

SIMULACIÓN DEL EFECTO TRANSITORIO GENERADO POR GRUPOS DE PRESIÓN CONECTADOS EN DIRECTO

Soriano, J.; Arregui F.; García-Serra, J.; Cobacho R.

Grupo Ingeniería y Tecnología del Agua (ITA)

Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera, s/n. 46022. Valencia.

jasool@ita.upv.es; farregui@ita.upv.es; jgarcias@ita.upv.es; rcobacho@ita.upv.es

1 Introducción

Los efectos transitorios generados en la instalación general de un edificio, aun siendo reconocidos por los técnicos de abastecimientos, no siempre son convenientemente considerados. Por ejemplo, es conocida la depresión generada por el arranque de un grupo de presión conectado en directo a la conducción de la red, o incluso la sobrepresión derivada de la propia parada de un grupo de bombeo, pero si bien es reconocida su existencia, la mayoría de veces se desconoce su verdadera magnitud.

El conocimiento de los efectos reales puede aportar información al gestor del servicio para permitir la conexión en directo de grupos de presión, y la correspondiente eliminación de los depósitos atmosféricos de aspiración, además de servir como guía para la incorporación de medidas de protección que reduzcan los efectos transmitidos al exterior del edificio. La eliminación de este tipo de depósitos está más que justificada por los inconvenientes de su uso (Cobacho 2008), principalmente en lo relacionado con el mantenimiento de las garantías de calidad del agua almacenada.

En realidad, la dinámica propia introducida por algunos componentes de la instalación bajo determinados esquemas de conexión justifica la necesidad de valorar la magnitud de los efectos transitorios originados (Soriano J., 2010). Este es el caso de los grupos de presión, elemento cada vez más indispensable en los esquemas de instalaciones interiores. Sin embargo, la modelación hidráulica de componentes y esquemas para la simulación de la dinámica transitoria en este tipo de instalaciones presenta una complejidad analítica adicional, dada la variabilidad en los efectos derivados por las diferentes configuraciones y condiciones de contorno.

El presente trabajo pretende mostrar el modelo de un tramo que representa el suministro en directo en un edificio, junto con la respuesta del mismo obtenida con un programa de cálculo hidráulico en régimen transitorio. Como complemento de la información obtenido con el modelo de simulación, se dispone de datos reales de la monitorización de una instalación, esto permite comparar directamente las respuestas.

2 Objetivos

La finalidad perseguida con el estudio es conocer las implicaciones de aspirar en directo, utilizando para ello un programa de transitorios que modele el comportamiento de un grupo de presión, tanto de velocidad fija como de velocidad variable, junto con medidas reales, en aras de prescindir de la instalación de depósitos auxiliares de alimentación. Entre los objetivos perseguidos en el presente estudio se encuentran:

- Realizar el modelo de simulación de la instalación general de un edificio, realizando las consideraciones y simplificaciones necesarias para obtener el valor de las magnitudes asociadas al fenómeno transitorio.
- Mostrar un análisis de sensibilidad con la información referente a la influencia las variables con mayor grado de influencia en la depresión generada en el tramo. A partir de la modificación de las características de la instalación de estudio, extrapolar los resultados a otras instalaciones similares.
- Disponer de una línea de actuación que oriente en la selección de medidas y mecanismos de protección que permitan reducir las depresiones transmitidas, y por tanto prescindir de la instalación de un depósito atmosférico en aquellas situaciones que sea posible.

3 Conexión en directo

3.1 Definición

Se conoce como conexión en directo o aspiración en directo, al esquema de la instalación general interior del edificio que conecta la tubería de entrada de la red general de distribución (RGD), directamente con el equipo de presión (a través del tubo de alimentación) sin la interposición de un depósito atmosférico.

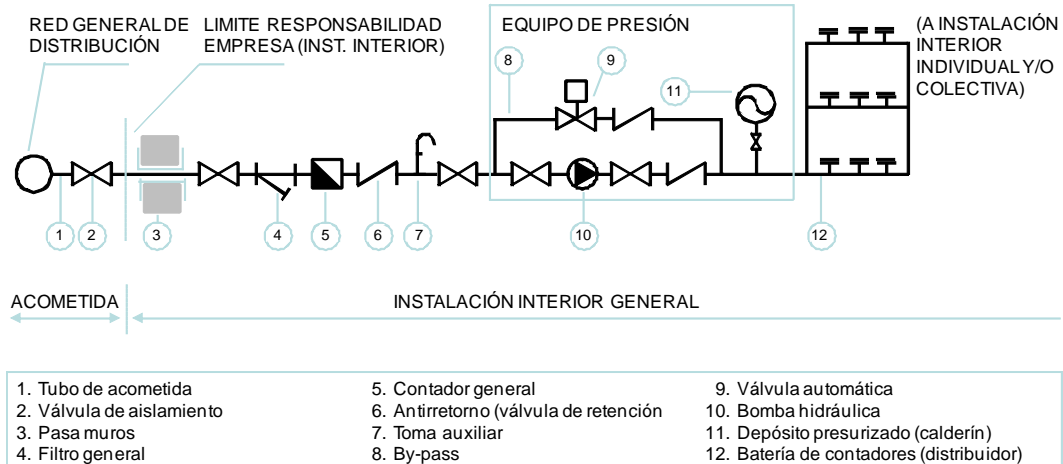


Figura 1. Esquema de conexión en directo del equipo de presión en una instalación interior

La conexión directa está supeditada a la disponibilidad de presión suficiente en red, a la capacidad de soportar la extracción de caudal en régimen permanente, y a la limitación de las afecciones en régimen transitorio por el arranque y parada del grupo. En estas consideraciones también se incluiría la continuidad del suministro en red.

