

Efecto del Conocimiento Catastral de una Red en su Calibración

Saldarriaga, Juan

Ingeniero Civil, MSc.

Profesor Titular Universidad de los Andes, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co.

Rodríguez, Daniel

Ingeniero Civil, MSc.

Investigador Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: d.rodriguez49@egresados.uniandes.edu.co.

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología

Sociedad Colombiana de Ingenieros

Bogotá D.C. 22, 23, y 24 de mayo de 2008

Resumen. En el presente trabajo se investigó el efecto de errores en el catastro de las redes de distribución en la modelación y calibración de sus modelos hidráulicos. Se describe la metodología desarrollada y los resultados obtenidos para determinar el efecto de los errores en el comportamiento hidráulico del modelo, para calibrar modelos con errores importantes en el catastro y determinar el número de tubos no importantes en las redes probadas. El resultado de la investigación demuestra que el Índice de Resiliencia está relacionado con la magnitud del efecto del error en el catastro. La metodología propuesta para la calibración permite obtener modelos que representen el comportamiento real del prototipo e identifican la zona donde se presentó el error; se pueden modelar y calibrar modelos con varios errores no importantes en el catastro validando el uso de modelos esqueletizados.

Palabras clave. Redes de distribución, Calibración y Catastro de Redes.

1. Introducción

La preservación de los recursos naturales se ha convertido en una necesidad a nivel mundial ya que su explotación se ha realizado de manera descontrolada e ineficiente. Las empresas prestadoras del servicio de agua potable han tomado conciencia en que deben invertir más tiempo y dinero en programas que permitan optimizar las actividades de operación y mantenimiento de las redes de distribución de agua potable con el fin de minimizar las pérdidas debidas a defectos en acometidas domiciliarias, rupturas o conexiones ilegales. Dentro de los procesos de optimización, se encuentran las metodologías que utilizan modelos hidráulicos calibrados.

Para poder realizar el proceso de calibración se tiene que contar con una gran cantidad de información catastral y topológica de la red de distribución. Con esta información se genera un modelo hidráulico preliminar; los resultados que arroje este modelo son comparados con los medidos en campo y de esta manera se generan los escenarios de calibración para poder ajustar todos los parámetros, de manera que éste represente el comportamiento real de la red. El presente trabajo de investigación pretende determinar el efecto que tiene el nivel de conocimiento del catastro de la red de distribución sobre los resultados que entregan las simulaciones del modelo hidráulico y sobre los resultados finales de la calibración.

Un error catastral se puede catalogar en: elementos existentes en el prototipo y no identificados en los planos, o en elementos existentes en los planos con datos erróneos. Este trabajo se limitó a investigar la primera, en el caso de tuberías existentes en la realidad pero que no se encuentran en el modelo. Los resultados de esta investigación permitirán comprender mejor el problema de calibración para lograr que se concentren los esfuerzos y recursos en las actividades críticas. También le aportará información importante al experto en calibración, en cuanto a la identificación de las respuestas del sistema ante errores en el catastro.

2. Objetivos

Determinar el efecto que tienen diferentes tipos de errores en el catastro de las redes de distribución de agua potable en su comportamiento hidráulico y en los resultados finales de un proceso de calibración.

Determinar si un sistema esqueletizado permite una buena modelación hidráulica y llegar a resultados consistentes en la calibración.

3. Definiciones

3.1. Calibración redes de distribución

La calibración del modelo de una red de distribución de agua potable consiste en ajustar una serie de parámetros que gobiernan su comportamiento hidráulico, de forma tal que éste sea capaz de representar de manera adecuada las mediciones que se realizan en campo. Es un problema altamente indeterminado que se conoce como un problema no determinístico polinomial duro (NP-Hard).

El proceso de calibración consiste en investigar las respuestas de la red frente a unos escenarios, definidos por una serie de modificaciones al modelo original. A través de la generación de diferentes escenarios es posible comprender el comportamiento del sistema, lo cual permite identificar los sectores o los grupos donde ocurren las alteraciones más significativas que permiten que el modelo represente al prototipo de manera adecuada.

Los parámetros de calibración considerados por la metodología desarrollada por el CIACUA (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados) se pueden separar en variables hidráulicas y variables topológicas. Entre las variables hidráulicas se tienen las demandas desconocidas y los emisores, mientras que en las variables topológicas se tienen los cambios en los diámetros internos de las tuberías, la rugosidad y las pérdidas menores.

