

Calibración de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión

F.J. Martínez-Solano, P.L. Iglesias-Rey, S.X. Molina Arce

Dept de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Universidad Politécnica de Valencia – Camino de Vera S/N – CP 46022 – Valencia (España)

1. Introducción

Actualmente los modelos hidráulicos de redes de abastecimiento de agua son ampliamente utilizados por empresas de abastecimiento y consultores para asistir en tareas de planificación, diseño, evaluación de la operación, análisis de gestión energética y análisis de calidad del agua. Así un modelo será tanto más útil cuanto más fiable sea.

La American Water Works Association (AWWA) afirma que la calibración consiste en comparar los resultados del modelo con mediciones obtenidos en campo, realizando ajustes a parámetros del modelo y la revisión de los datos de campo hasta alcanzar la concordancia entre ambos (AWWA, 2013). Según Shamir y Howard (1977) “la calibración consiste en determinar las características físicas y operacionales de un sistema existente, que ingresados como datos al modelo computacional permitan obtener resultados realistas”. Walski (1983) define la calibración como un proceso de dos pasos que consisten en:

- a) comparar las presiones y caudales simulados con aquellos observados (medidos) para unas condiciones de operación conocidas, y
- b) ajustar los datos de entrada al modelo de tal forma que exista concordancia entre los valores simulados y observados.

En definitiva, la calibración de modelos hidráulicos puede definirse como el proceso de ajuste de los parámetros que definen el comportamiento hidráulico del modelo, para reflejar con la mayor precisión posible el funcionamiento real de la red de distribución, tanto para el escenario estático como dinámico.

El presente trabajo busca presentar una metodología de calibración de modelos matemáticos de redes de distribución de agua para la asignación de consumos y demandas dependientes de la presión (fugas), así como las pérdidas localizadas en la red. De esta

forma, se representarán espacial y temporalmente tanto las demandas como las fugas existentes en la red de abastecimiento. La metodología se completa con la aplicación a un caso de estudio correspondiente a un sector hidráulico de la red de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Guayaquil en Ecuador.

2. Metodología

2.1 Hipótesis de partida

A continuación se propone una metodología para el ajuste de los coeficientes emisores de fugas asignados a los nudos de demanda del modelo, los coeficientes del patrón de variación temporal de la demanda y las pérdidas de carga en las líneas del modelo. La metodología se apoya en una serie de hipótesis de partida que se describen a continuación:

- La demanda es independiente de la presión en la red.
- Se conoce el caudal inyectado en la red, tanto en su magnitud como su variación temporal. Esto implica que se conoce igualmente el volumen total de agua no registrada.
- El volumen de agua no registrada estará compuesto por las fugas en la red y por tanto se considera dependiente de la presión.
- El efecto de la rugosidad y la reducción del diámetro interno de las tuberías se pueden representar mediante un único coeficiente de rugosidad y un cierto número de coeficientes de pérdidas menores en ciertas líneas de la red.
- La red se admite dividida en sectores con características homogéneas, tanto en las tuberías como en el patrón de consumos.

2.2 Ecuaciones

Tal como se mencionó anteriormente, la metodología propuesta para la calibración del modelo, considera como objetivos de la calibración determinar un coeficiente emisor de fugas en cada nudo del modelo a partir de un emisor global para toda la red de distribución, realizar el ajuste de los coeficientes del patrón de consumo para la demanda base, y representar las pérdidas de carga en válvulas. En los párrafos siguientes se revisarán las ecuaciones de partida para la formulación del método propuesto, y utilizadas en el proceso de calibración de cada uno de los objetivos mencionados.

Se admite que se conoce la variación temporal del caudal inyectado. En la mayoría de las redes de distribución el caudal inyectado $Q_I(t)$ y el caudal medio demandado $Q_{DB,i}$ son conocidos, por lo que admitiremos como válida esta premisa. El balance de caudales en el abastecimiento quedaría de la siguiente forma:

$$Q_I(t) = \sum_{i=1}^{N_D} m_{D,i}(t) \cdot Q_{DB,i} + Q_F(t) \quad [1]$$

C.23.