3.2 Comparación de las ventajas asociadas a la conexión en directo

La siguiente tabla resume las ventajas asociadas a la conexión en directo de un grupo de presión frente al esquema que incorpora un depósito atmosférico al que están conectadas las bombas (conexión indirecta).

Tabla 1. Comparación de las implicaciones asociadas al tipo de conexión

(↑ mayor; ↓ menor)		
Característica	Conexión en directo	Conexión indirecta
Alteraciones transitorias	↑	↓
Conservación del recurso	↑	↓
Coste de la instalación	↓	↑
Eficiencia energética	↑	↓
Garantía de la calidad del agua	↑	↓
Influencia de la caída de las pérdidas en la instalación interior	↑	↓
Influencia variaciones en la red (caudal, presión, continuidad)	↑	↓
Coste de mantenimiento	↓	↑
Ocupación de espacio en planta	↓	↑
Posibilidad de fraude	↓	↑
Dificultad de regulación	↑	↓
Rendimiento hidráulico	↑	↓
Reserva de volumen	↓	↑

3.3 Ejemplo de solicitaciones en una conexión directa

La monitorización de un edificio ha permitido obtener registros sobre las solicitaciones originadas por la conexión en directo de un grupo de presión. El edificio monitorizado se encuentra en la ciudad de, abastecimiento gestionado por la empresa EMASESA Sevilla (Veiga, 2010). El inmueble abastece a un total de 18 viviendas, actualmente a partir de un grupo en conexión indirecta. La presión en acometida oscila en torno a los 30 mca, el diámetro de la red en las proximidades de la acometida es de 150 mm y el tubo de alimentación de 50 mm.

En la instalación se dispuso de tres sondas de presión instaladas entre la acometida y la aspiración de la bomba, medidores de caudal, y los correspondientes sistemas de registro de datos. Del mismo modo, ha sido posible construir diferentes esquemas para la conexión en directo a partir de un grupo de velocidad fija (BVF) y otro grupo con variador (BVV), siendo posible alternar su funcionamiento.

3.3.1 Bomba de velocidad fija conectada en directo

El arranque del grupo de velocidad fija genera depresiones significativas, registrándose la presión mínima en las proximidades de la aspiración de la bomba tal como se puede apreciar en la Figura 2.

Figura 2

Figura 2. Registro de presión durante el funcionamiento en directo en la instalación monitorizada. (Izq.) BVF, (dcha.) BVV

Las solicitaciones en la acometida del edificio son mucho más reducidas que en la aspiración de la bomba. Esto es debido principalmente al efecto de atenuación de la perturbación debido a la reflexión de las ondas en el entronque con la red general, y a la disipación energética que se da en el tramo.

Una vez que el grupo alcanzada la presión de paro, se inicia el transitorio de parada que provoca una sobrepresión asociada a la deceleración del grupo y al caudal trasegado por éste.

3.3.2 Bomba de velocidad variable conectada en directo

Las solicitaciones originadas por el grupo de velocidad variable se reducen sensiblemente, aproximadamente un 80% respecto a la BVF en la instalación de referencia. Este efecto deriva de un arranque más progresivo resultado del funcionamiento del controlador PID que incorpora el variador, unido a una velocidad de giro de valor ligeramente inferior a la velocidad nominal del grupo.

Otra de las particularidades del funcionamiento de este tipo de grupos es la reducción de los efectos correspondientes al funcionamiento en régimen permanente, ya que al reducirse la probabilidad de giro a velocidad nominal, el caudal trasegado pocas veces alcanza el caudal de diseño del grupo (el caudal con mayor probabilidad de ocurrencia está en torno al 40%-60% de su capacidad máxima a diferencia de lo que ocurre con el grupo de velocidad fija).

Respecto a la parada del grupo, el variador de frecuencia realiza una laminación significativa, siendo incluso complicado fijar el instante exacto de la parada. Esta situación se vería modificada en el caso de originarse un paro instantáneo por fallo de alimentación, pero no se estima que la magnitud de tal evento sea significativa.

4 Modelo de simulación de una instalación interior

Para conocer en mayor medida el comportamiento de un esquema de conexión en directo se modela la instalación interior de un edificio a partir del programa de transitorios hidráulicos *Allievi*, validando posteriormente su fidelidad a partir de los registros correspondientes a la monitorización. La comparación directa de ambas respuestas va a permitir conocer las particularidades del software de transitorios utilizado, siempre teniendo presente las limitaciones de los registros medidos y la complejidad de la modelación de la instalación interior. Al mismo tiempo, el modelo va a permitir conocer el grado de influencia de cada variable representada de la instalación, pudiéndose construir diferentes escenarios en los que se varíe las propiedades del modelo (por ejemplo el caudal por la red general, la presión en acometida, etc.), situación impensable en una instalación real. La Figura 3 muestra la representación del modelo en *Allievi*, constituida por los tramos implicados.