3.2. Metodología de calibración del CIACUA

La calibración de un modelo consiste en ajustar los parámetros que gobiernan su comportamiento hidráulico, de forma tal que éste sea capaz de representar adecuadamente al prototipo. Los parámetros de calibración considerados por la metodología se separan en: variables hidráulicas (demandas desconocidas y los emisores) y variables topológicas (diámetros, rugosidad y las pérdidas menores). El algoritmo se presenta en la Figura 1.

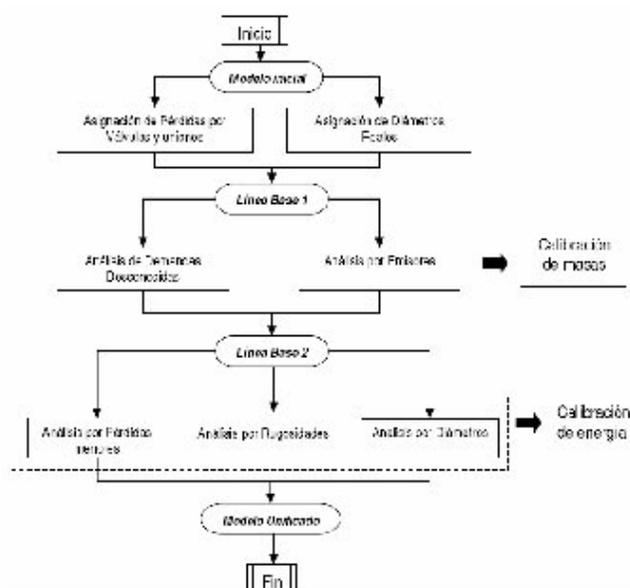


Figura 1. Algoritmo de calibración del CIACUA. (CIACUA, 2006)

3.3. Índice de Resiliencia

El Índice de Resiliencia se presenta en la Ecuación 1. Se define teniendo en cuenta que el incremento de la potencia por unidad de peso de operación del sistema durante las condiciones de falla puede ser conocido si la potencia por unidad de peso disponible para ser disipada por el sistema excede la que realmente disipa el mismo (Araque, 2006).

$$Ir = 1 - \frac{P_{int}}{P_{int}^{max}} = \frac{\gamma \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot (H_j - H^*)}{\left[\gamma \sum_{i=1}^{n_e} Q_i \cdot H_i + \sum_{k=1}^{n_p} P_k \right] \cdot \gamma \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot H_j} \quad [1]$$

donde P_{int} = potencia disipada por la red; y P_{int}^{max} = máxima potencia que puede ser disipada por la red para garantizar la demanda Q y la presión mínima H^* requerida en cada nodo. La presión mínima en el caso colombiano corresponde a 15 mca.

4. Determinación del Comportamiento Hidráulico del Modelo con Errores en el Catastro

Para determinar cómo afecta el conocimiento del catastro de la red el comportamiento hidráulico del modelo, se tomaron las redes de distribución de agua potable de los municipios de Andalucía, La Cumbre y Candelaria en el Valle del Cauca. Para efectos de la investigación, estas redes representan exactamente al prototipo y sus resultados fueron tomados como los que se medirían en los proyectos de Determinación del Plano Óptimo de Presiones y de Calibración de redes. También se tomó como condición real la topología y catastro tal como está en el modelo, es decir, estas redes se conocen en su totalidad. A partir de esto, se modificó el catastro de las redes de acuerdo con qué tubos generan una mayor vulnerabilidad o no en la red de distribución (medida en términos del cambio que genere el error en el Índice de Resiliencia comparado con la red inalterada); con esto se investigó el comportamiento hidráulico de las redes con diferentes tipos de errores en el catastro (con tubos importantes y no importantes faltantes).

Para evaluar el efecto que tienen estos errores en el catastro, se tomaron como los datos reales los que se simulan con las redes inalteradas. Estos valores se comparan con los simulados con los diferentes modelos con errores. De esta manera se determinó qué tipo de cambios afectan los comportamientos registrados en el modelo real, para cada uno de los nodos y tuberías de las redes probadas. A continuación se presentan los resultados obtenidos para la red de Andalucía Alta, los cuales fueron corroborados con la redes de La Cumbre y Candelaria.

