos transitorios que tendrán lugar en la explotación del sistema sin estar conectado a la red de riego, es decir, aislada del ramal T-2 y del ramal T-1 a partir de la estación de filtros en carga, situación que podría darse con algo de frecuencia (inicios de campaña, mantenimiento y reparación de filtros, etc.).

Esta maniobra accidental puede dar origen a cavitación, rotura de la columna líquida y colapso de la tubería, determinando por los resultados si conviene adoptar alguna

medida de seguridad (instalación de elementos de protección) con la finalidad de aminorar los fenómenos transitorios que puedan darse. A posteriori se realizarán cálculos del transitorio para otras hipótesis enunciadas anteriormente, como es el bombeo a balsa conectada con la red de riego en condición sin apertura de hidrantes, y otras con distintas combinaciones de apertura de hidrantes.

4. FUNDAMENTOS DE CÁLCULO

La modelización del sistema se realiza con el programa ALLIEVI (software específico para resolución de transitorios hidráulicos) desarrollado por el Instituto Tecnológico del Agua (ITA), perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

Este programa resuelve las ecuaciones del flujo transitorio aplicando el método de las características (Betamio de Almeida y Koelle, 1992) a partir de las condiciones de flujo permanente evaluadas por el mismo programa, y de las condiciones de contorno que proporcionan diferentes elementos instalados en la red. El sistema de tuberías donde se producen los transitorios simulados puede ser un sistema cualquiera, compuesto tanto por una tubería simple como por una red ramificada, mallada o mixta.

El motor de cálculo del programa se fundamenta en modelizar los transitorios hidráulicos aplicando las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento a un volumen de control que incluye la onda de presión que se mueve a lo largo de la conducción. De aquí se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales no lineales con dos incógnitas: la altura piezométrica H = H(x,t) y la velocidad V = V(x,t). La forma completa de este sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot sen\,\theta = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g\,\frac{\partial H}{\partial x} + f\,\frac{v\,|v|}{2\,D} = 0$$

En donde *H* es la altura piezométrica en mca; *x* es la distancia al origen de la tubería en m; *t* es el tiempo en s; *v* es la velocidad del fluido en m/s; *g* es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s^2); *f* es el factor de fricción de la tubería (adimensional); θ es el ángulo que forma la conducción con respecto al plano horizontal; D es el diámetro interior de la conducción en m; y *a* es la celeridad de la conducción o velocidad de transmisión de la perturbación en el interior de la tubería en m/s.

El factor f puede obtenerse a partir de la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{D \cdot 3{,}7} + \frac{2{,}51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right)$$

en donde Ɛ es la rugosidad absoluta de la tubería y Re el número de Reynolds.

La celeridad de la onda de presión en el medio *a*, cuantifica la velocidad a la que se desplazan las perturbaciones en el interior de la tubería. El valor de la celeridad se puede obtener de la expresión de Korteweg quien proporciona la formulación de la celeridad de una onda de presión incluyendo los efectos elásticos del fluido y tubería:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D}{e}\frac{K}{E}}}$$

K: Módulo de elasticidad volumétrico del fluido (2,074 x 109 N/m^2 para el agua)
E: Módulo de Young del material que configura la tubería
D: Diámetro interior de la tubería
e: Espesor de pared de la tubería
ρ: Densidad del fluido (1.000 kg/m^3 para el agua)

Sustituyendo los términos para el caso del agua, la expresión de la celeridad queda de la siguiente forma:

$$a = \frac{1440}{\sqrt{1 + \frac{2.074 \cdot 10^9}{E}\frac{D}{e}}}$$

Del sistema de ecuaciones completo se asume que el término *v·sen ϑ* se puede despreciar si se tiene en cuenta que *V* siempre alcanza valores iguales o menores a *a*/100. Otra simplificación que es necesario realizar para hallar una solución es asumir que el término convectivo $V\frac{\partial V}{\partial x}$ es despreciable respecto del término $\frac{\partial V}{\partial t}$, y también que $V\frac{\partial H}{\partial x}$ es despreciable frente al término $V\frac{\partial H}{\partial t}$.

El sistema de ecuaciones inicial se transforma entonces en la siguiente expresión:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + f \cdot \frac{v|v|}{2D} = 0$$

En general interesa más conocer la evolución del caudal que la evolución de la velocidad en el interior de la tubería, por lo que finalmente el sistema de ecuaciones se transforma en la siguiente expresión:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA}\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA\frac{\partial H}{\partial x} + f\frac{Q|Q|}{2DA} = 0$$

en donde *A* es la sección de la tubería considerada constante durante todo el transitorio y siendo *Q* el caudal que la atraviesa, y que son las ecuaciones más generales del comportamiento transitorio de un fluido en una conducción teniendo en cuenta la variabilidad de *Q* y *H*, las variaciones de densidad del fluido y la elasticidad del material, conocido como modelo elástico. Las ecuaciones simplificadas permiten seguir la

evolución espacio-temporal del transitorio ya que tiene en cuenta las variables que intervienen en los diferentes pulsos de presión que se generan, reflejan, transmiten y modifican a lo largo de la conducción.

Como este sistema de ecuaciones diferenciales no tiene solución analítica, debe ser resuelto por métodos numéricos. Para su integración numérica el procedimiento habitual es admitir que la solución se obtendrá en instantes de tiempo determinados (separados entre sí un Δt) y en puntos concretos sobre la conducción (separados entre sí un Δx), de manera que una onda de presión recorra en el interior de la conducción una distancia Δx en un tiempo Δt, cumpliéndose la condición de Courant-Friederics-Lewy (condición CFL):

$$a = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Con esta hipótesis, las ecuaciones diferenciales anteriores que definen el fenómeno transitorio se transforman en un sistema de dos ecuaciones algebraicas, lineales, con dos incógnitas (*Q* y *H*), resolviéndose el sistema mediante el método de las características (MOC) cuyo objetivo final es el de ofrecer una solución numérica discreta de las funciones H = H(x,t) y Q = Q(x,t) en cualquier punto del sistema *x*, y en cualquier instante de tiempo *t*, compatibles con el sistema de condiciones de contorno y que es el fundamento de cálculo del programa ALLIEVI.

5. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA PARA RESOLVER EL TRANSITORIO

El objetivo principal del presente estudio de transitorios es cuantificar las máximas/mínimas presiones que van a darse en la instalación, verificando si pueden ser absorbidas por el sistema proyectado sin que la instalación corra riesgo alguno, o por el contrario es necesario dimensionar elementos de protección.

Para lograr este objetivo es primordial modelar la infraestructura a analizar convenientemente, es decir, que represente el sistema real de manera simplificada pero, al tiempo, suficientemente representativa, de forma que la representación simplificada de la compleja realidad reproduzca adecuadamente sus características principales y de este modo, permita caracterizar con fiabilidad y precisión su comportamiento.

El recorrido realizado en el presente estudio ha consistido en crear un único modelo que contemple tanto la elevación desde el canal (EB) hasta la balsa de acumulación mediante la tubería de impulsión fraccionada en varios tramos (un tramo inicial que pertenece al ramal T-1 y el tramo de impulsión), junto con la incorporación de la red de riego mediante la modelización de los ramales principales T-1, T-1-2 (y subramales), T-1-11, T-1-17, T-1-18, T-1-19, T-1-22, T-1-23, T-1-28, y T-2 (y subramales) por ser relevantes en cuanto a longitud, posición y diámetros representativos de la red de riego, asignando a los mismos los hidrantes que se alimentan desde cada ramal.

Para poder estudiar con el modelo completo el aislamiento de la impulsión de la red de riego, se insertan dos válvulas de seccionamiento: una al inicio del ramal T-2, y otra en donde se instalan los filtros en carga en la T-1, aguas abajo de la derivación de la impulsión. De esta manera, cuando se simule la impulsión sin conexión a red, las válvulas interpuestas estarán cerradas en todo el proceso de la simulación; mientras que las simulaciones de impulsión con conexión a la red, las válvulas permanecerán completamente abiertas desde el inicio de la simulación.

La justificación de crear un modelo que aglutine impulsión y red de riego radica en que el fenómeno transitorio se propaga a través de las diferentes conducciones y elementos que tenga conectados, sufriendo atenuaciones y eventuales ampliaciones al encontrar discontinuidades. Estas discontinuidades pueden ser debidas a cualquier variación de las características de la conducción por la que se propaga la onda de presión (variación de diámetro, espesor o material; presencia de cualquier dispositivo como válvulas, etc.). La influencia de las discontinuidades de las conducciones en la propagación y transmisión de las ondas sirve de ejemplo para explicar cómo una perturbación originada en una conducción, dependiendo de la topología del sistema, se amortigua o amplia.

En conclusión, la interacción de las distintas tuberías que hay aguas abajo de la EB

(red de riego) e integradas en conjunto servirá para evaluar el transitorio que acontece en la instalación ya que las ondas generadas podrán viajar a lo largo de las conducciones que componen la red de riego.

A continuación se realiza una descripción de la modelización hidráulica del sistema a analizar en ALLIEVI.

5.1. MODELIZACIÓN DE LA TOMA DEL CANAL

El inicio del sistema hidráulico proyectado comienza en la toma del canal en el azud de Campillo de Buitrago, presa de hormigón sobre el río Duero con una capacidad en torno a los 2 Hm^3. El azud tiene la cota de NMN a 1.025,1 m.s.n.m. y la cota de vertido sobre las compuertas Taintor es la 1.022,1 m.s.n.m. Con respecto al canal de Campillo de Buitrago, este tiene una longitud total de 36,54 km con sección trapecial en la mayoría de su trazado. El revestimiento es de hormigón y el talud de los cajeros es 1 H / 1 V. Su puesta en servicio data del año 1976.

La toma sobre el canal que abastecerá a la EB se encuentra en el pk 1+312. La cota de solera del canal en este punto es la 1.023,2979 m.s.n.m. La altura vertical de cajeros en todo este tramo es de 1,75 m, la pendiente está en torno a 0,0002 m/m y la base presenta una anchura de 1,12 m. Con estos datos se calcula qué caudal puede llegar en régimen permanente hasta el punto de la toma de la EB aplicando la ecuación de Manning para canales (Figura nº 1):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S \cdot R^{2/3} \cdot \sqrt{I}$$

siendo

- n: Coeficiente de rugosidad (por el estado que presenta el canal, se establece en 0,015)
- S: Área transversal mojada
- R: Radio hidráulico: R=S/P (P es el perímetro mojado)
- I: Pendiente del canal

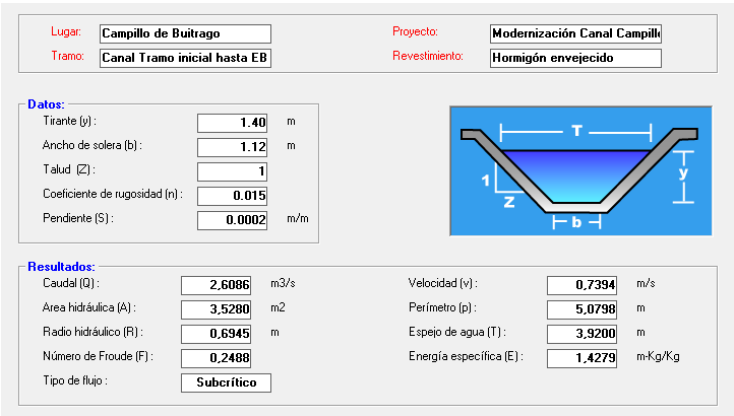

Figura nº 1. Resumen cálculos hidráulicos canal Campillo de Buitrago. Tramo inicial

Se comprueba que el caudal para una tirante de 1,4 m (se asume que se deja 35 cm de resguardo) es de 2.608 l/s, superior al máximo caudal de bombeo previsto (2.357 l/s), por lo que el canal es capaz de transportar el caudal requerido para el bombeo en régimen permanente. El tipo de flujo en el tramo analizado atendiendo al parámetro adimensional de Froude se corresponde con el régimen subcrítico (también llamado "lento" o "tranquilo").

La obra de toma a ejecutar sobre el canal de Campillo de Buitrago en el pk 1+312 consiste en realizar un tramo de canal de sección rectangular con ancho de solera de 2,25 m y altura total de cajeros de 2,75 m conectado perpendicularmente al canal. Este canal rectangular tiene una longitud aproximada de 45 m, si bien los primeros metros lineales tienen un sobreancho como zona de transición entre el canal construido y el nuevo, en donde se instalará una compuerta mural y una reja de desbaste con limpiarejas. El tramo final del canal rectangular vierte a una arqueta profunda en la que se instalará un filtro de cadenas. Esta arqueta sirve como depósito de carga para la tubería de aspiración que sale de la arqueta y que conduce el agua hasta las bombas. La cota de fondo de la arqueta es la 1.020,3 m.s.n.m. La conducción de la aspiración tiene un diámetro DN 1.600 mm y su eje de salida se sitúa a la cota 1.021,5 m.s.n.m. La altura total interior de muros de la arqueta es de 5,7 m.

Con ello y para no cargar al programa con sobre cálculos, se opta por asumir la arqueta del filtro de cadenas como el elemento de partida del sistema a modelizar para el cálculo del transitorio, obviando modelizar el azud y los dos tramos de cada canal hasta la arqueta, puesto que en régimen permanente se ha comprobado que el canal es capaz de transportar el máximo caudal a bombear (2.357 l/s). Esta arqueta se modeliza como un depósito de grandes dimensiones, ya que se considera que el volumen contenido en la misma apenas variará para el tiempo de simulación del permanente y del transitorio, puesto que el caudal de salida (el bombeado) se repone instantáneamente en la arqueta por el caudal que le llega del canal. Con ello, es necesario asignar dos cotas:

- *Cota inicial del agua (Z_0)*: Es la cota del agua utilizada para calcular el régimen permanente. Al ser un depósito de grandes dimensiones esta cota no cambiará a lo largo de toda la simulación, independientemente de los caudales de entrada y de salida que se establezcan, y no van a cumplir en ningún caso la ecuación de continuidad. En nuestro caso se trata de la cota de la lámina libre del agua en el canal cuando está transportando el máximo caudal previsto: cota solera + calado (1.023,2979 + 1,333) a la que restaremos 0,5 m para tener en cuenta las pérdidas que carga que pueden producirse por el limpiar rejas, por el tramo del canal rectangular y por el filtro de cadenas (1024,1309 m.s.n.m.).