Aquí, $Q_F(t)$ representa el caudal de agua no registrada en el instante t y $m_{D,i}(t)$ es el coeficiente de modulación del nudo i en el instante t . Este caudal se puede asimilar al caudal de fugas. El enfoque más simple para modelar las fugas consiste en admitir que el caudal de fugas es dependiente de la presión en el punto donde se localizan:

$$Q_{F,i}(t) = c_{E,i} \cdot p_i(t)^n \quad [2]$$

En esta ecuación, $Q_{F,i}(t)$ es el caudal de fugas en el nudo i en el instante t , $c_{E,i}$ es el coeficiente del emisor en ese nudo i , $p_i(t)$ es la presión en el nudo i en el instante t y n es el exponente del emisor.

Con todo esto, la ecuación [1] puede ser expresada como la suma de la demanda independiente de la presión (consumo) y la demanda dependiente de la presión (fugas). Si extendemos este planteamiento al conjunto de todos los nudos de consumo de la red (N_D), tendremos un balance global de caudales en el instante t :

$$Q_I(t) = \sum_{i=1}^{N_D} m_{D,i}(t) \cdot \bar{Q}_{DB,i} + \sum_{i=1}^{N_D} c_{E,i} \cdot p_i(t)^n \quad [3]$$

Si se admite que la simulación se divide en T instantes de cálculo, esto supone un total de $T \cdot N_D + N_D$ incógnitas. De aplicar la ecuación (3) a cada uno de los T instantes obtenemos otras tantas ecuaciones. Además, el valor medio de los coeficientes de modulación ha de ser 1. Por tanto, tenemos $T + 1$ ecuaciones. Admitiendo que todos los nudos presentan la misma variación temporal ($m_{D,i}(t) = m_D(t)$) y tienen el mismo coeficiente emisor ($c_{E,i} = c_E$) reducimos el problema a $T + 1$ incógnitas y el sistema queda perfectamente determinado. Además, para este estudio se admite que el exponente del emisor es de 0,5. La ecuación [3] quedará:

$$Q_I(t) = m_D(t) \cdot \sum_{i=1}^{N_D} Q_{DB,i} + c_E \cdot \sum_{i=1}^{N_D} \sqrt{p_i(t)} \quad [4]$$

Existe una relación implícita entre los valores de la variación temporal de la demanda, el coeficiente emisor y la presión en los nudos. Esta relación viene dada por las ecuaciones hidráulicas de la red y se utilizará el programa EPANET para determinar el valor de las presiones una vez conocidos los valores de $m_D(t)$ y c_E . Esto convierte el problema en iterativo, ya que es necesario dar un valor a los valores de $m_D(t)$ y c_E para poder calcular las presiones y es necesario conocer las presiones para resolver el sistema formado por la ecuación (4). A continuación se detallan las fases seguidas para resolver el problema.

2.3 Estimación de un coeficiente global para los emisores.

En primera instancia, el problema consiste en resolver el sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones (4) para cada instante de cálculo. El segundo sumando de esta ecuación representa el caudal de fugas calculado en la red. El valor medio de este caudal es conocido de antemano a partir de los caudales medios injectado y demandado:

C.23.

$$\bar{Q}_F^{(m)} = \bar{Q}_I - \sum_{i=1}^{N_D} \bar{Q}_{DB,i} \quad [5]$$

En la ecuación [4] solo se necesita conocer la variación de la presión en la red para obtener una estimación del coeficiente del emisor. Sin embargo, para calcular la presión será necesario conocer exactamente la variación temporal de la demanda. Para ello, se toma como hipótesis inicial que la demanda sigue el mismo patrón temporal que el caudal inyectado. Con esta hipótesis se calculan las presiones y se obtiene una estimación del caudal medio de fugas. Si el valor no coincide con $\bar{Q}_F^{(m)}$ se iterará corrigiendo el coeficiente global de los emisores. Este proceso se repite hasta que la presión promedio en los nudos de demanda sea considerada constante para dos iteraciones sucesivas y la diferencia entre el caudal medio de fugas simulado y medido sea inferior a un cierto umbral de error.