4.1. Red de distribución de Andalucía Alta

Se supone que se conoce la topología y el comportamiento hidráulico de todos los nodos y tubos del sistema. A este modelo se le determinó el I_r , de acuerdo con la ecuación 1, siendo igual a 0.8645 que corresponde a una red poco vulnerable con una alta redundancia.

Luego se cerraron (acción equivalente a que no existan) las tuberías que no dejen desconectado ningún nodo de la red y se calcula el I_r . Con esto se encontró que se pueden cerrar independientemente 193 tuberías de las 360 tuberías existentes, el 53.6% de los elementos. Los resultados se presentan en la Figura 2, donde se muestran los errores relativos con respecto a la red inalterada.

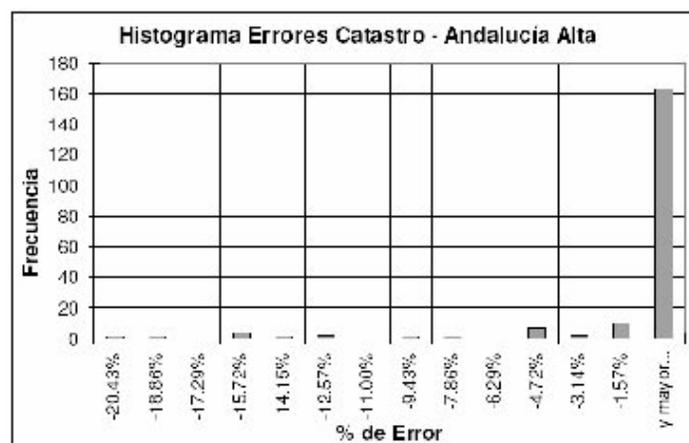


Figura 2. Histograma de frecuencia del I_r de Andalucía.

Estos resultados muestran que el ΔI_r siempre es negativo y que la mayoría de errores generados no tienen un efecto importante en el I_r de la red. El resultado negativo es esperado ya que la red se vuelve más vulnerable al perder uno de sus elementos para distribuir el agua, haciendo que el valor del I_r sea menor al

del sistema inalterado. También el gran porcentaje de errores en el catastro que no afectan el valor del h_r , hace pensar que estos elementos no son importantes para la modelación hidráulica y que su existencia no afecta los resultados globales de la calibración

De acuerdo con la Figura 2, se seleccionaron 20 escenarios de los 193 posibles para realizar los análisis. Se seleccionaron en todo el rango del Δh_r , donde se encontró que errores en el catastro muy cercanos (tuberías consecutivas), generaban comportamientos hidráulicos muy similares. Los 20 escenarios analizados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Escenarios seleccionados para la investigación de la red de Andalucía.

ID Tubo	Índice de Resiliencia Red Inalterada					0,8645
	Longitud (m)	Díametro (mm)	k_s (mm)	f_r	$\%f_r$	
1	232	3,57	101,6	0,0015	0,6878	-20,4%
2	218	84	101,6	0,03	0,6957	-19,3%
3	55	101,5	152,4	0,03	0,7163	-17,2%
4	152	2,51	152,4	0,03	0,7261	-16,0%
5	215	3,51	101,6	0,0015	0,7115	-14,2%
6	172	130	152,4	0,03	0,7452	-13,8%
7	179	61	101,6	0,03	0,7736	-10,5%
8	180	103	101,6	0,03	0,7852	-9,17%
9	114	78	101,6	0,03	0,8139	-5,85%
10	86	95	101,6	0,03	0,8212	-5,01%
11	131	60	101,6	0,03	0,8342	-3,51%
12	192	57	101,6	0,0015	0,8387	-2,99%
13	241	18	101,6	0,0015	0,8477	-1,94%
14	162	5	76,2	0,03	0,8559	-1,00%
15	185	92	76,2	0,03	0,8598	0,55%
16	201	144	101,6	0,0015	0,8628	-0,20%
17	164	91	50,8	0,03	0,8641	0,05%
18	178	14	76,2	0,0015	0,8645	0,00%
19	120	91,5	50,8	0,03	0,8645	0,00%
20	305	45	76,2	0,0015	0,8645	0,00%

En la Figura 3 se presentan los resultados de los análisis realizados a todos los nodos y tuberías, de las 20 redes con errores (Tabla 1) comparados con la red inalterada de Andalucía. Se grafica el porcentaje de nodos que presentan un R^2 superior al 85% (valor límite donde se considera que el modelo representa adecuadamente lo que ocurre en el nodo analizado de la red inalterada).