- *Cota de solera (Zs).* Se trata de la cota asignada al eje de salida de la conducción de aspiración (1.021,5 m.s.n.m.)

5.2. MODELIZACIÓN DE LA IMPULSIÓN

La tubería de impulsión que va desde la salida de la EB hasta la balsa de acumulación se modeliza con 7 tramos denominados T-1_1, IMPUL_1, IMPUL_2, …, IMPUL_6. La conducción T-1_1 se corresponde con el primer tramo del ramal principal T-1, desde la salida de la EB tras el caudalímetro general hasta el punto de derivación de la tubería de impulsión. Se corresponde con una conducción de HPCCH DN 1.500 mm de longitud 170,87 m. Los tramos IMPUL_1, IMPUL_2 y IMPUL_3 son también de HPCCH DN 1.500 mm y se trata de la conducción denominada "impulsión" en los planos de planta y de perfiles longitudinales. Los tramos IMPUL_4, IMPUL_5 y IMPUL_6 se corresponde con la última parte de la impulsión realizada en acero y que va desde la caseta de válvulas hasta la arqueta de vertido en la balsa elevada.

Los valores de celeridad, espesor, diámetro interior, longitud, rugosidad y otros datos singulares se recogen para cada tramo en la Tabla nº 1:

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)		Perfil	Rug (mm)	k
T-1_1	N22	1022	N6	1024,278	1500	170,87	118	1111,1702	Calc.	-^/\--/	0,1	0
IMPUL_1	N6	1024,278	N7	1086,004	1500	460	118	1111,1702	Calc.	-^/\--/	0,1	0
IMPUL_2	N7	1086,004	N8	1089,597	1500	65,58	118	1111,1702	Calc.	-^/\--/	0,1	0
IMPUL_3	N8	1089,597	N73	1090,481	1500	6	118	1111,1702	Calc.	----	0,1	0
IMPUL_4	N73	1090,481	N9	1095,1383	1504	11,1057	10	893,3796	Calc.	----	0,1	0
IMPUL_5	N9	1095,1383	N563	1095,1383	1402	6,6063	10	912,5296	Calc.	----	0,1	0
IMPUL_6	N563	1095,1383	N208	1095,41	1504	85,528	10	893,3796	Calc.	----	0,1	2

Tabla nº 1. Entrada de datos de la conducción de impulsión

Para simplificar los cálculos no se han considerado pérdidas cinéticas $h = kV^2/2g$ (valor de k = 0) debido a singularidades menores provocadas por los codos, derivaciones, cambios de dirección, ya que las rugosidades absolutas que se adoptan en el cálculo (0,1 mm para todas conducciones) son relativamente valores conservadores. Se realiza una excepción para el último tramo (IMPUL_6), ya que para considerar las pérdidas a la entrada en la arqueta de llegada a la balsa se valora un k de 2.

En cuanto al perfil de cada conducción, los valores introducidos por tramos se corresponden con la cota del eje de la tubería y definido a partir de los planos de perfiles longitudinales del proyecto, obteniendo la cota del eje de la tubería sumando a la cota de la rasante que viene indicada en la guitarra del perfil longitudinal, el espesor de la cama de apoyo (15 cm) y la mitad del diámetro exterior de la conducción.

5.3. MODELIZACIÓN DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO

Respecto a la configuración de la EB cuando esté en marcha a plena carga, se ha indicado con anterioridad que se realizará con 4 grupos principales de iguales características instalados en paralelo a la cota 1.022 m.s.n.m, bombeando un caudal total de 2.357 l/s a 82,3 mca. Las bombas auxiliares no se contemplan para el punto de diseño de la instalación, por lo que no se van a tener en cuenta en la modelización.

En ALLIEVI se considera cada EB que se implemente como un conjunto formado por "*n*" bombas todas ellas iguales y en paralelo, pudiendo estar constituido cada bomba con una válvula de retención (en adelante VR), una válvula de regulación y un bypass entre los colectores de aspiración e impulsión entre el conjunto de todas las bombas que forman el grupo de bombas (Figura nº 2).

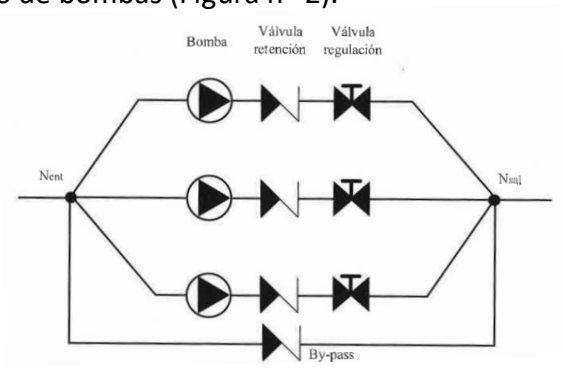

Figura nº 2. Componentes de un elemento estación de bombeo (EB) en el programa ALLIEVI

En nuestro caso se anula inicialmente la opción del by-pass. Además, la válvula de regulación tampoco se modeliza ya que ésta, en proyecto, se corresponde con una válvula de mariposa a la salida de cada bomba que no va a actuar en regulación (su posición será todo o nada y regulando solamente en el arranque y parada de los equipos), por lo que no es necesario contemplarla en el modelo de transitorio.

En cuanto a la VR, normalmente los modelos de simulación de transitorios hidráulicos admiten que las VR tienen un comportamiento ideal, según el cual la válvula estará totalmente abierta cuando por ella circule un caudal positivo, y se cierra instantáneamente cuando el caudal a través de la misma se anula o va a ser negativo. En cuanto a las pérdidas de carga de esta válvula, y según catálogo del fabricante para DN 600 mm (Figura nº 3), el coeficiente de flujo Kv a válvula completamente abierta es de 11.500 $(m^3/h)/(bar)^{0,5}$.

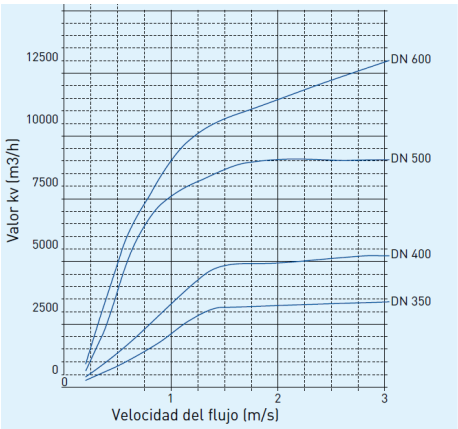

Figura nº 3. Ábaco de pérdidas de carga (Kv) para la VR

El coeficiente de pérdidas de la VR en ALLIEVI se introduce con unidades $mca/(m^3/s)^2$

para el cálculo de las pérdidas en función del caudal ($h=KQ^2$), por lo que debemos transformar el Kv de catálogo $(m^3/h)/(bar)^{0,5}$ al Kv que necesita el programa en $mca/(m^3/s)^2$.

$$h = KQ^2 \rightarrow K = h/Q^2 \rightarrow K = 10/(11.500/3.600)^2 = 0{,}98\ m/(m^3/s)^2$$

En cuanto a la forma de introducir en ALLIEVI las curvas características de las bombas, éstas pueden ser universales o ajustadas por puntos del catálogo del fabricante. Como interesa caracterizar el comportamiento de cada bomba en cualquier condición de funcionamiento, esto es, para valores positivos, negativos o nulos de caudal, altura y velocidad de rotación, se emplea las curvas Universales de Marchal, Flesch y Suter para un total de 14 valores de la velocidad específica N_S.

Los datos necesarios para caracterizar la bomba con las curvas universales corresponden al punto óptimo de funcionamiento a la velocidad de rotación nominal, que según los datos son:

- Caudal Q_{b0}. Es el caudal impulsado por cada bomba en el punto óptimo de funcionamiento: 515 l/s.
- Altura H_{b0}. Es la altura creada por la bomba en el punto óptimo de funcionamiento: 82,3 mca.
- Velocidad de rotación: 985 rpm.
- Potencia de accionamiento P_{a0}. Es la potencia de accionamiento de cada bomba en el punto de óptimo de funcionamiento (no confundir con la potencia nominal del motor) indicado mediante la siguiente expresión:

$$P_{ao}(kW) = \frac{9{,}81 \cdot Q(\frac{m^3}{s}) \cdot H(m)}{\eta} = \frac{9{,}81 \cdot 0{,}515 \cdot 82{,}3}{82{,}3\%} = 504{,}9\ kW$$

  en la que se adopta un valor del rendimiento η del 82,3%.

Por otro lado, uno de los parámetros que interviene en los transitorios originados por las maniobras de las bombas, especialmente las paradas, es el momento de inercia de las masas rodantes, evaluado como suma de los momentos de inercia del rodete y del agua en su interior, del rotor del motor eléctrico que acciona la bomba, del eje de transmisión y del acoplamiento entre ejes.

La inercia determina la velocidad con que se produce la parada y, en general, la capacidad de respuesta a las perturbaciones, por lo que se ha de indicar la inercia del grupo bomba-motor en el programa de cálculo. Como normalmente no se dispone del momento de inercia, y a falta de una información más concreta, se emplea la fórmula propuesta por Thorley:

$$I = 0{,}03768 \cdot \left(\frac{P}{N^3}\right)^{0{,}9556} + 0{,}0043 \cdot \left(\frac{P}{N}\right)^{1{,}48}$$

donde *I* es el momento de inercia del grupo en kg·m^2, *P* la potencia de accionamiento de la bomba en su punto óptimo de funcionamiento en kW, y *N* la velocidad de rotación nominal del rodete en miles de rpm.

En la expresión, el primer término del segundo miembro representa el momento de inercia de rodete y eje, y el segundo término del segundo miembro el momento de inercia del rotor del motor eléctrico de accionamiento.

Sustituyendo los valores en la expresión anterior obtenemos un momento de inercia de:

$$I = 0{,}03768 \cdot \left(\frac{505}{0{,}985^3}\right)^{0{,}9556} + 0{,}0043 \cdot \left(\frac{505}{0{,}985}\right)^{1{,}48} = 15{,}07 + 44{,}05 = 59{,}13\ \mathrm{kg \cdot m^2}$$

La siguiente tabla ilustra los datos completos de la EB procedentes de la entrada de datos en Allievi:

Estación de bombeo - Datos básicos						Instalación			Rotación				Parada/Arranque					
Nombre	Ni	Nf	Z (m)	Num	Curva	V Reg	V Ret	By-Pass	Nreg	Nnom	I		Inicial	Paran	Inst. par.	Nuevo arr	Arrancan	Inst. arr.
B1	N2	N3	1022	4	Universale	No	Si	No	985	985	59,129	Calc.	En marcha	Si	5	No		

Rendimiento óptimo				V Regulación				V Retención	By-Pass
Q (l/s)	H (m)	P (Kw)	Rend(%)	DN (mm)	Tipo	Modelo	Maniobra	K	K
515	82,3	504,97	82,34					0,98	

Tabla nº 2. Datos de la EB en ALLIEVI para modelizar el sistema

En cuanto a los colectores principales de aspiración y de impulsión, se modelizan como conducciones de acero DN 1.400 mm y espesor 10 mm. El colector general de aspiración (tramo COL_ASP) tiene una longitud de 25 m desde la salida de la arqueta del filtro hasta la aspiración de la última bomba. El colector general de impulsión se ha dividido en dos tramos de 20,5 m y 15 m de longitud respectivamente, para tener en cuenta un punto de inserción de válvulas de alivio en el caso de que sean necesario. El tramo final del colector general de impulsión acaba en el caudalímetro a la salida de la EB, en donde se une a la conducción T-1_1, primer tramo del ramal T-1. Para tener en cuenta las pérdidas de carga que se producen en el tramo de la aspiración se ha establecido un valor de k de 2.

Los valores de celeridad, espesor, diámetro interior, longitud, rugosidad y otros datos singulares se recogen para cada tramo en la Tabla nº 3:

Tuberías - Datos básicos											Pérdidas		Caudal nulo	
Nombre	Ni	Zi (m)	Nf	Zf (m)	Dint (mm)	L (m)	e (mm)	a (m/s)		Perfil	Rug (mm)	k	Qin=0	H Imp
COL_ASP	N1	1021,5	N2	1022	1402	25	10	912,5296	Calc.	----	0,1	2		
COL_IMP_1	N3	1022	N4	1022	1402	20,5	10	912,5296	Calc.	----	0,1	0		
COL_IMP_2	N4	1022	N5	1022	1402	15	10	912,5296	Calc.	----	0,1	0		

Tabla nº 3. Entrada de datos de las conducciones de la EB

5.4. MODELIZACIÓN DE LA BALSA

La balsa de acumulación se modeliza como un depósito de grandes dimensiones, ya que se considera que su volumen es alto (143.275 m^3) para el tiempo de simulación del transitorio, en el que es necesario asignar dos cotas:

- *Cota de solera.* Se trata de la cota del eje de la tubería de impulsión en la arqueta de vertido en la llegada a la balsa (1.095,41 m.s.n.m).

- *Cota inicial del agua (Z_0)*: Es la cota del agua utilizada para calcular el régimen permanente. Al ser un depósito de grandes dimensiones esta cota no cambiará a lo largo de toda la simulación para el nivel elegido, independientemente de los caudales de entrada y de salida que se establezcan, y no van a cumplir en ningún caso la ecuación de continuidad. En nuestro caso se realizará dos simulaciones distintas en función de dos cotas: la que define el NMN (cota 1.105 m.s.n.m.), puesto que es la situación en la que las bombas deben dar mayor presión para alcanzar este nivel de agua; y la cota 1.098 m.s.n.m., que se corresponde con el nivel mínimo útil de balsa. Bombeando a esta última cota se estudia el escenario en el que el caudal de bombeo es el máximo.

5.5. MODELIZACIÓN DE LA RED DE RIEGO

Con respecto a la red de riego, se introducen en el programa varios ramales separando cada tramo que compone el ramal según se vaya produciendo salidas para los hidrantes o salidas para los subramales. Para ello se acude a los perfiles longitudinales de los ramales y se identifica cada tramo de conducción entre dos nodos consecutivos en donde haya un cambio de diámetro, material (HPCCH, fundición o PVC-O), salida de un hidrante o salida de un ramal secundario para definir los elementos tuberías en ALLIEVI, especificando por cada elemento tubería su longitud, cotas inicio-fin y de puntos intermedios, celeridad, diámetro interior y rugosidad.