Si se dispone de información suficiente se puede contemplar la posibilidad de utilizar un método para tener en cuenta el desigual reparto espacial de las fugas en los diversos sectores en que se pueda dividir la red. Las pruebas de detección de fugas consisten en la subdivisión de cada sector mediante el cierre temporal de las válvulas. El cierre de cada sector es asociado con la variación del caudal registrado en el punto de inyección. Con ello, se puede obtener un indicador de fugas IF_k del sector k . Esto nos permite definir un factor de ponderación w_k tal que:

$$w_k = \frac{IF_k}{\sum_{k=1}^{NS} IF_k} = \frac{c_{E,k}}{\sum_{k=1}^{NS} c_{E,k}} \quad [6]$$

En cualquier caso, el coeficiente de ponderación w_k no aporta nuevas ecuaciones al problema, ya que depende explícitamente de las medidas realizadas de caudal inyectado y presión en el sector; y del coeficiente de modulación de la demanda correspondiente al instante en el que se estima que se produce el caudal mínimo nocturno, que ya constituía una incógnita del problema y que se deduce en la siguiente fase del proceso de calibración.

2.4 Determinación del patrón de variación temporal de la demanda.

Con el coeficiente global de los emisores conocido, se puede determinar el valor del coeficiente de modulación de la demanda a partir de la ecuación [3]:

$$m_D(t) = \frac{Q_I(t) - c_E \cdot \sum_{i=1}^{N_D} \sqrt{p_i(t)}}{\sum_{i=1}^{N_D} Q_{DB,i}} \quad [7]$$

Obviamente, al modificar el patrón temporal de la demanda las presiones cambian ligeramente, por lo que este proceso deberá repetirse hasta que el error observado entre el caudal medido y el caudal simulado sea suficientemente pequeño.

2.5 Calibración de las pérdidas de carga en la red

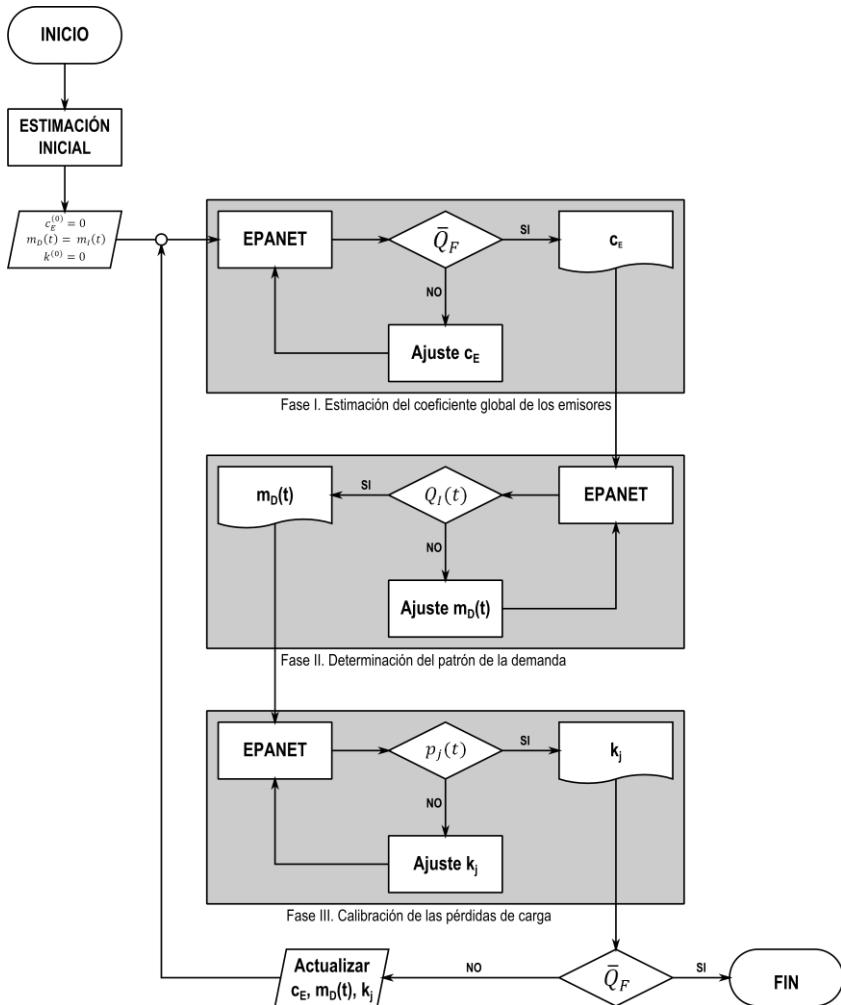


Figura 1 – Flujograma descriptivo del proceso de calibración.