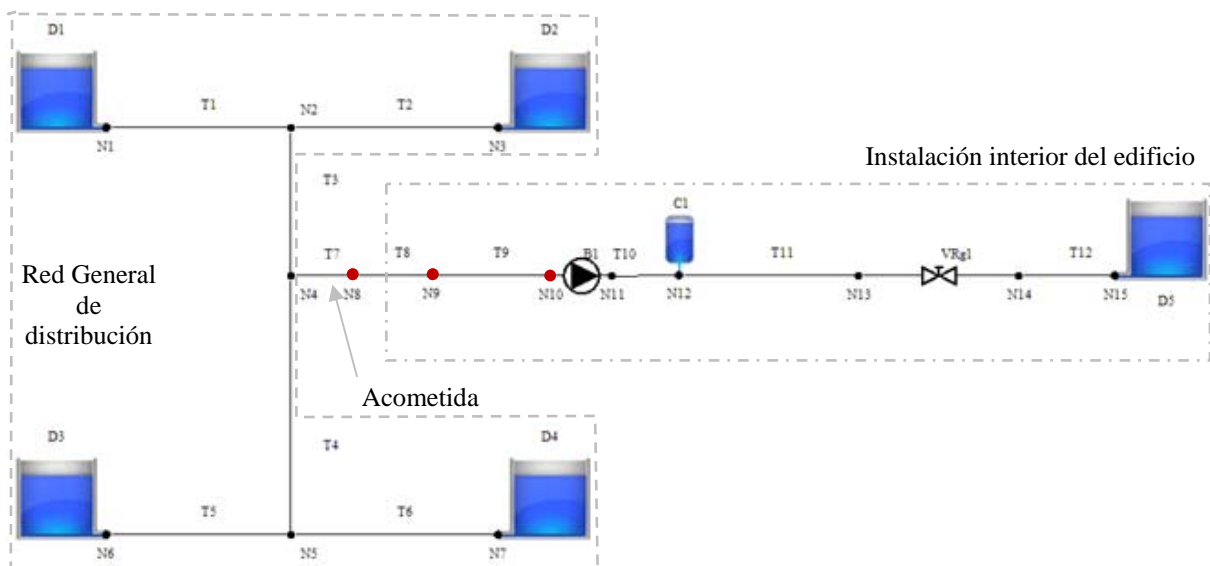


Figura 3. Modelo en *Allievi* de la instalación interior de un edificio junto con su conexión a red

Como puede observarse, el modelo de simulación aporta una buena aproximación sobre la presión mínima que tiene lugar durante los primeros instantes de arranque de la bomba tanto en la aspiración como en la acometida del edificio (Figura 4). Para sucesivas ondas de presión generadas por la perturbación, existe un comportamiento dispar entre la presión registrada y los resultados del modelo de simulación. En el caso de los registros reales, se observa por un lado la atenuación de la serie de presión junto con un desfase de las sucesivas ondas.