De esta manera se han creado 198 elementos tuberías con una longitud total de 30.419 m para los ramales T-1, T-1-2 (y subramales), T-1-11, T-1-17, T-1-18, T-1-19, T-1-22, T-1-23, T-1-28, y T-2 (y subramales). Los elementos tubería que componen cada ramal se identifican numerando cada uno de ellos de forma consecutiva, p.ej. para el ramal T-1-2 se enumeran cada conducción o tramo en ALLIEVI como T-1-2_1, T-1-2_2, etc. Como se ha indicado al inicio del apartado Nº 5, se modelizan dos válvulas de corte para aislar la red de riego de la impulsión.

Hidrantes de riego

La modelización de las demandas de caudal que se producen en cada hidrante se establece mediante un elemento ley de caudal. Con este elemento ley, se impone un comportamiento determinado (caudal de salida) a un nudo donde la ley de caudal va a

venir establecida por una ley de caudal de forma tabulada, en la que para cada punto *i* de la tabla, los datos a introducir son:

- Instante t_i. Es el instante de tiempo correspondiente al punto i.
- Caudal de salida Q_i. Es el caudal que sale por el nudo en el instante t_i. Este caudal se corresponderá con la dotación asignada al hidrante.

Este tipo de ley tabulada se impone tanto para cuando se quiera simular los hidrantes cerrados (caudal 0 l/s) desde el instante t = 0 s hasta el final de la simulación, como para cuando se quiera simular el hidrante abierto, asignando la dotación establecida en cada uno de ellos desde el instante inicial hasta el instante final considerado. Con ello y ante una parada de bombas incontrolada, los hidrantes que estaban abiertos y dando riego a las parcelas seguirán abiertos ya que el telecontrol no los cerrará, soltando el mismo caudal (dotación) impuesto por la ley de caudal durante el transitorio. En total se han modelizado 159 hidrantes y a mayores otras 15 leyes de caudal para simular otros ramales de la red de riego que no se han modelizado como tramos de conducción. En la mayoría de los casos la ley de caudal se corresponde con un único hidrante, pero hay casos en los que se han agrupado dos hidrantes en el mismo punto cuando estaban muy cercanos entre ellos, modelizándolos como una única ley de caudal en el que se suman las dotaciones de cada hidrante.

A modo de síntesis, la Figura nº 4 muestra el esquema del modelo completo del sistema que se ha creado en ALLIEVI. En el Apéndice nº 1 se muestra un resumen de los datos del modelo (líneas, nodos y leyes de caudal).

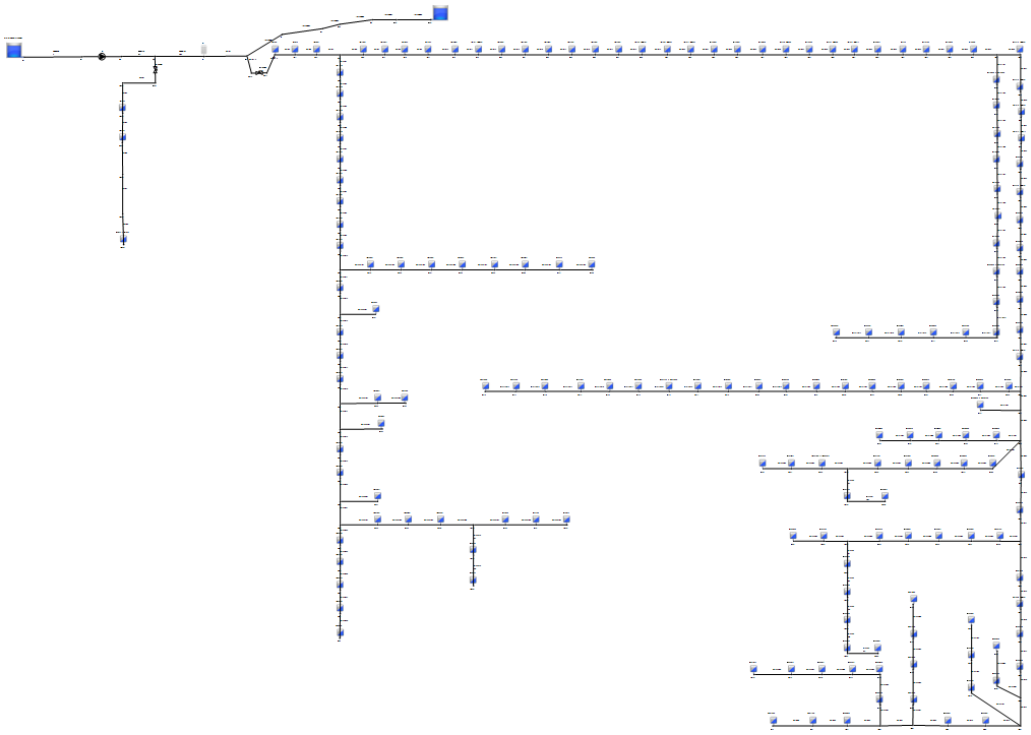

Figura nº 4. Esquema completo para simulación del sistema: toma + EB + impulsión + balsa + red de riego

6. ANÁLISIS DEL TRANSITORIO

Se evalúa mediante la magnitud del golpe de ariete que acontece por la parada brusca del conjunto de las 4 bombas por un fallo en el suministro eléctrico, en el caso que se esté operando en las condiciones de diseño.

Para realizar el análisis transitorio de un sistema hidráulico hay que tener presente que el régimen transitorio se inicia a partir del régimen permanente cuando se produce una maniobra en alguno de los elementos del sistema (en nuestro caso parada brusca de todas las bombas), por lo tanto es necesario calcular el régimen permanente por dos razones principales: validar que el modelo elaborado de la instalación con el programa de cálculo presenta el grado de detalle suficiente; y como paso previo al cálculo del régimen transitorio.

En este apartado se analiza el régimen permanente y transitorio del sistema considerando varias hipótesis de partida:

- Llenado de balsa desde la EB con dos condiciones de posición de la lámina libre de agua en la balsa: cuando se sitúa a la cota del NMN (1.105 m.s.n.m) y cuando se encuentra a nivel mínimo (1.098 m.s.n.m.), verificando que los caudales deben ser distintos (mayor caudal cuando se bombea a balsa con nivel mínimo).
- No existe conexión con la red de riego (se aísla la impulsión de los ramales T-1 y T-2 mediante el cierre de las válvulas de seccionamiento).
- Sí existe conexión con la red de riego con hidrantes cerrados, por lo que todo el caudal bombeado se transporta íntegramente a la balsa, sin que se derive agua por algún ramal de la red de riego asociada.
- Sí existe conexión con la red de riego con hidrantes abiertos, por lo que el caudal bombeado se reparte entre la balsa y la red.

6.1. RÉGIMEN PERMANENTE

En el programa ALLIEVI, el régimen permanente se obtiene procesando un transitorio a partir de unas condiciones de funcionamientos cualesquiera, con los elementos del sistema que introducen la perturbación en su posición inicial y sin efectuar maniobras. Cuando en este cálculo se obtiene unas condiciones de funcionamiento que no varían con el tiempo (variaciones insignificantes de caudal y de altura piezométrica en todo el sistema), estas condiciones se adoptan como valores de partida para iniciar el cálculo del régimen transitorio.

Realizado el cálculo del régimen permanente, se visualiza los resultados en formato de tablas de cada uno de los elementos del proyecto. De esta manera, cuando se bombea a balsa vacía (cota 1.098 m.s.n.m.) ya sea simulando sin o con conexión a la red

de riego sin consumo en los hidrantes, en ambas situaciones el caudal de llenado es de 2.350 l/s, siendo la velocidad en la conducción de impulsión de 1,52 m/s. Cada bomba está suministrando un caudal unitario de 587 l/s a una altura de 75,2 mca con una potencia demandada de 516 kW por bomba.

A balsa llena (cota 1.105 m.s.n.m) el caudal de bombeo es de 2.099 l/s, siendo la velocidad en la conducción de impulsión de 1,36 m/s. Cada bomba está suministrando un caudal unitario de 525 l/s a una altura de 82,0 mca con una potencia demandada de 510 kW por bomba.

El estudio en régimen permanente en la condición de servicio valida que el sistema sea representativo del funcionamiento de la instalación en su punto de diseño cuando se está bombeando desde la arqueta del filtro hasta la balsa elevada, por lo que una vez validado el modelo se procederá al cálculo del régimen transitorio.

6.2. RÉGIMEN TRANSITORIO SIN ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

Para el cálculo del régimen transitorio se estudiarán dos escenarios, uno sin dispositivos de protección y el otro con dispositivos de protección, si fueran necesarios. El objetivo en el primer escenario es evaluar la magnitud del golpe de ariete que se produce por la parada de los grupos de elevación y establecer los requerimientos mínimos iniciales para dimensionar correctamente el sistema de protección. En el segundo escenario se analiza y se valida el dimensionado del dispositivo antiariete teniendo presentes los condicionantes de diseño de la instalación.

Comportamiento bombeando a balsa sin y con conexión a la red de riego sin demanda

Se calcula el transitorio en el instante t = 5 s a partir del régimen permanente cuando se está bombeando el caudal de diseño hacia la balsa. Se realiza dos simulaciones: bombeo a balsa vacía sin y con conexión a la red de riego sin consumo en los hidrantes, por lo que en ambos casos todo el caudal bombeado se transporta a la balsa. Para cumplir con la condición de Courant-Friederics-Lewy se escoge un intervalo temporal Δt de 0,05 s.

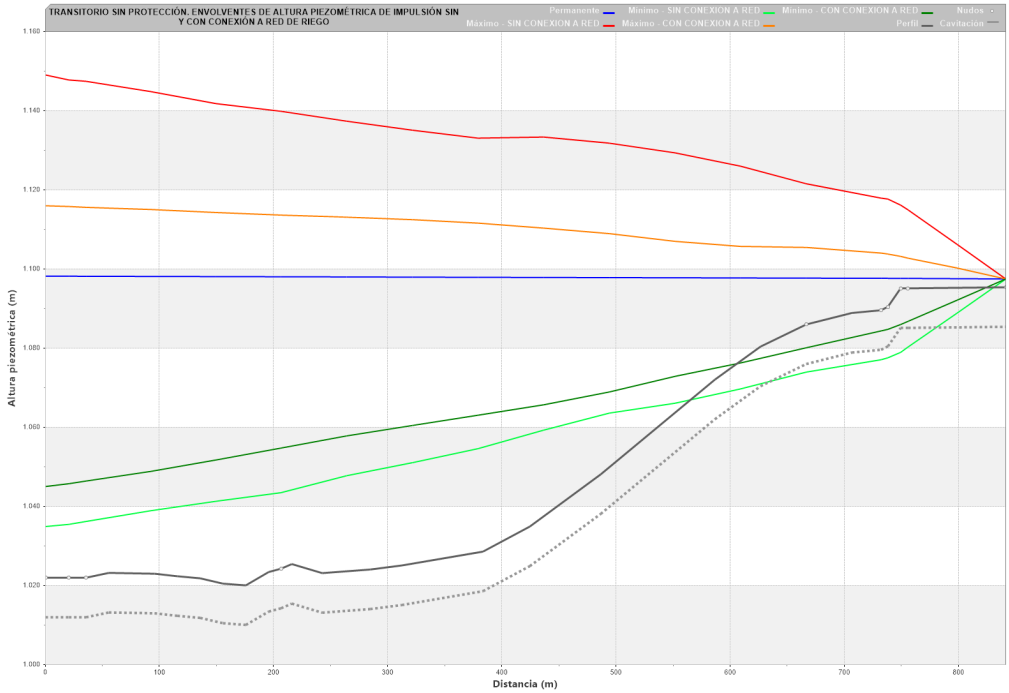

Figura nº 5. Transitorio impulsión sin y con conexión a la red de riego. Envolventes de alturas piezométricas

Realizado el transitorio, en la Figura nº 5 se indica el perfil de la conducción de la impulsión, y se representa para el caso de sin conexión a la red las envolventes de altura piezométrica máxima (línea roja) y mínima (línea verde) a lo largo de su traza, así como el régimen permanente (línea azul). Para la condición de conexión a la red, las envolventes de altura piezométrica máxima es la línea naranja y para la mínima la línea verde oscura, siendo coincidente la línea azul de régimen permanente en ambos casos.

Se observa que, en caso de bombeo a balsa vacía con parada de bombas sin elementos de protección, la fase depresiva se encuentra por debajo de la línea del eje de la tubería (línea gris) en la parte final de la impulsión (unos 305 ml de conducción), indicando que hay presiones negativas, y tramos incluso que se encuentran por debajo de la línea de cavitación (línea gris discontinua situada 10 m por debajo de la línea del perfil longitudinal del eje de la tubería), dando origen en esta zona a presiones menores que la tensión de vapor del agua (menor de -9,99 mca). Cuando está conectada la impulsión a la red de riego (sin que haya demanda en los hidrantes), la depresión es menor pero aun así existe un tramo de unos 200 ml que está con presiones negativas. Los valores de presión a lo largo del perfil de la conducción pueden consultarse en el Apéndice nº 2.

Las sobrepresiones son mayores en el caso de que la impulsión no esté conectada a la red, obteniendo un valor de 127 mca al inicio de la impulsión, y de 95 mca para el caso de que esté conectada a la red de riego (76,3 mca en régimen permanente). La mínima presión a la salida de las bombas es de 13,9 mca en caso de no conexión a la red de riego

y de 20,7 mca para cuando está conectada, por lo que no es necesario dimensionar un by-pass para aliviar el transitorio, ya que no se producen depresiones al inicio de la impulsión. La Figura nº 6 muestra la evolución de la presión a la salida de la bomba para ambos casos.