El proceso de calibración de las pérdidas de carga en el modelo hidráulico parte del escenario obtenido luego de determinar el coeficiente global de los emisores y el patrón de consumo de la demanda base. Este proceso consiste en el ajuste del coeficiente global de pérdidas en aquellas tuberías que se consideren relevantes para el desempeño hidráulico de la red. El criterio de calibración busca minimizar la diferencia entre los valores de las presiones observadas y calculadas.

Por último, el proceso de ajuste de las pérdidas de carga repercute necesariamente en la distribución de presiones en la red, por lo que una vez finalizado este tercer paso en el proceso de calibración procede realizar de nuevo una comprobación del balance de caudales diario. Si esta comprobación resulta positiva, el proceso de calibración se dará finalizado con éxito. En caso contrario, se repite el proceso tomando como valores iniciales de los coeficientes de los emisores, los coeficientes de modulación de la demanda y los coeficientes de pérdidas de carga los obtenidos hasta este punto. La figura 1 ilustra los pasos seguidos en este proceso de calibración.

3. Casos de estudio

3.1 Distrito de medición N72-M132

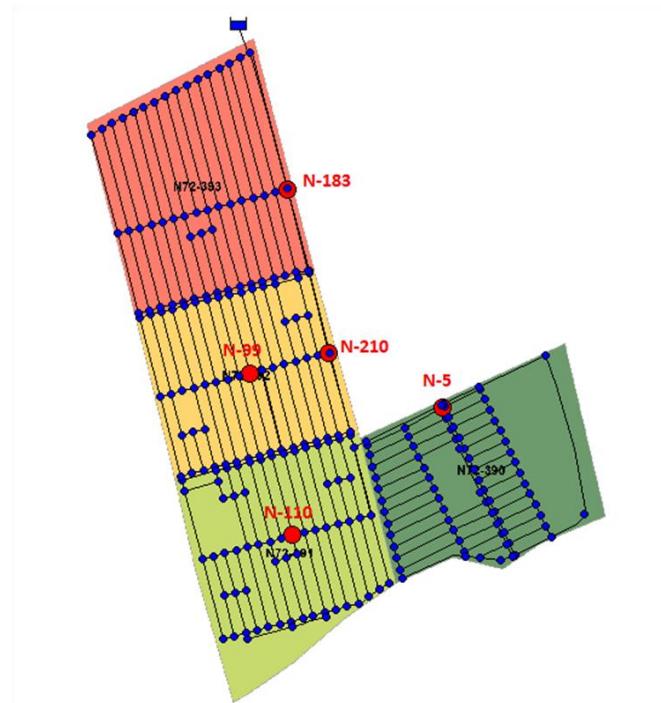


Figura 2 – Modelo hidráulico del distrito de medición N72-M132.

A continuación se ha elegido uno de los distritos de medición de la ciudad de Guayaquil (Ecuador) como caso de estudio para la aplicación de esta metodología. Este distrito cubre

una extensión de 96 ha con 35 km de red y 5672 usuarios. Además, presenta un rendimiento volumétrico del 77,7%.

El modelo matemático de la red de este distrito cuenta con 252 nudos y 391 tuberías. Además, este distrito ha sido dividido en 4 subsectores, tal y como se muestra en la figura 2.

Para la calibración de este caso fueron necesarias diez iteraciones. De ellas, tres correspondieron al ajuste del coeficiente global del emisor; no siendo necesario realizar la segunda calibración del patrón de consumos luego del ajuste de las pérdidas de carga en la red.