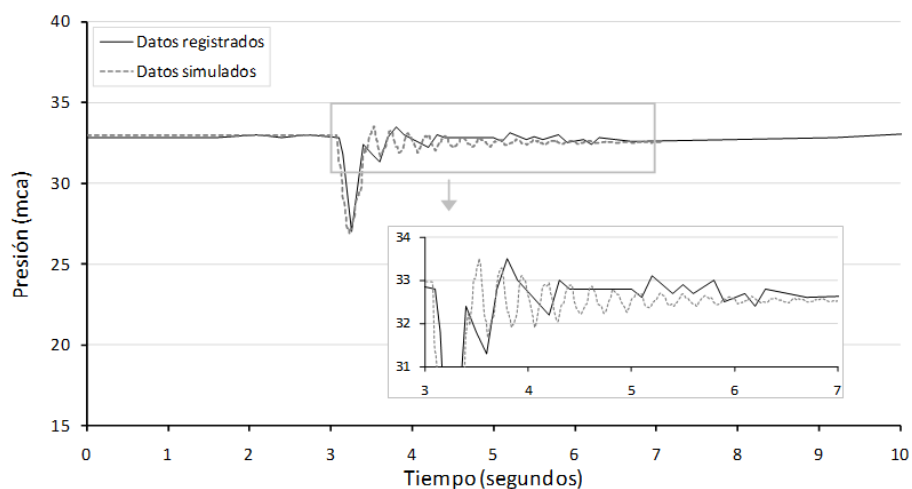


Figura 4. Comparación de la presión en la acometida durante el arranque

Existen varias razones que justifican esta diferencia. Una de ellas se basa en la consideración del factor de fricción llevada a cabo por el programa. En la situación real existe una dependencia del valor del factor de fricción con el caudal instantáneo durante el fenómeno transitorio, situación no considerada por *Allievi*. En esta línea, algunos autores han desarrollado modelos que expresan el factor de fricción f como suma de dos términos correspondientes al régimen permanente y al régimen transitorio (Bergant, 2008). Por otro lado, otro de los parámetros que influye sensiblemente en la atenuación y desfase de la onda es la viscoelasticidad de las tuberías, ya que mayoritariamente el tubo de alimentación de la instalación monitorizada está realizado en HDPE. Bajo estas condiciones, se origina una deformación de la tubería con la correspondiente disipación energética y amortiguamiento de la onda transitoria de presión (Covas et al. 2004). Existen otras propiedades de la instalación que también intervienen en la disparidad de los comportamientos y que no pueden dejarse de mencionar, tales como la existencia de elementos perturbadores o bloqueantes del flujo, como pudieran ocasionar filtros o elementos de contabilización, las interacciones propias de las fijaciones y anclajes de las tuberías, elementos antivibratorios y elásticos (Bergant, 2008) cuyo comportamiento no suele estar contemplado en la mayoría de algoritmos de simulación, así como las limitaciones y errores de los equipos de medida.

5 Análisis de sensibilidad

A partir del modelo del edificio construido en *Allievi*, se pretende mostrar un análisis sobre el grado de influencia de algunas de los parámetros que definen el tramo en aras de conocer cómo afectaría en una instalación real su variación. Por ello, el análisis aportará resultados que pueden ser extrapolables a otras instalaciones derivados de la modificación de las características constructivas de la instalación de referencia. Con todo ello se considera que los resultados obtenidos son útiles para un mejor conocimiento de este tramo, y por tanto, con un valor para el técnico nada despreciable.

5.1 Influencia de los parámetros de la RGD

5.1.1 Caudal por la RGD

Uno de los errores más comunes referidos a los efectos transitorios, asocia variaciones en la magnitud de la perturbación bajo diferentes caudales por la RGD. Por ello, se han simulado diferentes escenarios en los que se ha variado la carga de caudal circulante por la RGD (y por tanto la velocidad del flujo de agua), manteniendo las características del resto de la instalación invariables (diámetro de la red general, presión de entrega en la acometida y características de la instalación interior).

Se ha representado la depresión como diferencia entre la presión antes del arranque del grupo y la mínima alcanzada después del arranque de éste (en los dos puntos extremos de control), para cada velocidad en red modelada. El análisis muestra que la modificación del caudal (para un mismo diámetro y una misma presión en la acometida), no genera variaciones de la caída de presión máxima durante el arranque (puede darse el caso que la red origine una caída de presión elevada para el caudal traído durante el suministro en directo, en tal caso, la limitación de conectar en directo vendría condicionada por el régimen permanente y por tanto no tiene cabida el estudio de la respuesta transitoria).

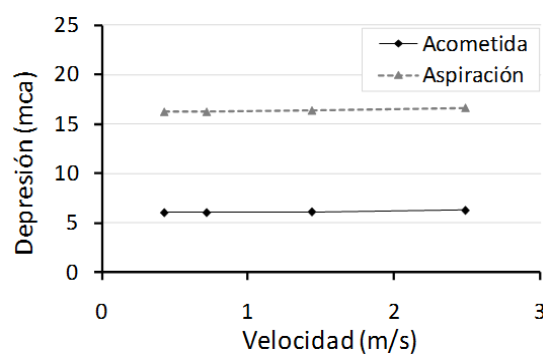


Figura 5. Depresión en función de la velocidad del agua por la RGD.
Diámetro red=150 mm.

5.1.2 Presión en el punto de entrega

Respecto a la presión en acometida del edificio, si bien lo ideal es contar un valor estable en la práctica resulta complejo por las características de la red y la variabilidad horaria de la demanda. Se ha analizado la respuesta en el rango más usual de variación, 12-45 mca, mantenido fijas el resto de características del modelo. Por otro lado, se ha obtenido una serie asociada a los registros monitorizados para diferentes presiones en acometida comparándose directamente los datos registrados con los obtenidos con el modelo de simulación.

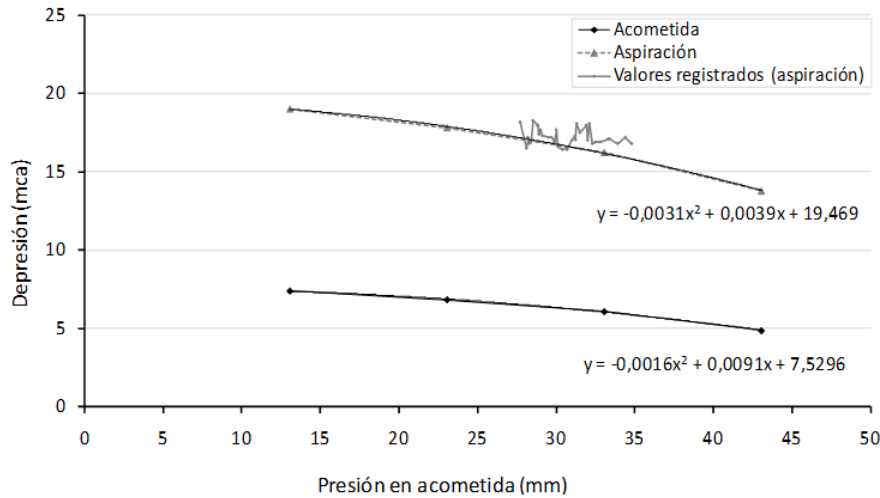


Figura 6. Depresión en función de la presión de entrega (presión en acometida). $D_{red}=150$ mm

A medida que aumenta la presión en la acometida, se reduce la depresión originada por el transitorio. En el caso de los datos registrados también se aprecia una ligera tendencia ante variaciones de presión, pero en cualquier caso no es tan significativa como la aportada por el modelo. La razón de esta tendencia hay que buscarla en el propio funcionamiento de la bomba. La disminución de la presión en la aspiración conlleva un cambio en su punto de funcionamiento con un aumento de la altura aportada, y una disminución del caudal bombeado.