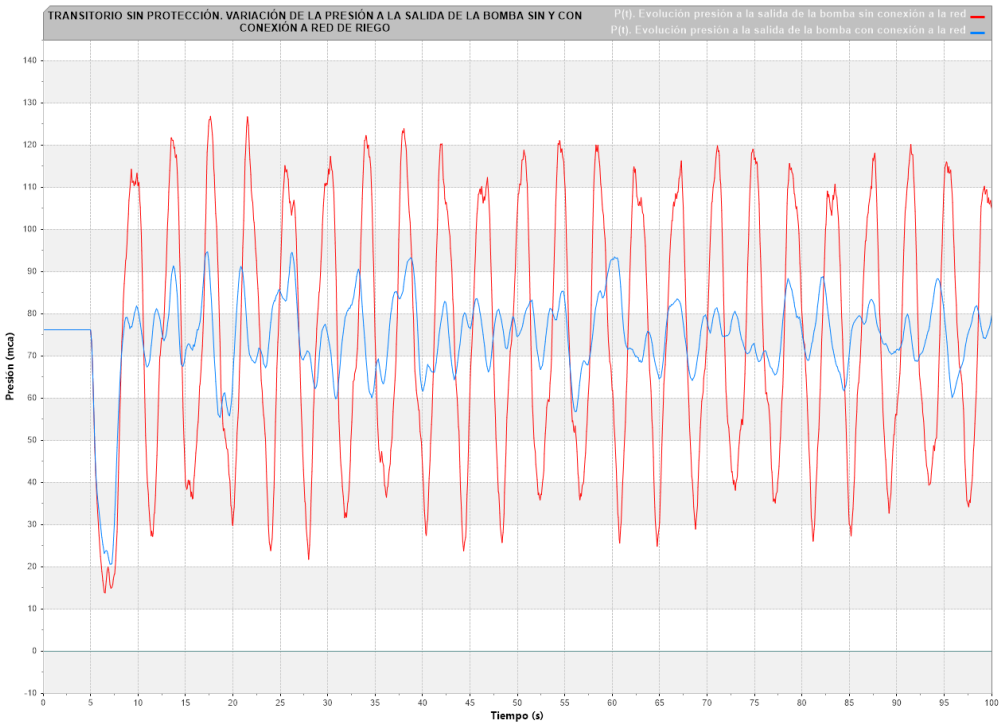

Figura nº 6. Evolución de la presión P(t) aguas abajo de las bombas. Simulación sin y con conexión a la red de riego

Los valores de la evolución de la presión durante el primer minuto del transitorio a la salida de la EB para las simulaciones sin o con conexión a la red sin protección pueden consultarse en el Apéndice nº 3.

Tal como se ha descrito en apartados anteriores, cualquier alteración del funcionamiento del sistema que genere una variación de caudal (dQ/dt), origina unas ondas de presión tanto mayores cuanto mayor y más rápida es la variación de caudal generada. Estas ondas de presión tienen su origen en el punto en que origina la perturbación y se propagan a lo largo de todas las conducciones que componen el sistema. De esta manera, cuando se simula la condición de bombeo con conexión a la red, el número de ondas que viajan por el sistema se multiplican por un factor igual al número de tuberías que confluyan en el nudo, por lo que las ondas se transmiten y rebotan (coeficientes de reflexión y transmisión de las ondas), existiendo una superposición de ondas en cada sección del sistema y para cada instante de tiempo, por lo que aumentará la complejidad y los tiempos de cálculo.

De esta manera, si bien en la condición de bombeo a balsa con conexión a la red sin consumo en los hidrantes hemos comprobado que el transitorio en el último tramo de

la impulsión es menor que cuando está desconectada de la red, los ramales conectados entran en sobrepresión y depresión por la transmisión de las ondas. Con ello, y a modo de ejemplo, se expone en la Figura nº 7 la envolvente de alturas piezométricas del ramal T-2, conducción que sale del colector general de impulsión, en la que se detecta sobrepresiones (máxima de 173 mca) y depresiones por debajo de cavitación (mínimo de -52,6 mca) en los últimos 300 ml.

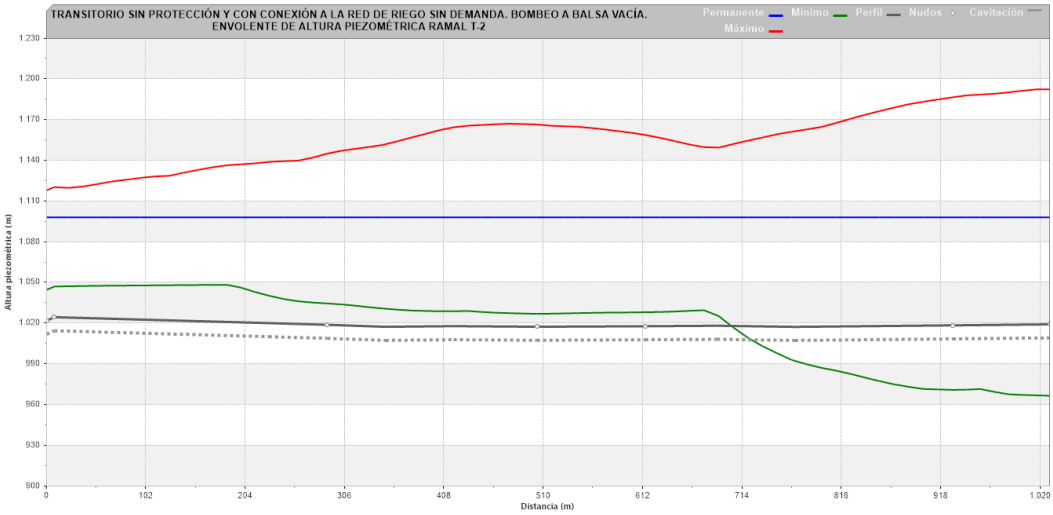

Figura nº 7. Transitorio con conexión a la red de riego sin demanda. Envolvente de alturas piezométrica ramal T-2

Los valores de la presión en el ramal T-2 para esta situación pueden consultarse en el Apéndice nº 4.

Como conclusión de este primer análisis, el transitorio y sus efectos van a presentarse tanto en la condición de que la red esté aislada de la impulsión como cuando está conectada, si no se protege la instalación. Además, en esta última situación los ramales presentan sobrepresión y depresión que podría colapsar el sistema.

Dado que la peor situación que acontece en la impulsión es bombeo sin conexión a la red, se resolverá el transitorio para esta condición (es decir, se diseñaran los elementos de protección para esta situación) y a continuación, se comprobará cómo se comporta todo el sistema (impulsión con red de riego conectada) con los elementos dimensionados en la etapa anterior, para validarlos o hacer las modificaciones que correspondan para la correcta protección de todo el sistema modelizado.

Comportamiento bombeando a balsa vacía y a balsa llena

Ya en la situación de bombeo a balsa estando la impulsión desconectada de la red de riego, se ha de verificar cómo es el transitorio cuando se bombea a balsa llena (cota 1.105 m.s.n.m.) y compararlo con el transitorio generado por el bombeo a balsa vacía, de cara a decidir qué escenario es el que genera mayor depresión/sobrepresión a efectos del cálculo de los elementos de protección. De esta manera, la Figura nº 8

muestra las envolventes de ambas situaciones.

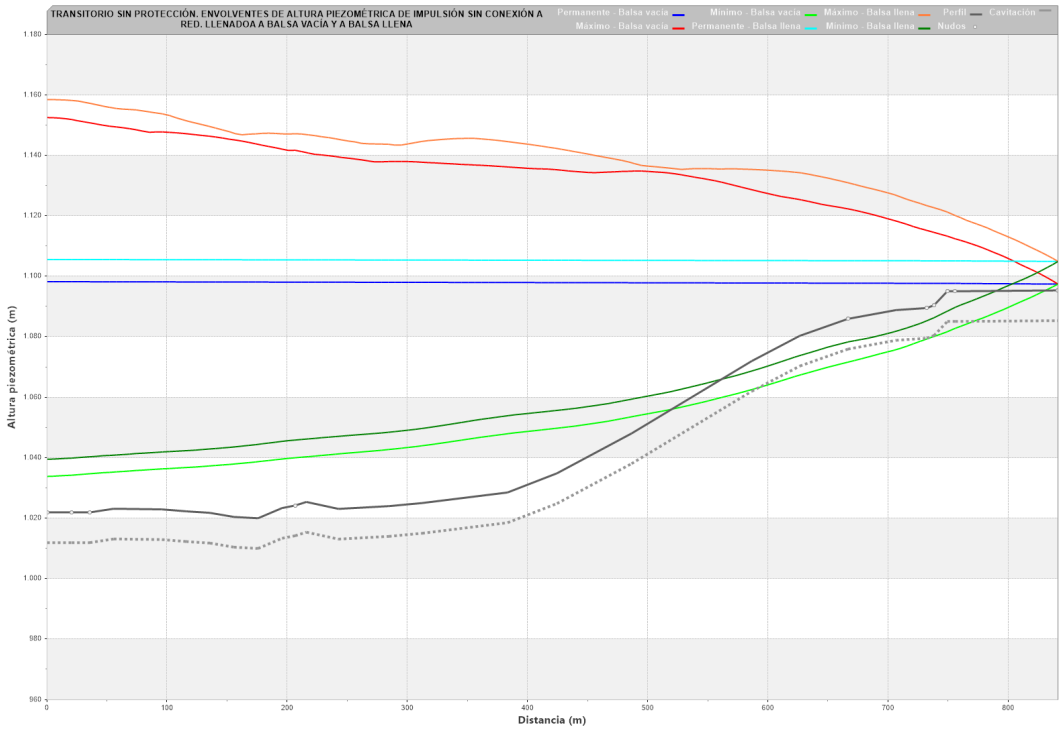

Figura nº 8. Transitorio impulsión sin red de riego. Envolventes de alturas piezométricas bombeando a balsa vacía *vs* llena

En este caso, bombeando a balsa llena se obtiene mayor sobrepresión (línea naranja) y una menor depresión sin llegar a la cavitación (línea verde oscura). Las líneas azules se corresponden con el régimen permanente para cada situación de llenado. Con ello, el régimen permanente a considerar para el inicio del transitorio para el diseño de los elementos de protección se tomará cuando se está bombeando a balsa vacía y sin conexión a la red de riego.

6.3. PROPUESTA DE ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

La expresión básica en el cálculo de sobrepresiones y/o depresiones (pulso de Joukowsky $\Delta H = \pm a \cdot \Delta V/g$) muestra con claridad como la causa que genera las variaciones de presión (dH/dt) no es otra que los cambios de velocidad en la conducción (implícitamente cambios de caudal). En consecuencia la principal vía de actuación para controlar los transitorios es tratar, cuando ello sea posible, de disminuir y ralentizar los cambios de velocidad/caudal, es decir, actuando sobre los valores de $|dV/dt|$ y $|dQ/dt|$, a fin de que sean menores.

Las estructuras de protección (principalmente calderines, chimeneas de equilibrio y tanques unidireccionales) se utilizan para reducir las oscilaciones de presión una vez se ha generado el transitorio tratando de actuar sobre el diferencial velocidad/caudal. En general, almacenan un determinado volumen de agua y funcionan aportando caudal a

la conducción principal a la que están conectados en el momento en que se reduce el caudal circulante. Posteriormente, al cambiar el sentido del caudal, éste se va introduciendo dentro de la estructura de protección con lo que su frenado es más lento (caso de calderines y chimeneas de equilibrio). De esta manera los cambios de caudal en la tubería principal se ralentizan, reduciéndose con ello las oscilaciones de presión.

En otros casos, como es el volante de inercia, el elemento de protección trata de aumentar la inercia del grupo elevador al objeto de ralentizar la parada brusca de bomba disminuyendo más lentamente su velocidad de giro, consiguiendo diferenciales |dQ/dt| más atenuados, y consecuentemente, provocando oscilaciones de presión más suaves.

Otros elementos habitualmente usados son las válvulas de alivio y las anticipadoras de onda que permiten mitigar con gran eficacia sobrepresiones, si bien nada pueden hacer para limitar las depresiones.

En definitiva, existen varias opciones de estructuras de protección a instalar para paliar los efectos del golpe de ariete, y la selección y diseño de los mismos debe hacerse para el escenario más desfavorable. Vista la necesidad de proteger las instalaciones proyectadas frente al efecto de los transitorios, se ha realizado inicialmente multitud de simulaciones de elementos de protección solos o en combinación de varios de ellos en distintos puntos de la traza de la impulsión, acorde a conseguir paliar los efectos depresivos de la instalación que se producen en el último tramo de la impulsión (véase apartado nº 6.2), descartando la mayoría de ellas por ineficacia, dimensiones excesivas, alto número de elementos, falta de disipación del transitorio de forma completa, etc.

Con ello, se opta como mejores opciones estudiar la instalación de un único elemento o la combinación de dos estructuras de protección, pudiendo ser la combinación de calderín y chimenea de equilibrio, o calderín y tanque unidireccional. En ambas opciones, el calderín tendría las mismas características (dimensiones, volumen, by-pass) y se ubicaría a la salida de la EB, tras el caudalímetro general; y la chimenea o el tanque unidireccional que se instalaría en el pk 0+531 de la impulsión, unos metros antes de que la conducción entre en la caseta de válvulas de la balsa. En los epígrafes siguientes se estudia los tres dispositivos de protección analizando su funcionamiento y las principales ventajas y desventajas que presentan, de cara a orientar su elección definitiva.

6.3.1. ESTUDIO DE CALDERÍN

El calderín hidroneumático protege la instalación tanto contra sobrepresiones como contra depresiones. En síntesis, el funcionamiento de un calderín acontece tras la parada de las bombas al disminuir la presión de impulsión por disminución de la velocidad de rotación del rodete. Inmediatamente después del fallo del suministro eléctrico, el calderín se convierte en una fuente de energía que tiende a mantener el

movimiento del fluido en la conducción. En este punto, el gas del interior del calderín impulsa el agua almacenada en su interior, 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 caudal en la tubería se reduce de una forma controlada y mucho más lenta de lo que ocurriría sin la presencia del calderín (Figura nº 9).

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.

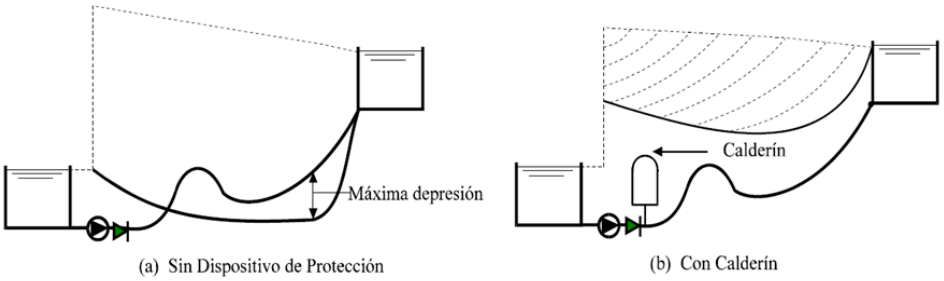

Figura nº 9. Efecto de la instalación de un calderín sobre las líneas de alturas piezométricas máximas y mínimas

A fin de controlar adecuadamente el sistema frente a las paradas de la bomba, la localización ideal del calderín es inmediatamente aguas abajo de la estación de bombeo y tan cerca de ésta como sea posible. Esta instalación próxima a la estación de bombeo facilita la alimentación del mismo en el caso de necesitar de un compresor de aire comprimido, así como reduce los gastos de mantenimiento del mismo, respecto de la situación en que el calderín estuviese alejado de la estación de bombeo.