La simulación 0 corresponde a la primera simulación del problema de calibración, en la cual no se incluye emisor de fugas, y que es utilizada para obtener el valor de presión media de la red. La primera estimación del coeficiente emisor de fugas fue de $1,4274 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$, valor que repartido proporcionalmente entre los 251 nudos existentes resulta $5,687 \cdot 10^{-3} \text{ l/s(mca)}^{0.5}$ en cada nudo. A partir de la simulación 4 se define la curva de modulación de la demanda. La simulación 7 corresponde a la primera distribución espacial de las fugas, y en la simulación 8 se realizó la calibración de las pérdidas de carga de la red. Finalmente la simulación 10 corresponde al ajuste definitivo del valor global de emisor de fugas, cuyo valor fue de $1,5458 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$. Entre cada una de las simulaciones mencionadas fue necesario ajustar el emisor global de fugas.

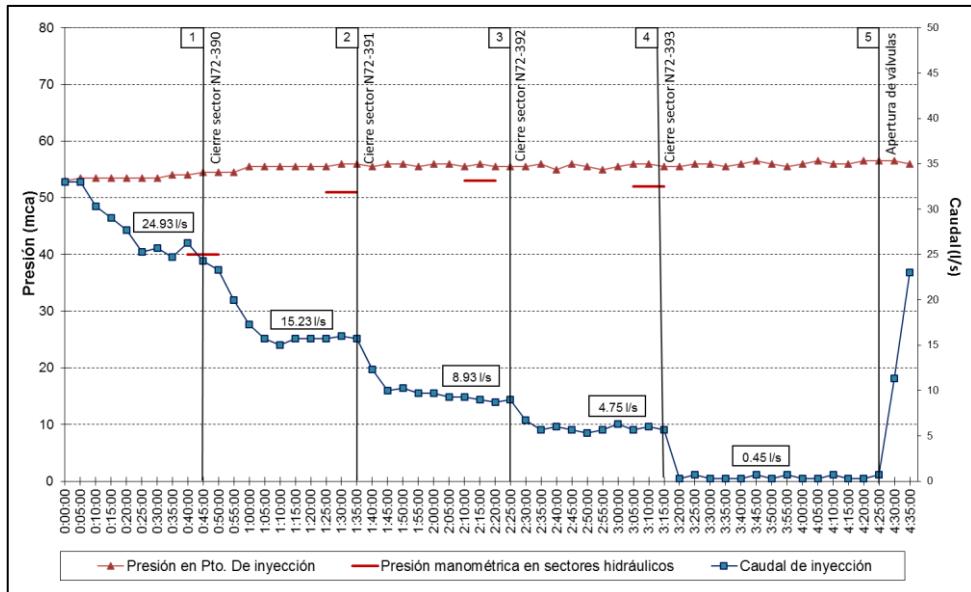


Figura 3 - Prueba de subdivisión del distrito de medición N72-M132.

La figura 3 muestra gráficamente los resultados de la prueba de subdivisión del Distrito de Medición N72-M132, realizada para obtener el caudal nocturno correspondiente a cada uno de los cuatro sectores hidráulicos definidos para distribuir espacialmente las fugas.

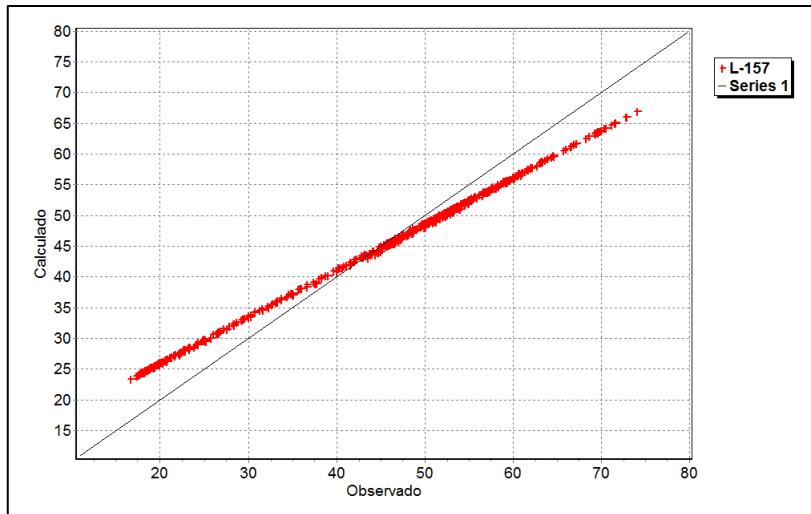


Figura 4- Correlación entre valores de caudal observados y simulados correspondiente a la simulación 1.