5.2 Influencia de los parámetros de la instalación interior

5.2.1 Tiempo de arranque del grupo de presión

Uno de los parámetros que mayor influencia presenta sobre la magnitud de la depresión está relacionado con el tiempo de arranque del grupo, tiempo comprendido desde el inicio de la alimentación eléctrica hasta que éste alcanza su velocidad de régimen.

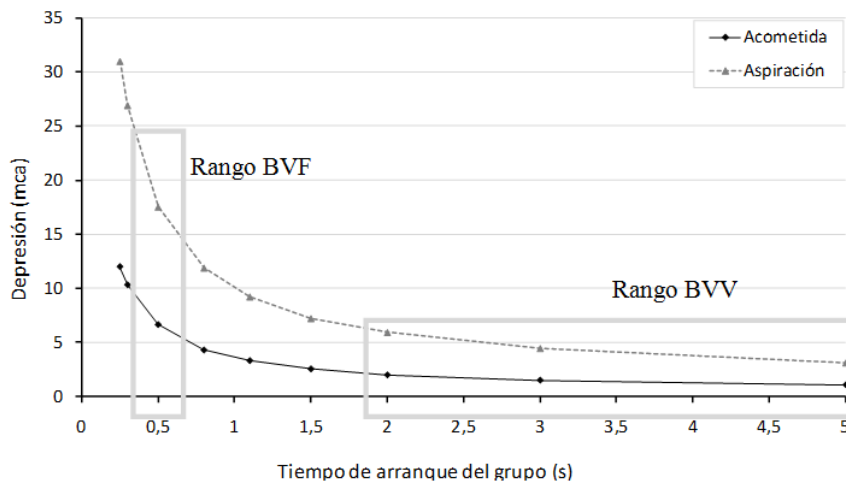


Figura 7. Depresión en función del tiempo de arranque de la bomba

Como puede observarse en la Figura 7 las solicitaciones se reducen sensiblemente a medida que aumenta el tiempo de arranque, originándose depresiones muy elevadas para tiempos cortos, y depresiones prácticamente despreciables en acometida para tiempos más elevados. El primero de los casos se asociaría al comportamiento de la BVF, y en segundo caso a motores equipados con variador. La capacidad del control del tiempo de arranque justifica en gran medida la idoneidad de estos grupos frente a los de velocidad fija. La posibilidad de fijar la duración en el arranque junto con la adecuación de la respuesta del motor en función de la demanda real reduce significativamente las solicitaciones del grupo de presión, manteniendo un comportamiento menos severo y con menores solicitaciones.

5.2.2 Caudal de bombeo del grupo

Otro parámetro característico que presenta gran influencia sobre la depresión originada durante el arranque es el caudal trasegado por el grupo de bombeo. A su vez, el número de bombas instaladas en el grupo de presión presenta una considerable implicación. Para este análisis se han seleccionado diferentes bombas comerciales.

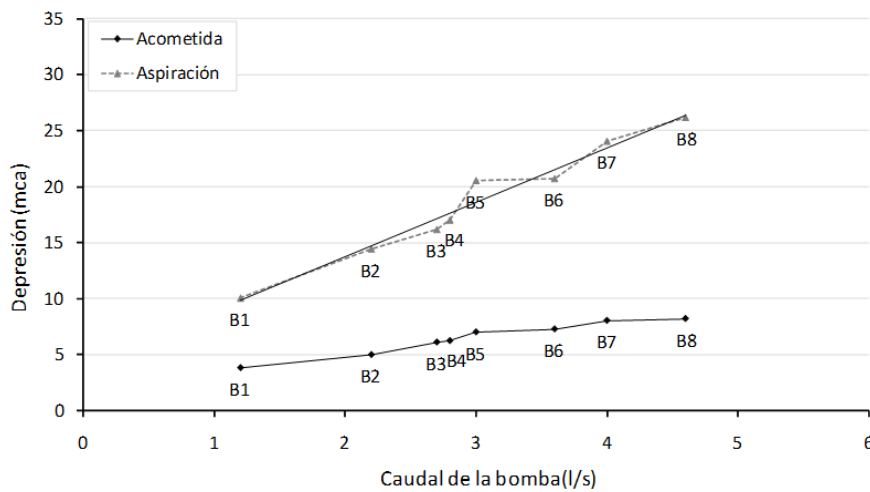


Figura 8. Depresión en función del caudal de la bomba para la instalación de referencia

Para las bombas analizadas, un aumento de caudal origina una mayor caída de presión en el arranque, manteniendo al mismo tiempo una tendencia prácticamente lineal. De forma general, mayores bombeos originan mayores incrementos de velocidad en la red, y por tanto aumenta la magnitud de la perturbación.