El caudal de entrada y de salida del agua en el calderín se puede controlar mediante toberas, placas orificios o estrangulamientos. Normalmente, el caudal de salida debe ser sin restricción, y la conexión con la tubería principal debe hacerse evitando al máximo las pérdidas. Por el contrario, para el flujo de retorno la utilización de cualquier tipo de estrangulamiento resulta beneficiosa para evitar que las presiones máximas generadas suban mucho. La estrangulación del flujo de entrada en el calderín resulta imprescindible si se quiere evitar el tener que recurrir a tamaños de calderín excesivamente grandes.

En la práctica la inclusión de una pérdida diferente para el flujo de salida y de entrada se obtiene mediante una válvula de retención conectada en la línea que une la tubería principal con el calderín. Esta válvula de retención lleva instalado un by-pass que

normalmente es de un diámetro mucho menor que el de la tubería, y que contiene un elemento que produce pérdidas de carga (p. ej. una válvula de seccionamiento estrangulada, una tobera o una placa orificio).

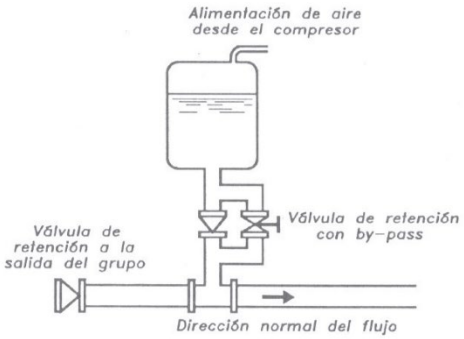

Figura nº 10. Esquema de conexión de un calderín a la salida de un grupo impulsor

En nuestro caso se opta por una placa orificio. La determinación del coeficiente óptimo de pérdidas para el flujo de entrada y de salida se basa en un proceso de prueba y error con la ayuda de un modelo numérico de análisis, por lo que se realiza varias simulaciones para escoger el valor adecuado.

Dimensionamiento del calderín

Si bien el dimensionamiento del calderín se realiza con ábacos y tablas, elaboradas a partir del método de Parkmanian u otras modelizaciones del fenómeno, con ALLIEVI se modeliza una propuesta de calderín que es validado con los resultados de la simulación.

Como hemos comentado, los elementos a disponer en el ramal de unión entre la tubería principal y la estructura de protección deberán presentar en su conjunto un coeficiente de pérdidas bajo para el flujo de salida de la estructura, y un coeficiente de pérdidas alto para el flujo de entrada. De esta manera se facilita el flujo de salida desde el calderín hacia la tubería de impulsión, con lo que se reducen las depresiones en esta última tubería y se evitan con ello presiones negativas en el sistema hidráulico. Además, en el flujo de entrada desde la tubería principal hacia la estructura de protección se crean pérdidas importantes en el ramal de unión, las cuales van disipando la energía del agua y frenando el desarrollo del transitorio.

Tras diversos tanteos, se propone un calderín en posición vertical de 15 m^3 de volumen (diámetro 2,15 m y altura 4,2 m) sin vejiga. El entronque con la tubería principal se realiza con una tubería DN 600 mm con conexión diferencial mediante una válvula de retención del mismo diámetro y un by-pass en tubería de acero DN 250 mm con una placa orificio DN 200 mm y una presión de hinchado al inicio de 29,5 mca con un volumen inicial del gas de 7 m^3. El calderín se situará en el exterior de la edificación de la EB, anexado a ésta, siendo la cota de la base del mismo situada a la 1.026,3 m.s.n.m.

El cálculo de las pérdidas de carga en la salida (Ks) y en la entrada (Ke) cuyas unidades son mca/$(m^3/s)^2$ se realiza con ayuda del asistente del programa (Figura nº 11).

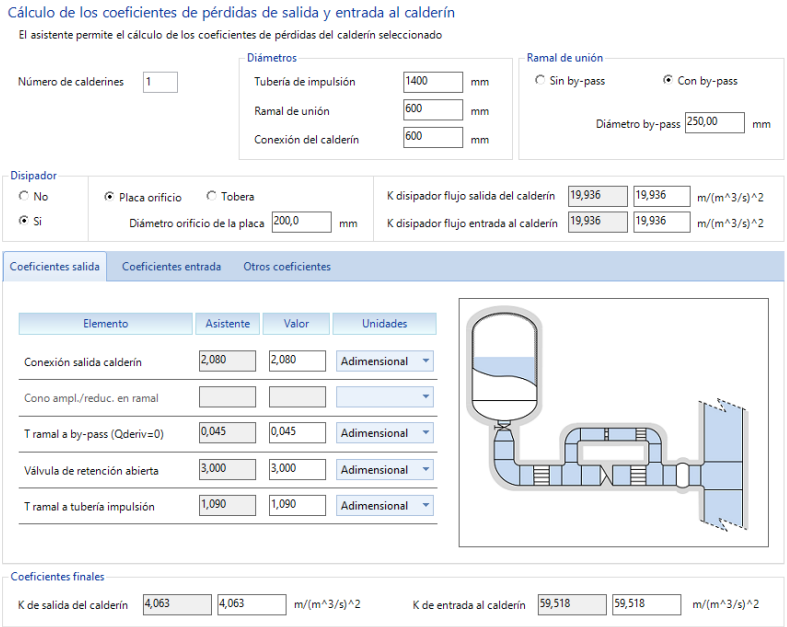

Figura nº 11. Asistente de coeficientes de pérdidas Ke y Ks para el calderín

El calderín propuesto, si bien reduce la onda de depresión inicial, no la suprime por completo (Figura nº 12), incluso con otra nueva unidad, alcanzando una zona de 57 ml de tubería en depresión con valores de hasta -2,8 mca.

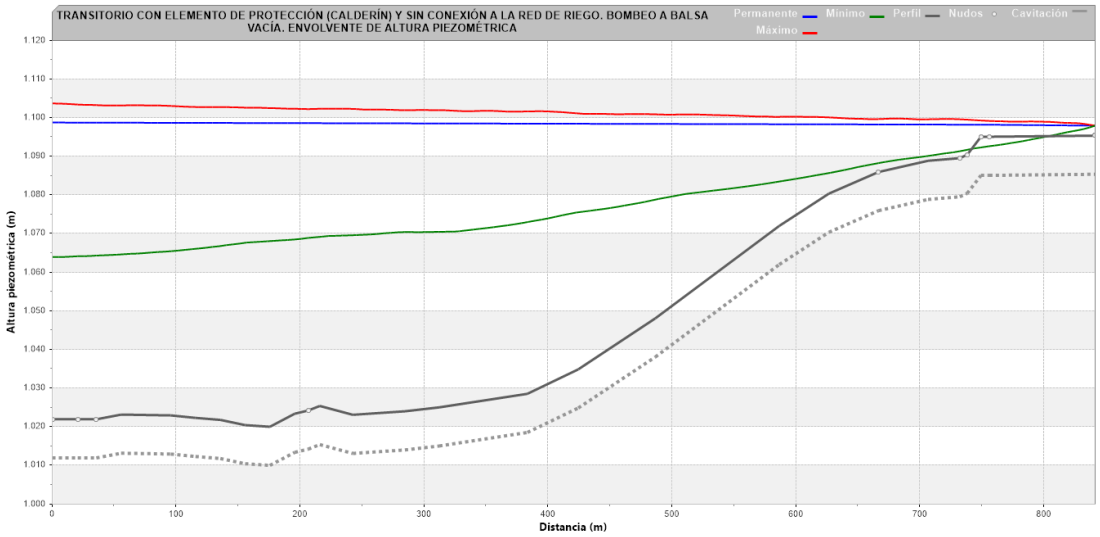

Figura nº 12. Transitorio impulsión sin red de riego. Envolvente de alturas piezométrica bombeando a balsa vacía con calderín

6.3.2. ESTUDIO DE CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Las chimeneas de equilibrio son depósitos abiertos a la atmósfera por su parte superior, de suficiente sección recta y conectada directamente a la tubería, que se sitúan a lo largo de la conducción para "partir" la misma, de manera que limitan las variaciones de presión en una impulsión entre el punto en el que están ubicadas y el depósito final.

Inyectará agua en la fase depresiva, por lo que el punto de conexión entre la chimenea y conducción debe de tener pocas pérdidas de carga, y acumulará agua cuando la onda de sobrepresión retorne desde el depósito final en el que se ha reflejado. Su principio de funcionamiento es, pues, ceder o admitir caudal, en función de la etapa del transitorio, al objeto de aumentar la inercia del sistema alargando en el tiempo las fases depresivas o sobrepresivas y laminar de este modo los picos de presión.

El principal problema que presentan es que solo pueden ubicarse en puntos elevados del perfil, si estos existen, dado que su cota máxima debe ser superior a la que marca la máxima línea de altura piezométrica régimen permanente o estática según el caso, tal como se aprecia en la Figura nº 13. Con una altura suficiente, la chimenea protege el tramo situado entre ella y el depósito final, evitando de este modo las depresiones que puedan producirse a partir del lugar en el que está ubicada. No protegerá de manera directa el tramo comprendido entre la estación de bombeo y la chimenea, si bien al "acortar" la impulsión, en general las sobrepresiones serán menores.

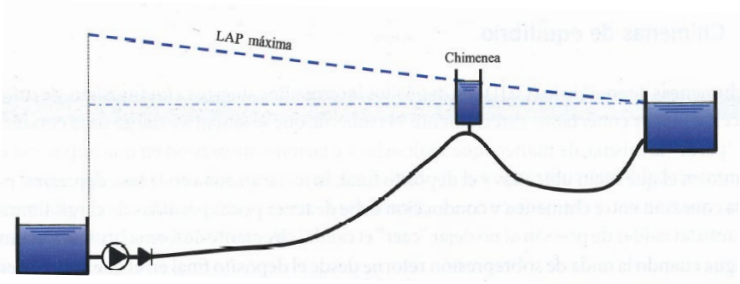

Figura nº 13. Instalación protegida con una chimenea de equilibrio

La particularidad de este elemento de protección es la necesidad de dotarle de una altura suficiente para que el agua no desborde, como es el caso que refleja la Figura nº 13, en donde la reserva de agua de su interior, en condiciones de régimen debe alcanzar el mismo nivel que la altura piezométrica en el punto de conexión con el sistema, lo que obliga en muchos casos a alturas de chimenea excesivamente grandes. Además se debe tener la precaución de dar a la chimenea una altura suficiente para que no rebose por su parte superior durante el proceso de arranque de la instalación.

Por otro lado, cabe decir que la sección recta de la misma deberá ser suficiente para evitar excesivas oscilaciones que darían lugar a depresiones en el sistema y, en algunos casos, el vaciado total de la chimenea.

Dimensionamiento de la chimenea

Tras diversos tanteos, se propone una chimenea de diámetro 2,5 m, tubería de conexión de DN 1.400 mm y longitud de 10 m, cuya base se apoyaría sobre la cota 1.092,3 m.s.n.m. (la cota del terreno natural es la 1.092,6 m.s.n.m). El cálculo de las pérdidas de carga provocadas por la conexión (codo, entronque entre tubería y chimenea) se realiza con ayuda del asistente del programa (Figura nº 14).

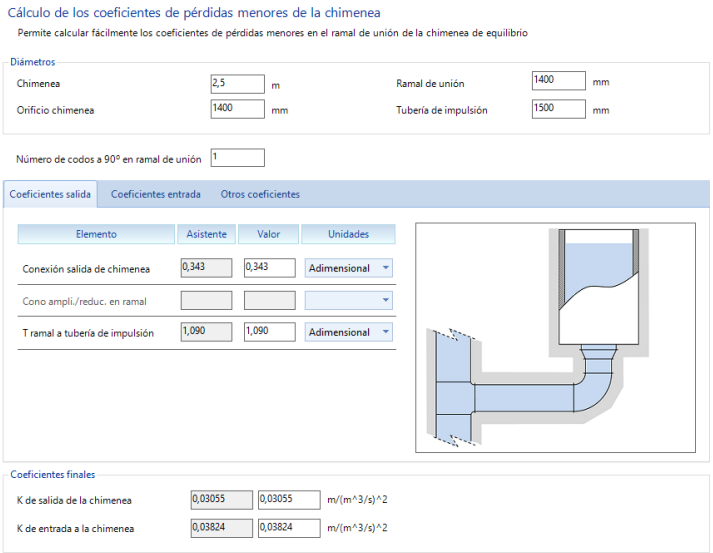

Figura nº 14. Asistente de coeficientes de pérdidas para la chimenea

Con respecto a la altura que tiene que tener, se estudiará la hipótesis de bombeo a balsa llena, ya que en esta condición se produce mayor sobrepresión (véase Figura nº 8), por lo que será necesario mayor altura.

Con ello, la simulación del transitorio para la condición de llenado a balsa vacía con la instalación de la chimenea, muestra una línea piezométrica máxima mayor que la del régimen permanente hasta alcanzar una sobrepresión de 125,5 mca a la salida de la EB y una piezométrica de mínimas con zonas depresivas en varios tramos del final de la impulsión que alcanza un valor de depresión de -2,1 mca (Figura nº 15).