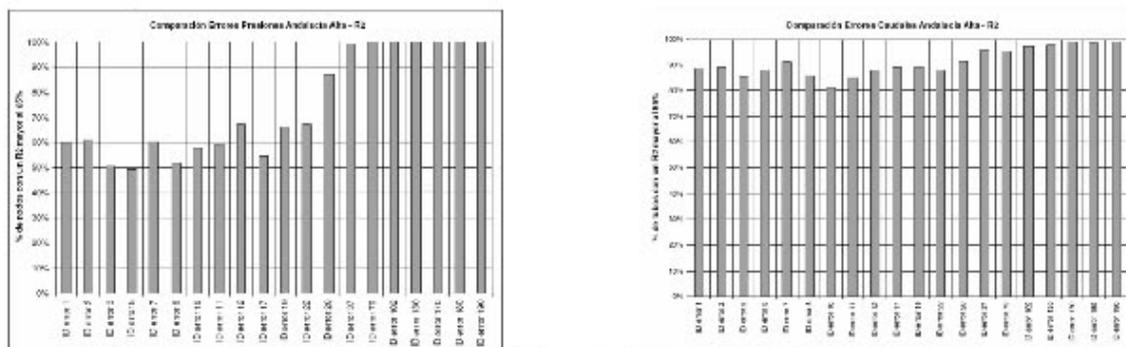


Figura 3. Comportamiento hidráulico de todos y tuberías de las redes analizadas.

Se puede observar que los modelos con errores que generan Δh_r altos, tienen un efecto mayor sobre los nodos de presión en el sistema, haciendo que no puedan representar adecuadamente la presión en los

nodos. También se puede observar que a medida que el ΔI_r disminuye, el porcentaje de nodos con un R^2 mayor al 85% aumenta. También se identifica que se incrementa el porcentaje de tubos con un R^2 mayor al 85% a medida que el ΔI_r disminuye, pero nunca logra representar completamente el comportamiento hidráulico del sistema. Esto se debe a que cambios poco importantes no generan un cambio en las presiones del sistema porque se suministra un mismo caudal demandado y por la redundancia de las redes se logra simularlas perfectamente, pero aún siendo un error pequeño cambia radicalmente la dirección y magnitud del flujo en la tubería cerrada y en sus alrededores.

5. Determinación de los Resultados en la Calibración de Modelos con Errores en el Catastro

Las metodologías de calibración suponen que las redes no tienen errores en el catastro, donde las variables de calibración son los Emisores, Demandas Desconocidas, Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores, lo cual en la práctica resulta imposible de cumplir debido a su complejidad y tamaño. Por esta razón se desarrolló una variación a la metodología, donde se logró generar resultados adecuados en la calibración de modelos con un error importante en el catastro (ΔI_r alto).

Se encontró que la variación propuesta logra compensar las pérdidas de energía generadas por los errores importantes en el catastro, por medio de la asignación de diámetros mayores en la zona donde se encuentra el problema. Este es un resultado muy importante ya que se logró obtener modelos calibrados que representan adecuadamente las redes inalteradas (a pesar de haber sido calibrados con errores) y se identificaron las zonas donde ocurren.

La variación consiste en ampliar los rangos de los diámetros internos dentro de los escenarios de calibración, ya que se limitaban al máximo desgaste o crecimiento de biopelículas en tuberías con el diámetro dado en el catastro. Esto fue necesario ya que esta fue la única variable de calibración que logró que los modelos con errores pudieran reproducir adecuadamente las curvas de caudal y presión. Además se propuso que durante el proceso de calibración, se identifiquen los puntos de medición de presión que están siendo afectados por errores importantes en el catastro y no se tengan en cuenta durante la calibración para llegar a la Línea Base 2.