Cuando la instalación cuenta con varias bombas, y para los desfases normales entre arranques la magnitud de la depresión es menor que en el caso de una única bomba que totalice el caudal de la instalación (Figura 9).

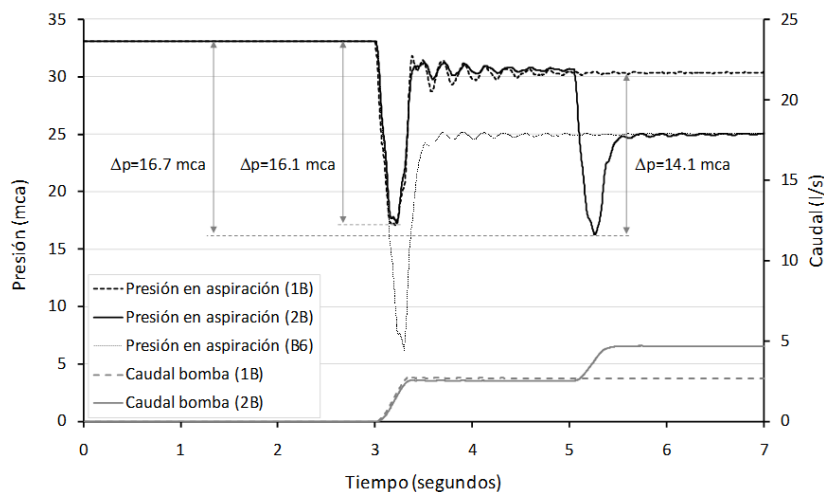


Figura 9. Efectos derivados del arranque de dos bombas en paralelo (desfase=2 s)

5.2.3 Característica resistente del tramo de aspiración

En este apartado se trata de analizar cómo influyen las pérdidas de carga originadas en el tramo de aspiración, principalmente en lo que se refiere a la longitud del tramo y a las pérdidas singulares de los elementos instalados.

Longitud del tramo de aspiración

Uno de los factores determinantes en este análisis es la distancia del tramo de aspiración (conducción comprendida desde la conexión de la acometida hasta la aspiración de la bomba a partir del tubo de alimentación). Para la instalación de referencia se ha variado la longitud de dicho tramo, manteniendo fijas el resto de características de la instalación, simulándose por tanto instalaciones en las que la bomba está más o menos próxima a la RGD.

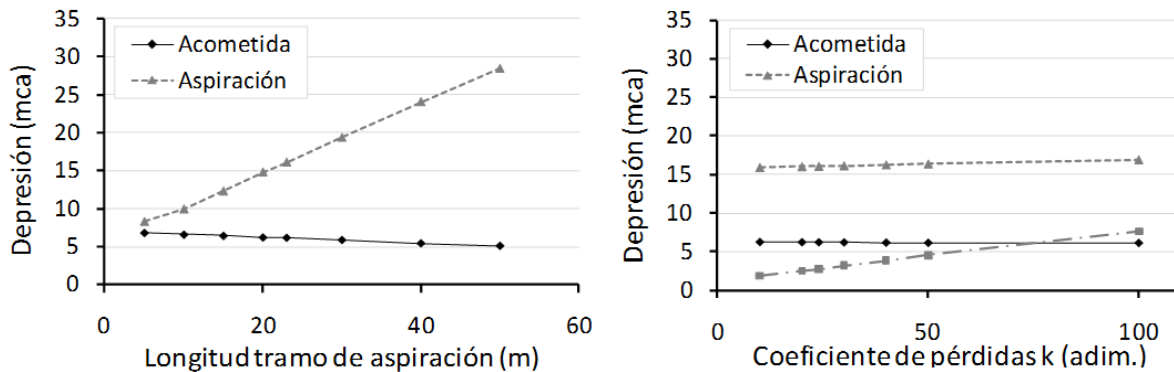


Figura 10. Influencia de la característica resistente de la instalación; (izq.) depresión en función de la longitud del tramo de aspiración, (der.) depresión en función de las pérdidas menores en el tramo

Tal como se aprecia en la Figura 10 (izq.), en las proximidades de la aspiración de la bomba, un incremento de la longitud del tramo de la instalación interior favorece el aumento de la magnitud de la depresión de forma considerable. Esto se debe a que al aumentar la distancia entre la aspiración de la bomba y la conexión de la acometida, aumenta el tiempo que tardan las sucesivas ondas de sobrepresión (generadas por el reflejo de la onda incidente de depresión) en atenuar la perturbación, y por ello para longitudes más reducidas se consigue una reducción considerable. A diferencia de la situación anterior, en la acometida el aumento de la longitud del tramo reduce ligeramente la depresión originada, ya que la distancia favorece la atenuación en este punto.

Longitud del tramo de aspiración

Otro de los parámetros a considerar relacionado con la característica resistente de la instalación interior, hace referencia a las pérdidas de carga menores debidas a los diferentes accesorios y elementos perturbadores instalados en el tramo de aspiración (llaves, filtro, contador general, válvula antirretorno, etc.).