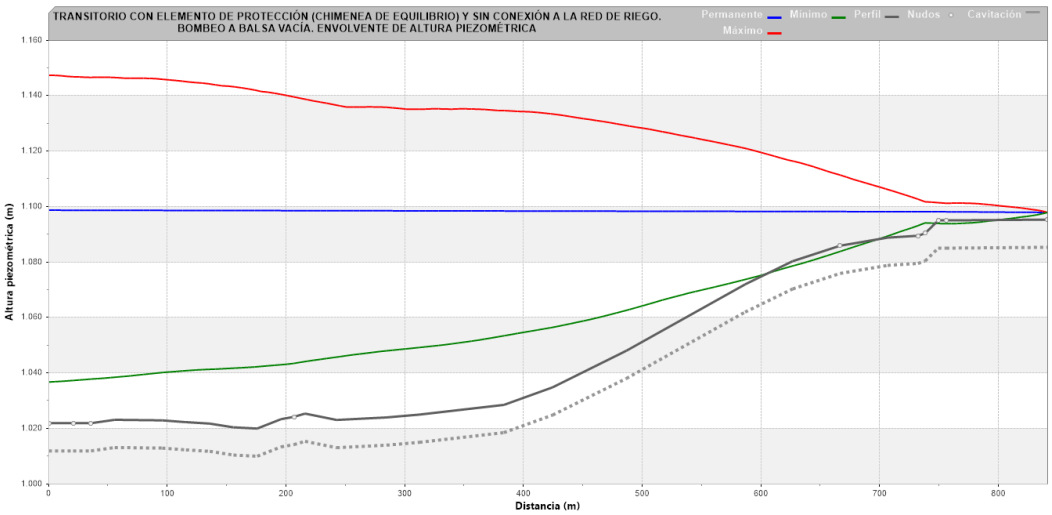

Figura nº 15. Transitorio impulsión sin red de riego. Envolvente de alturas piezométrica bombeando a balsa vacía con chimenea de equilibrio

Para conocer la altura de la chimenea, nuevamente se realiza una simulación con bombeo a balsa llena. En la Figura nº 16 se muestra la variación del nivel del agua dentro de la chimenea, alcanzado un máximo de 14,4 m, por lo que la chimenea debería de tener una altura de al menos 15 m, como propuesta inicial.

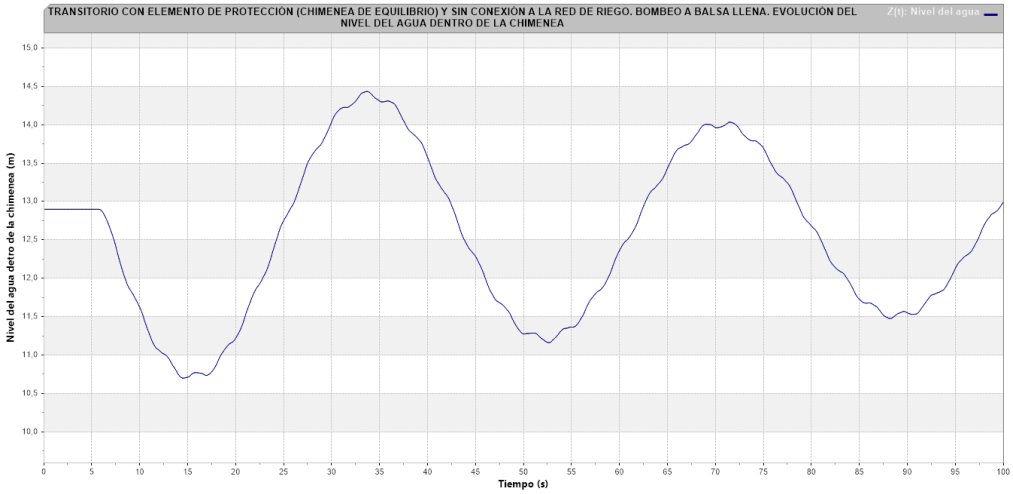

Figura nº 16. Transitorio impulsión sin red de riego. Evolución nivel del agua dentro de la chimenea bombeando a balsa llena

Como conclusión, la chimenea, si bien reduce la onda de depresión inicial, no la suprime por completo, además de que únicamente protege de la sobrepresión aguas abajo del punto de ubicación de la chimenea, por lo que hay presiones mayores a la presión nominal de la tubería en los tramos iniciales de la impulsión, a la salida de la EB.

6.3.3. ESTUDIO DE TANQUE UNIDIRECCIONAL

El tanque unidireccional es un depósito de agua abierto a la atmósfera semejante

constructivamente a la chimenea de equilibrio, si bien a diferencia de ésta, lleva una válvula de retención (VR) instalada en el entronque de conexión con la tubería principal que impide el flujo desde la tubería hacia el tanque. Ello trae como consecuencia que su función sea ligeramente distinta, al tiempo que el nivel libre del agua en el tanque puede estar por debajo de la línea de alturas piezométricas en régimen permanente, por lo que puede ubicarse en cualquier punto del perfil sin necesidad de que su altura sea al menos la que marca la línea de altura piezométrica en régimen permanente en el punto en el que está ubicado, ya que la válvula de retención impide el flujo de entrada de agua al tanque evitando así su desbordamiento, por lo que son dispositivos de poca altura con todas las ventajas constructivas que ello comporta.

La misión del tanque es la de evitar la cavitación en puntos altos relativos de tuberías con perfiles sinuosos donde las oscilaciones de presión en régimen transitorio produzcan presiones mínimas por debajo de la presión atmosférica, aportando agua a la conducción cuando la altura piezométrica en el punto de entronque de la tubería con el tanque baja hasta el nivel de la superficie libre de agua en el mismo.

Durante el régimen transitorio, si en la fase depresiva la altura piezométrica del punto de entronque alcanza valores por debajo de la cota del agua en el tanque, la VR abre y permite el paso del agua desde el tanque hacia la tubería. Con ello, se evita que la altura piezométrica siga bajando en el punto de entronque, evitando también en general la aparición de presiones negativas en esta parte de la tubería. Posteriormente, en la fase sobrepresiva, cuando la altura piezométrica del punto de entronque alcance valores por encima del nivel del agua en el tanque, la válvula de retención cerrará desconectando el tanque de la tubería.

La situación final de la envolvente de alturas piezométricas mínimas una vez que la primera onda depresiva originada por la parada de la bomba llega al depósito de impulsión es la que se recoge en la Figura nº 17. En dicho esquema puede verse el efecto comparativo de la acción de dicha onda en un caso en el que no existe tanque unidireccional y en un caso en que éste si está presente.

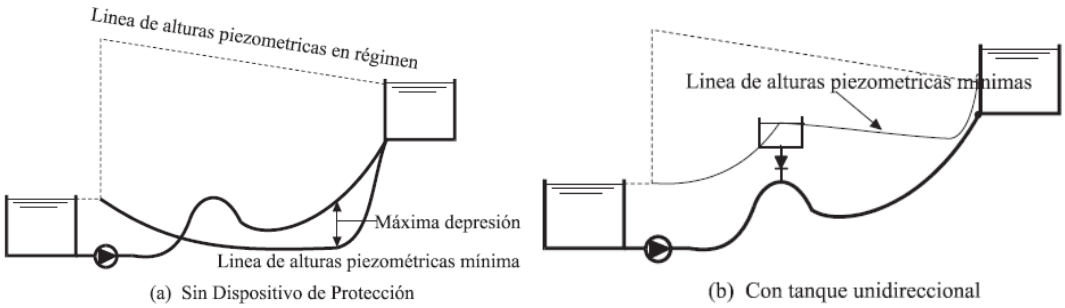

Figura nº 17. Efecto de instalación de un tanque unidireccional sobre la línea de alturas piezométricas mínima

En definitiva, los tanques unidireccionales ayudan a proteger la instalación evitando la aparición de presiones negativas en la zona donde se encuentran conectados, aunque

no intervienen directamente en la protección frente a las sobrepresiones.

El comportamiento del tanque tal y como se ha descrito hasta ahora es en la hipótesis de que éste no se vacía durante el transitorio y que el nivel de agua en el mismo desciende hasta un nivel. Para reponer el volumen de agua evacuada a la conducción tras un transitorio, es necesario prever un sistema de llenado del tanque (Figura nº 18). Esto puede hacerse desde la propia conducción, mediante una válvula de flotador que llenará el tanque con la presión estática de la tubería, la de régimen permanente o durante el transitorio. Al salir agua del tanque el nivel del agua en su interior bajará y el flotador abrirá la válvula para su llenado. El llenado finaliza por acción del flotador, cuando el nivel del agua en el tanque alcance un valor máximo prefijado.

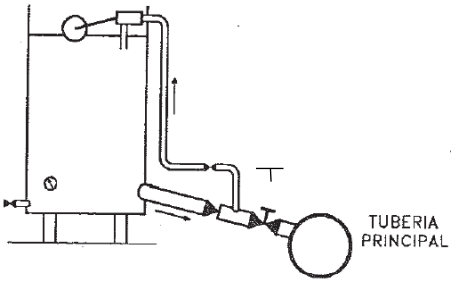

Figura nº 18. Dispositivo de llenado de un tanque unidireccional

Dimensionamiento del tanque unidireccional

Tras diversos tanteos, el tanque unidireccional propuesto debe tener un volumen de 20 m^3 (diámetro de 2,45 m y altura 4,99 m), estando situado la solera en la cota 1.094 m.s.n.m., por lo que se realizaría una estructura de sujeción para elevarlo con respecto a la cota del terreno natural que hay en el punto en donde va ubicado el tanque (cota 1.092,6 m.s.n.m.).

Se diseña la conexión entre el tanque y la tubería de impulsión con una conducción de diámetro 1.000 mm y 10 metros de longitud, intercalando la VR DN 1.000 mm, un carrete de desmontaje, una válvula de mariposa de seguridad, y un by-pass para llenar el tanque mediante una válvula hidráulica de nivel con flotador. Para el tanque puede servir algún modelo de depósito prefabricado (plástico, resinas de PRFV, metálico, hormigón…) y debe de encontrarse abierto a la atmósfera por la parte superior.

La VR debe abrir con la mínima diferencia de presiones posible, a fin de aumentar la eficacia del dispositivo, y hacerlo rápidamente, lo que condicionará su elección. En cuanto a las pérdidas de carga provocadas por los elementos instalados (VR, válvula de seccionamiento, codo, entronque entre tubería y tanque), el cálculo se realiza con ayuda del asistente del programa (Figura nº 19).

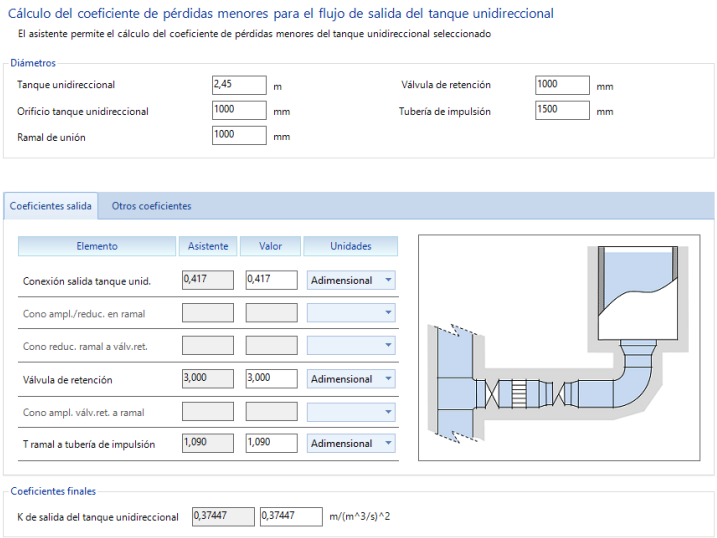

Figura nº 19. Asistente de coeficientes de pérdidas para el tanque unidireccional

El tanque propuesto si bien reduce la onda de depresión inicial, no la suprime por completo (Figura nº 20), alcanzando varias zonas de la tubería en depresión con valores de hasta -3,4 mca, además de que la sobrepresión alcanza valores de hasta 120 mca.

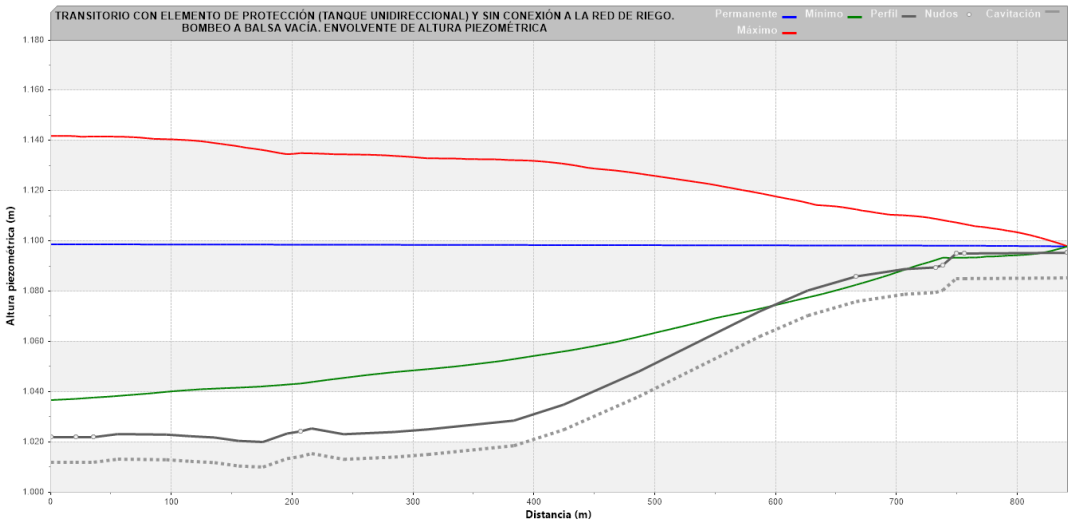

Figura nº 20. Transitorio impulsión sin red de riego. Envolvente de alturas piezométrica bombeando a balsa vacía con tanque unidireccional

6.4. ELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN

Una vez expuestos los distintos elementos de protección, se ha realizado la simulación de dos escenarios más: protección de la instalación con la combinación del calderín con chimenea, y combinación de calderín con tanque. En ambos casos, se consigue paliar todo el efecto de las depresiones que no consigue atenuar un único elemento de protección, siendo muy parecidas el resultado de las piezométricas. Así, en

la Figura nº 21 se muestra la envolvente de piezométricas tras el transitorio en la combinación de calderín y chimenea, muy similar a las líneas del calderín y tanque.