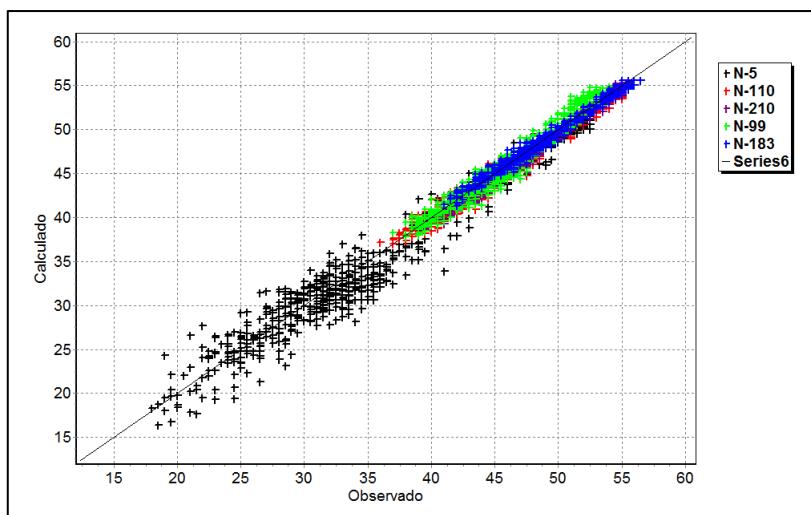


Figura 5- Correlación para el modelo hidráulico calibrado (simulación 10).

Para la calibración de las pérdidas de carga en la red se ajustaron los coeficientes de pérdidas de carga de 6 tuberías, y se definió como ‘cerrada’ una válvula próxima al nudo N-5 (sector N72-390). A continuación se incluyen los gráficos de correlación entre el caudal simulado y observado para la primera simulación (figura 4) después de realizar la calibración de las pérdidas de carga en la red (figura 5).

5. Conclusiones

Las aportaciones más relevantes que se pueden concluir del presente trabajo consisten en:

- Se ha presentado un método iterativo de rápida convergencia que supone una alternativa al uso de complejas técnicas matemáticas de optimización; simplificando el problema de la calibración de modelos hidráulicos.
- El método propuesto permite obtener una calibración preliminar de los modelos hidráulicos en redes con poca disponibilidad de información relativa a mediciones de caudal y presión.
- En los casos en los que exista una imposibilidad de realizar pruebas de campo para estimar los valores de los coeficientes de pérdida de carga, el método permite representarlas como pérdidas localizadas.
- Esto a su vez permite incluir en la calibración la falta de información fiable de la posición de las válvulas instaladas en la red de distribución.
- Se consigue igualmente el ajuste de la variación temporal de la demanda a partir de la variación temporal de las fugas.
- Distribuir los emisores de fugas en los nudos, de tal forma sea posible obtener una mejor aproximación del modelo hidráulico a las condiciones reales de operación de la red.
- Finalmente para validar la metodología propuesta, ésta se ha aplicado a un caso de estudio perteneciente al sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Guayaquil (Ecuador). El método ha demostrado una rápida convergencia en pocas iteraciones.

Agradecimientos

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Ciencia e Innovación de España, que ha financiado el proyecto de investigación DPI2009-13674 “OPERAGUA: Mejora de las técnicas de llenado y operación de redes de abastecimiento de agua”.

Referencias

- AWWA (2013). Committee Report: Defining model calibration. Journal of American Water Works Association, Vol. 105, No. 7, 60-63, Julio 2013.
- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models. Civil Engineering Systems, 2(3), 171-179.
- Shamir, U. y Howard, C. (1977). Engineering analysis of water distribution systems. Journal of American Water Works Association, AWWA, Vol. 69- 9, 510-514.
- Walski, T. (1983). Technique for calibrating network models. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 109- 4, Octubre 1983.