Si bien las pérdidas no siempre son correctamente consideradas en la instalación general del edificio, un aumento significativo (derivado por ejemplo de una obturación del filtro) altera significativamente la caída de presión en la aspiración de la bomba cuando ésta estabilice su funcionamiento, situación que ocurre con posterioridad a la fase de arranque (régimen permanente). Esta situación puede originar presiones excesivamente bajas (situación especialmente desfavorable cuando la red mantenga presiones de entrega reducidas), y por tanto podría no ser posible la conexión en directo de la instalación. En cuanto a la alteración originada durante el transitorio de arranque de la bomba, las simulaciones muestran que este parámetro no presenta una influencia significativa en la magnitud de la depresión máxima generada.

5.2.4 Otras características de la instalación

Existen otros parámetros que también presentan influencia sobre la magnitud de la perturbación originada por el arranque del grupo de presión. A modo general, cualquier situación que propicie una alteración de la velocidad del flujo en la conducción de aspiración de la bomba, favorecerá la aparición de un transitorio más o menos severo.

6 Protección de instalaciones con aspiración directa

Una de las vías de actuación para la reducción de la magnitud de la perturbación generada por el funcionamiento del grupo de presión es la instalación de un depósito hidroneumático de membrana (calderín) en las proximidades de la aspiración del equipo de bombeo. El calderín aporta parte del volumen de agua demandado por el grupo de presión durante la fase de arranque, reduciendo la sollicitación de agua a la red y con ella, la depresión originada en el tramo, ya que al reducirse las variaciones de caudal de entrada se reduce la magnitud de la perturbación generada.

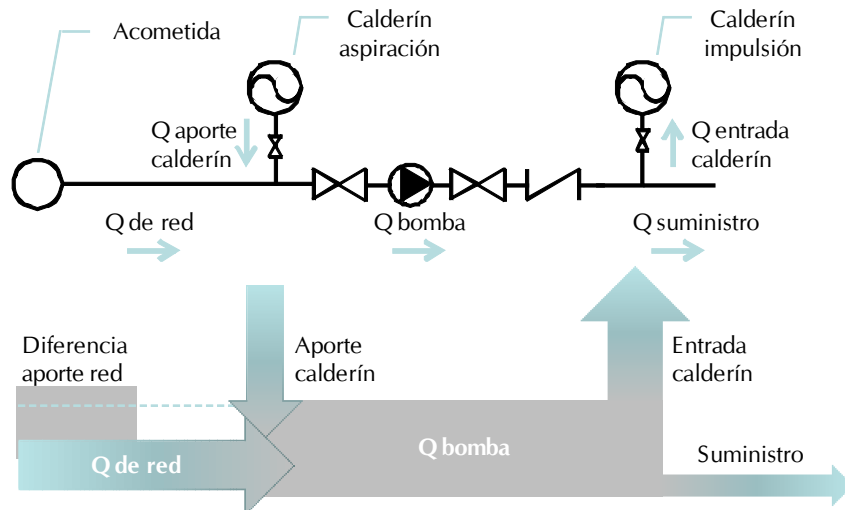


Figura 11. Flujo de caudales en la fase de arranque de la bomba

Existe una reducción significativa de las sollicitaciones tanto durante el arranque (depresión) como en la parada del grupo (sobrepresión) con la instalación de un calderín en aspiración (Figura 12). Para la instalación monitorizada y, en las proximidades de la aspiración de la bomba, se registró una reducción promedio de la sollicitación durante el arranque del grupo en torno a un 55%.

En el caso de la acometida del edificio monitorizado las reducciones son también significativas, y con valores próximos a los indicados. Esto supone una reducción considerable de la magnitud de la perturbación generada en la conducción de aspiración del edificio, y por tanto, una reducción de la perturbación transmitida al exterior de éste.

Aunque no ha sido motivo de estudio el fenómeno de parada de la bomba, en la instalación monitorizada y tal como se aprecia en las figuras anteriores, la reducción conseguida con el calderín de aspiración está en torno al 50% tanto en la acometida del edificio como en la aspiración de la bomba.

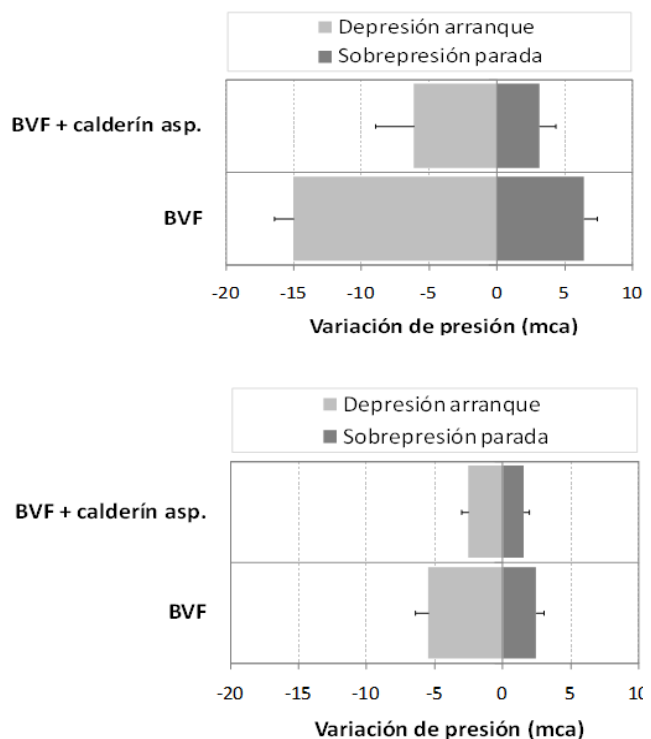


Figura 12. Comparación de sollicitaciones BVF en aspiración (arriba) y acometida (abajo). Registro extremo (barra error) y registro promedio.