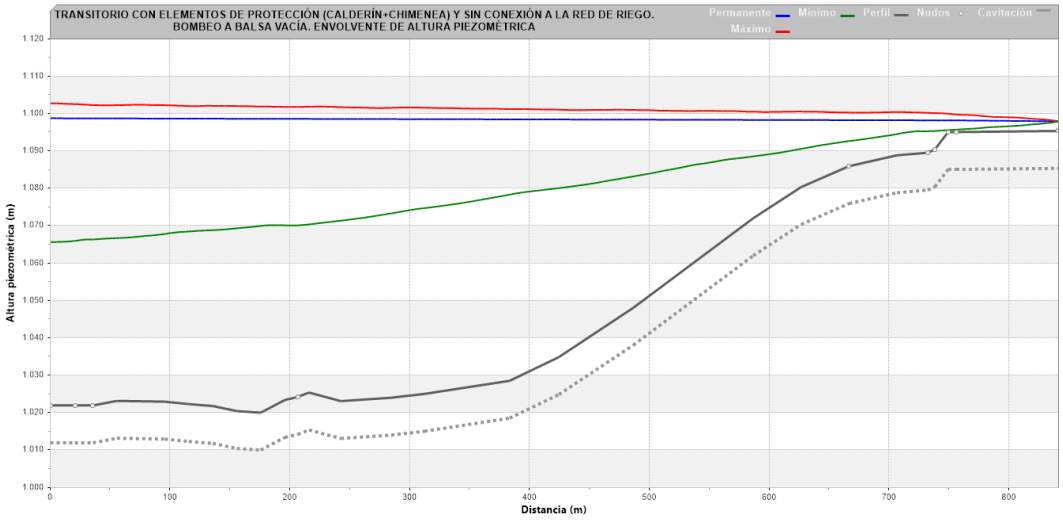

Figura nº 21. Transitorio impulsión sin red de riego. Envolvente de altura piezométrica bombeando a balsa vacía con calderín + chimenea

Se comprueba que la línea de mínimos está por encima del eje de la tubería, por lo que toda la tubería está con presiones positivas. En vista de los resultados de las dos combinaciones (calderín+chimenea o calderín+tanque) en la que la mejora del nivel de presiones es mínima, se opta por instalar un único elemento, ya que el nivel de presiones negativas cuando solamente actúa un único elemento de protección no es muy bajo (nunca menor de -3,4 mca), por lo que se deberá seleccionar un espesor suficiente para la conducción de acero que justifique su resistencia a presiones negativas.

A continuación se realiza el análisis de la presión máxima negativa que tiene lugar durante el transitorio para la peor condición. Según los cálculos realizados con ALLIEVI, existe una presión negativa de -3,4 mca como consecuencia de la primera onda de depresión cuando se instala el tanque unidireccional. Ante la posibilidad de pandeo o colapso del tubo por acción de presiones negativas internas se calcula el espesor mínimo que debería tener el tubo aplicando la fórmula de Levy (AWWA M11):

$$e\,(\text{mm}) \geq \sqrt[3]{\frac{P_v\,(\text{MPa}) \cdot Dm\,(\text{mm})^3 \cdot \left(1-\upsilon^2\right)}{E\,(\text{MPa})}}$$

siendo *e* el espesor mínimo de la tubería, P_v la depresión de diseño debido al golpe de ariete de diseño en valor absoluto (P_{atm} + $P_{golpe\ arite}$), D_m el diámetro medio de la tubería, E el módulo de elasticidad del acero y υ el coeficiente de Poisson del acero. Sustituyendo los valores en la expresión anterior obtenemos el espesor mínimo:

$$e\ (\mathrm{mm}) \geq \sqrt[3]{\frac{P_v\ (MPa) \cdot Dm\ (mm)^3 \cdot (1 - v^2)}{E\ (MPa)}} = \sqrt[3]{\frac{0{,}06798 \cdot 1.514^3 \cdot (1 - 0{,}3^2)}{2{,}1 \cdot 10^5}} = 10{,}07\ \mathrm{mm}$$

Hay que indicar que la fórmula anterior incluye un coeficiente de seguridad de 2 para superar el criterio de pandeo, por lo que el espesor mínimo sin este coeficiente de seguridad sería de 10,07 mm/2 = 5,037 mm. Con ello, se escogería un espesor de 10 mm para la tubería de acero en los tramos últimos de la impulsión.

Por lo tanto, descartada el uso de la combinación de dos elementos de protección, queda analizar las ventajas e inconvenientes de instalar cada estructura de protección de forma individual para finalmente seleccionar la que mejor se adapte a la instalación a proyectar.

Ventajas e inconvenientes del calderín

Después de analizar la utilización que se puede dar al calderín se pueden constatar algunas de las ventajas más sobresalientes que ofrece éste como dispositivo de control primario, aunque también ofrece una serie de desventajas:

Ventajas

- Sistema que puede compensar tanto las sobrepresiones como las depresiones.
- La independencia de instalación del calderín, hace que éste pueda instalarse en la mayoría de las ocasiones próximo a la estación de bombeo, dado que su ubicación no depende del nivel inicial de agua en el mismo. Esta instalación próxima a la EB facilita la alimentación del mismo en el caso de necesitar de un compresor de aire comprimido, así como reduce en muchas ocasiones los gastos de mantenimiento del mismo, respecto de la situación en que el calderín estuviese alejado de la EB.
- El calderín controla casi totalmente las ondas depresivas y sobrepresivas que se producen tras la parada del grupo motor-bomba.

Inconvenientes

- El calderín, si bien reduce la onda de depresión inicial, no la suprime por completo, por lo que en ocasiones puede ser necesario instalar aguas abajo del calderín otros dispositivos de control secundarios.
- Si bien la instalación de un calderín puede tener un coste similar al de una chimenea o un tanque, donde el calderín se encuentra en clara desventaja es en los gastos de mantenimiento que origina. Este gasto de mantenimiento se manifiesta en el compresor que es necesario para mantener el volumen de aire necesario; en las válvulas de retención y regulación que se instalan en el estrangulamiento del calderín, y en general en toda la instalación complementaria que acompaña al

mismo.

- Cierre más brusco de la válvula de retención que acompaña a la bomba si está cerca, por lo que habrá que estudiar la tipología de válvula a colocar para que cierre en el momento en que el caudal se anule (Q = 0) para evitar flujo inverso y sobrepresión por cierre en el momento en que el flujo en sentido inverso tenga una velocidad elevada.

Ventajas e inconvenientes que presenta una chimenea de equilibrio

La chimenea de equilibrio es un elemento de protección que aparentemente presenta unas ventajas notables, pero cuyas desventajas pueden ser asimismo importantes. Es más, si no se tienen en cuenta los efectos secundarios que pueden generarse en la conducción por la instalación de una chimenea de equilibrio pueden llegar a generarse sobrepresiones incluso mayores que las que tendría sin su concurso.

Ventajas

- Elemento de protección adecuado para controlar depresiones y en menor grado sobrepresiones.
- Dispositivo estático sencillo sin partes móviles. Simplicidad y seguridad de su funcionamiento, unida al hecho de que no requiere mantenimiento mecánico alguno.
- No necesita de mecanismo adicional alguno para llenar y reponer el volumen de agua aportado durante el transitorio.

Inconvenientes

- La altura máxima de la chimenea (cota de coronamiento de la misma) debe ser superior a la altura piezométrica para el caudal máximo en el punto en que se instale.
- La cota del entronque de la chimenea con la conducción debe ser inferior a la altura piezométrica para caudal nulo, a fin de evitar que se vacíe de agua durante los períodos de tiempo en que la instalación esté parada.
- Estas limitaciones condicionan en gran medida la geometría final que debe tener la chimenea así como la obra civil que en muchos casos es necesario realizar para su instalación (alturas de chimenea excesivamente grandes).
- El flujo se invierte con mucha rapidez aguas arriba de la chimenea (hacia la EB), por lo que se generan fuertes sobrepresiones en la válvula de retención al adelantar el cierre brusco de la misma, incluso superiores a las que se generan sin la presencia de la chimenea.

Ventajas e inconvenientes de los tanques unidireccionales

En base al principio de funcionamiento descrito de forma intuitiva en los apartados anteriores, se pueden comentar algunas de las ventajas e inconvenientes que presenta la instalación de tanques unidireccionales.

Ventajas

- Flexibilidad en la ubicación al no ser necesaria una altura elevada (del orden de pocos metros) en comparación con las chimeneas de equilibrio (del orden de decenas de metros) en el mismo punto de conexión. Adecuado para perfiles topográficos irregulares con puntos altos intermedios, que requerirían de grandes chimeneas de equilibrio para su protección.
- La reflexión parcial de la onda de depresión que incide sobre el tanque origina en la conducción, aguas arriba, sobrepresiones inferiores a las que originaría una chimenea de equilibrio.
- Frente a las ventosas, al introducir agua en el sistema y no aire, se evita los problemas derivados del movimiento de las bolsas de aire en el sistema y la necesidad de extraer éste.

Inconvenientes

- Transmiten parcialmente las ondas de depresión que inciden sobre el tanque aguas abajo del mismo, por lo que en ocasiones será necesario colocar otros dispositivos de protección adicionales.
- Exigen de un mantenimiento periódico adecuado para asegurar el buen funcionamiento tanto de la válvula de retención como del sistema de llenado.
- No puede arrancarse nuevamente la estación de bombeo si aún no se ha repuesto el agua en el tanque hasta el nivel requerido, ya que la instalación quedaría desprotegida.

Elección del sistema de protección

En vistas de la funcionalidad de los elementos proyectados, analizadas las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, las características que presenta cada uno y los resultados del cálculo, finalmente se escoge para proteger la instalación el calderín, acompañado de un aductor de DN 200 mm junto a una ventosa DN 25 mm en la zona última de la impulsión (caseta de válvulas) que es la zona en donde se dan las máximas depresiones. Esta solución ayudará a minimizar las presiones negativas en el último tramo de la impulsión, además de que el calderín aliviará las depresiones que se dan cuando la red de riego está conectada a la impulsión.

Realizada la simulación del conjunto calderín con aductor y ventosa para el caso más

desfavorable (impulsión a balsa vacía sin conexión a la red de riego) obtenemos una presión negativa máxima de -0,39 mca (Figura nº 22).

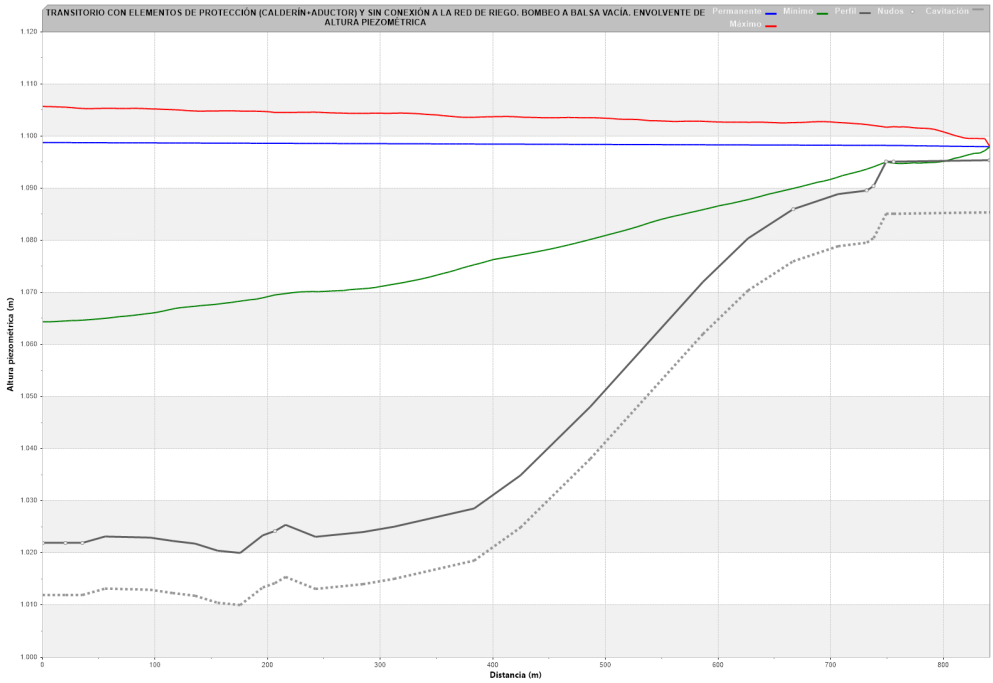

Figura nº 22. Transitorio impulsión sin red de riego. Envolvente de altura piezométrica bombeando a balsa vacía con calderín + aductor

En el Apéndice nº 5 puede consultarse las presiones obtenidas en todo el perfil de la conducción, siendo la sobrepresión máxima de 84,7 mca. En la siguiente figura se presenta la evolución del caudal en el calderín durante el primer minuto del transitorio. El máximo caudal de salida en el calderín es de 1.923 l/s y el de entrada de 676 l/s.

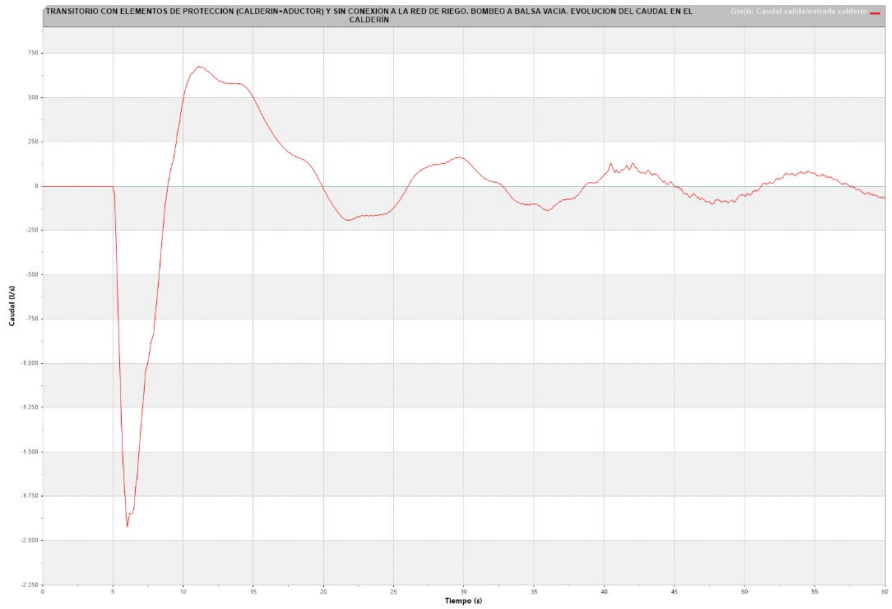

Figura nº 23. Transitorio impulsión sin red de riego a balsa vacía. Evolución del caudal en el calderín

A continuación (Figura nº 24) se muestra la evolución del volumen de agua en el interior del calderín, siendo admisible el volumen estimado ya que no llega a vaciarse.