Es posible modelar de forma sencilla este elemento en el modelo de simulación con el programa *Allievi* sin más de que definir sus propiedades y su punto de ubicación. En el caso de la instalación de referencia el calderín es de 25 litros con una presión de hinchado de 20 mca y se encuentra conectado en las proximidades de la aspiración de la bomba a partir de un ramal de conexión.

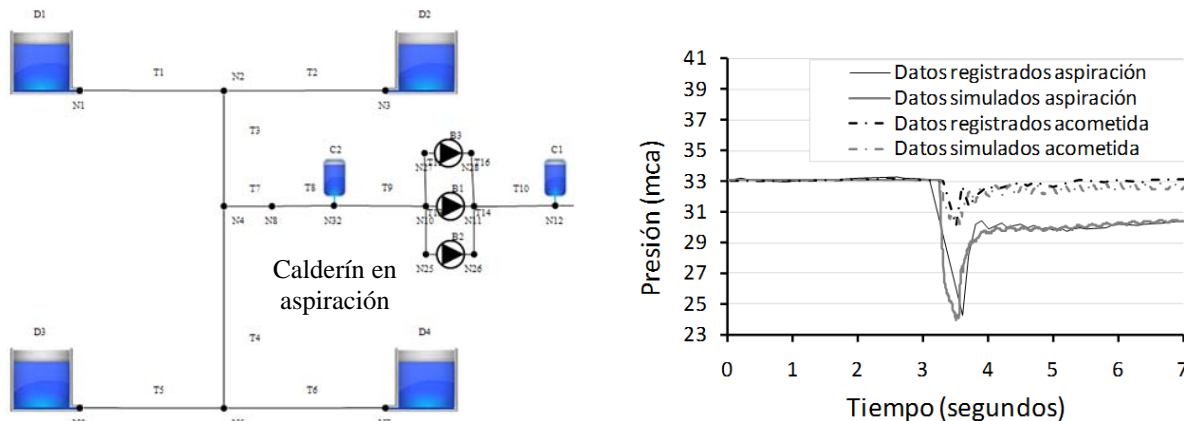


Figura 13. (Izq.) Modelo de simulación en *Allievi* con calderín de aspiración (C2). (Dcha.) Validación respuesta del modelo

Respecto a la validación de su comportamiento la Figura 13 muestra la comparación de los datos registrados y los obtenidos con el modelo una vez que incorpora el calderín. Como puede observarse, el modelo de simulación aporta una aproximación con suficiente precisión para caracterizar la protección a partir de este elemento.

7 Conclusiones

- A partir de un modelo de simulación convenientemente caracterizado es posible analizar las solicitaciones introducidas por un grupo de bombeo conectado en directo, tanto en la instalación interior de un edificio, como en la propia acometida de la red general.
- Mediante este modelo es posible obtener el grado de influencia de cada variable, y analizar cómo se modifican las solicitaciones ante diferentes escenarios, pudiendo orientar sobre las situaciones más desfavorables, y aquellas en las que las solicitaciones no son elevadas y por tanto es posible acudir a una conexión directa del grupo de presión.
- La simulación también puede orientar sobre los mecanismos necesarios para la protección de la instalación en aras de limitar las solicitaciones originadas del grupo. En esta línea, la instalación de un calderín hidroneumático en la aspiración del grupo puede reducir en gran medida las solicitaciones, pudiendo realizarse su dimensionado a partir del modelo de simulación de la instalación.

8 Referencias

- Bergant A.; Tijsseling A.; Vtkovsk J.; Covas D.; Simpson A.; Lambert M. “Parameters affecting water-hammer wave attenuation, shape and timing—Part I”. *Journal of Hydraulic Research* 2008.
- Bergant A.; Simpson A.; Vítkovský. “Developments in unsteady pipe flow friction modeling”. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 39, 2001.
- Cobacho R.; Arregui F., Cabrera E, Cabrera E. Jr. “Private water storage tanks: evaluating their inefficiencies”. *Water Practice & Technology*. IWA Publishing 2008
- Covas D.; Stoianov I.; Ramos H.; Graham N.; Moksimovic C.; Butler D. “Water hammer in pressurized polyethylene pipes: conceptual model and experimental analysis”. *Urban Water Journal* 2004.
- Soriano J. 2010. “Análisis y Comparación de los Principales Esquemas de Suministro en Instalaciones Generales de Edificios” IWA Young Water Professional Conference. (Barcelona 2010).
- Veiga C., Soriano J. “Monitorización global del comportamiento hidráulico de un edificio de viviendas”. AEAS 2010.