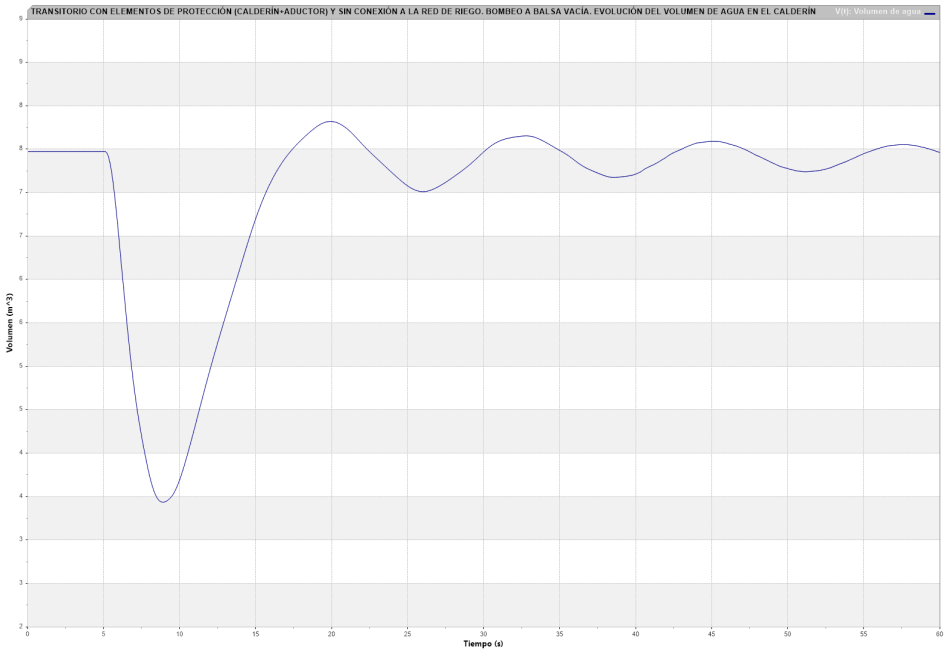

Figura nº 24. Transitorio impulsión sin red de riego a balsa vacía. Evolución del volumen de agua dentro del calderín

Simulación impulsión + red de riego sin consumo con elementos de protección

Si bien se ha calculado los distintos elementos de protección para el caso de que el sistema esté bombeando sin estar conectada a la red de riego, partiendo de la premisa de que esta es la situación más desfavorable para la tubería de la impulsión, ya se vio en el apartado nº 6.2 que si el sistema está conectado a la red de riego, se producían depresiones en el final del ramal T-2. Por lo tanto, y una vez protegida la impulsión, se ha de verificar cómo contribuyen los elementos de protección en atenuar el transitorio cuando se bombea con la red de riego conectada. Para ello, se realiza la simulación correspondiente para la solución seleccionada, comprobándose (Figura nº 25) que en el ramal T-2 no hay presiones negativas (mínimo 2,4 mca), ya que el calderín contribuye a limitar la depresión, que sin elementos de protección sí se producían, como se expuso anteriormente (véase Figura nº 7). La sobrepresión máxima es de 141 mca, menor a la presión nominal del tubo (PN 16).

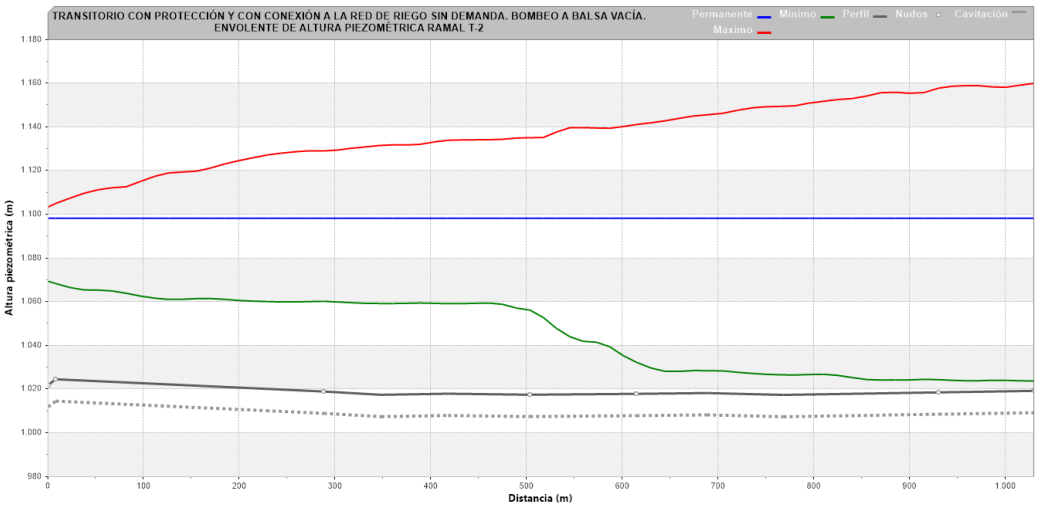

Figura nº 25. Transitorio con elementos de protección. Envolvente de alturas piezométrica ramal T-2

Por ser de mayor trascendencia el ramal T-1-2 ya que está cerca de la EB, se visualiza en la Figura nº 26 la envolvente de piezométricas, comprobándose que efectivamente, el ramal está sometido a depresiones positivas (51,3 mca) y sobrepresiones (111 mca) menores al timbraje de la tubería (PN 16).

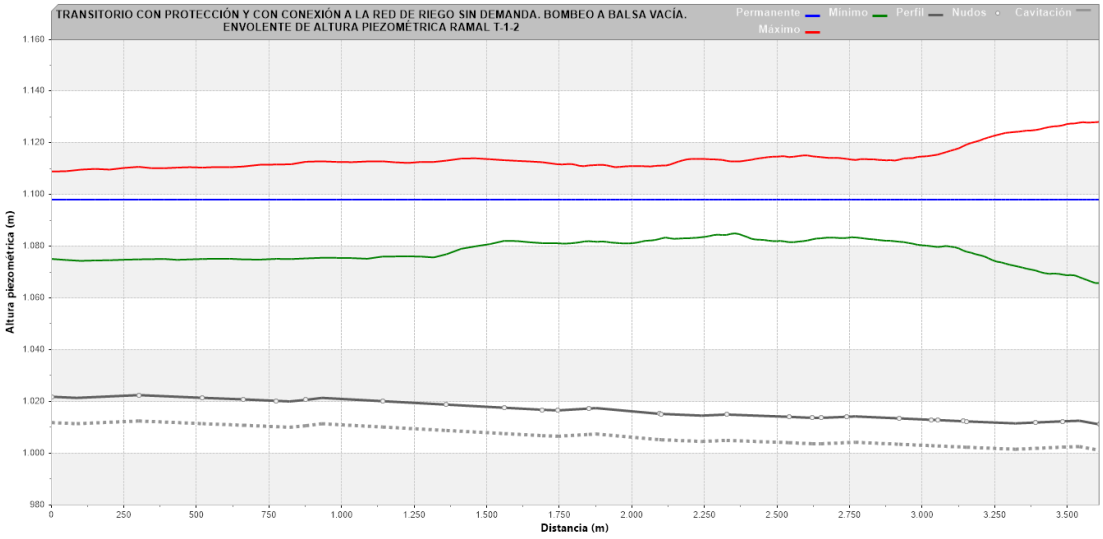

Figura nº 26. Transitorio con elementos de protección. Envolvente de alturas piezométrica ramal T-1-2

Finalmente se expone en la Figura nº 27 la envolvente piezométrica del ramal principal T-1, verificando que no entra en depresión ningún tamo.

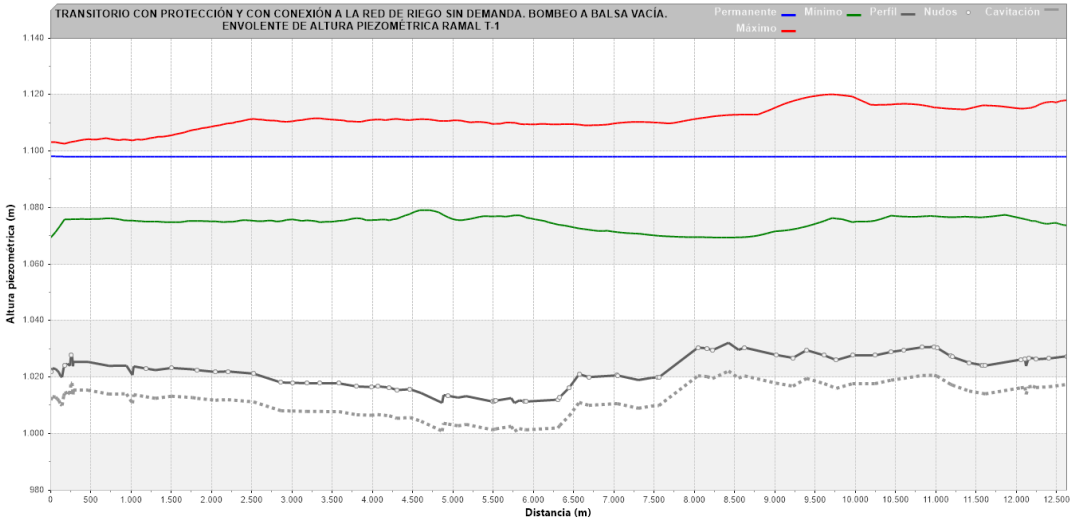

Figura nº 28. Transitorio con elementos de protección. Envolvente de alturas piezométrica ramal T-1

Simulación impulsión + red de riego con consumo y con elementos de protección

Para el caso de que el sistema esté bombeando y los hidrantes abiertos, la red de riego no se ve comprometida por una parada incontrolada de los grupos, alcanzado los ramales modelizados sobrepresiones por debajo de la presión nominal del tubo y depresiones positivas. Nuevamente el ramal más comprometido es el T-2, que presenta una línea piezométrica muy similar a la de la Figura nº 25.

Simulación apertura y cierre de hidrantes

Se ha estudiado varios escenarios de cierre aleatorio de hidrantes entre 5 y 10 segundos para ver cómo afecta a la red la generación del transitorio, obteniendo depresiones positivas y sobrepresiones por debajo de la presión nominal de la tubería por lo que no es de esperar que haya afección a las tuberías.

No obstante, se recomienda que tanto la apertura y cierre de hidrantes se haga de forma escalonada (espaciada en el tiempo al menos 30 segundos) cuando haya que gestionar un número considerable de peticiones de riego a la misma hora en un mismo ramal, evitando la apertura o el cierre simultáneo de los mismos.

7. RESUMEN DEL ESTUDIO

Se comenta en este apartado los resultados obtenidos del estudio del régimen transitorio y la propuesta técnica para reducir los efectos perjudiciales de los mismos.

1) La situación más desfavorable que puede acontecer en la tubería de impulsión es la parada simultánea de las 4 bombas cuando se bombea a balsa vacía. Sin elementos de protección la conducción entra en depresión en su tramo final (305 ml), con presiones negativas por debajo de cavitación (-9,99 mca) si la impulsión está aislada de la red de riego.

2) En el caso de que la impulsión esté conectada a la red de riego, la depresión en la impulsión es menor pero aun así existe un tramo de unos 200 ml que está con presiones negativas. En este último caso hay varios ramales de la red de riego (p.ej. T-2) que entran en depresión por debajo del nivel de cavitación. En todos los casos, a la salida de la EB la presión es siempre positiva por lo que no es necesario dimensionar un by-pass específico para paliar depresiones, pues no se dan presiones negativas en la EB y no entraría en acción el by-pass, si bien se puede instalar para otras funcionalidades (p. ej. llenado de la red de riego por gravedad desde la toma del canal).

3) Las sobrepresiones obtenidas en el caso de que la impulsión esté aislada de la red de riego y sin elementos de protección alcanza los 127 mca a la salida de la EB. En el caso de que la impulsión esté conectada a la red de riego, la sobrepresión estimada por el modelo es de 95 mca a la salida de la EB, si bien al final del ramal T-2 se alcanza un valor de presión de 173 mca, superior a la presión nominal del tubo (PN-16).

4) Para paliar los efectos nocivos del transitorio originado por la parada brusca de los grupos de bombeo, es necesario instalar elementos de protección. Se ha realizado muchas simulaciones con varios elementos de protección (calderín, chimenea de equilibrio y tanque unidireccional), intercalándolos en la impulsión tanto de forma individual como con combinación de los mismos y con distintos tamaños, de cara a conseguir que toda la impulsión se encuentre en presión positiva.

5) El calderín instalado a la salida de la EB es la estructura seleccionada por su funcionalidad, sin combinación con chimenea o tanque. El calderín propuesto debe tener una capacidad de al menos 15 m^3, sin vejiga, instalación en vertical, con tubería de conexión de DN 600 mm y con conexión diferencial mediante una válvula de retención del mismo diámetro y un by-pass DN 250 mm con una placa orificio DN 200 mm. Para paliar las presiones negativas (-2,8 mca) que se da en los últimos tramos de la impulsión se instalará un aductor DN 200 mm junto a una ventosa DN 25 mm en el primer tramo de la conducción que está dentro de la caseta de válvulas

de la balsa. La tubería de acero debe de tener un espesor de al menos 10 mm.

6) El calderín elimina en los ramales principales estudiados las depresiones que se generaban cuando no hay estructuras de protección y reduce las sobrepresiones por debajo de las presiones nominales de las tuberías instaladas.

APÉNDICE Nº 1. ELEMENTOS DEL MODELO: TUBERÍAS, NUDOS Y LEYES DE CAUDAL

APÉNDICE Nº 2. BOMBEO A BALSA VACÍA SIN Y CON CONEXIÓN A LA RED DE RIEGO. TRANSITORIO IMPULSIÓN SIN PROTECCIÓN

APÉNDICE Nº 3. BOMBEO A BALSA VACÍA SIN Y CON CONEXIÓN A LA RED DE RIEGO. EVOLUCIÓN DEL TRANSITORIO A LA SALIDA DE LA EB SIN PROTECCIÓN

APÉNDICE Nº 4. BOMBEO A BALSA VACÍA CON CONEXIÓN A LA RED DE RIEGO. TRANSITORIO EN EL RAMAL T-2 SIN PROTECCIÓN

APÉNDICE Nº 5. BOMBEO A BALSA VACÍA SIN CONEXIÓN A LA RED DE RIEGO. TRANSITORIO IMPULSIÓN CON PROTECCIÓN CALDERÍN Y ADUCTOR