Siguiendo las sugerencias descritas, se logró obtener un modelo que representa adecuadamente el comportamiento de la masa de la red y el de al menos un punto de medición de presión, mientras que en los puntos de medición de presión donde se tiene una gran influencia del error, se obtienen curvas de presión que están por debajo de la curva medida. Para continuar con el proceso de calibración se debe analizar el efecto de las variables topológicas, aunque durante los procesos de calibración no se espera que estas variables tengan un impacto importante, ya que las variaciones no pueden estar por fuera de los rangos lógicos establecidos de acuerdo con la suposición de tener modelos sin errores en el catastro. Pero los resultados de esta investigación demostraron que cuando se tiene un modelo con un error importante en el catastro, la única forma de calibrar el sistema es permitiendo aumentos en los diámetros, ya que estos compensarán las pérdidas de energía generadas por el error. A continuación se presentan los resultados obtenidos para un modelo con un error importante de la red de La Cumbre. Éstos también fueron corroborados con la redes de Andalucía Alta y Candelaria.

5.1. Red de distribución de La Cumbre

Para comprender el efecto de los errores en el catastro en los resultados de la calibración se eliminó el tubo ID 220, que es el tubo cerrable más importante de la red de distribución de agua de La Cumbre. Este error genera la mayor variación en el Índice de Resiliencia (ΔIr de -13.09%), es decir es el tubo que afecta de la mayor manera el comportamiento hidráulico de la red. Seguidamente se realizó el proceso de calibración con las variaciones propuestas donde se encontraron los siguientes resultados.

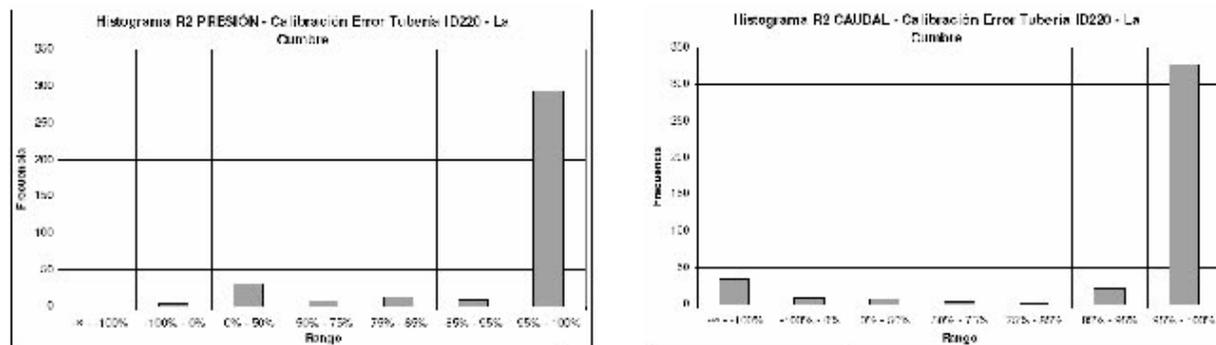


Figura 4. Comportamiento hidráulico de todos y tuberías de la red de La Cumbre.

En la Figura 4 se presentan los resultados de todos los nodos y tuberías, donde se presenta la frecuencia de elementos con un valor del R^2 dado unos rangos establecidos. Se puede observar que el modelo calibrado con un error en el catastro puede reproducir el comportamiento del 83.7% de los nodos del sistema y el 86.4% de los caudales de las tuberías con un R^2 mayor o igual al 85%.

Estos resultados demuestran que la metodología logra compensar las pérdidas de energía generadas por los errores importantes en el catastro por medio de la asignación de diámetros mayores en la zona donde se presenta el error. Este resultado permite obtener modelos calibrados que representan adecuadamente las redes e identificar la zona donde ocurren estos errores.

Se concluye que la metodología logra calibrar un modelo con errores, que representa adecuadamente la hidráulica del prototipo. Esto hace que no sea necesario repetir los procesos de calibración cuando se encuentren errores en el catastro, ya que el algoritmo logra repartir el efecto generado por el error en una de las variables de calibración.

6. Determinación del Número de Errores No Importantes en la Modelación y Calibración

Para determinar el número de errores no importantes en el catastro que permiten modelar adecuadamente las redes de distribución, se modificó el catastro de las redes inalteradas de acuerdo con los tubos que generan la menor vulnerabilidad en el sistema (ΔIr bajo). Para evaluar el efecto que tienen estos errores, se compararon los valores simulados por los modelos con errores no importantes con las redes inalteradas.

6.1. Red de distribución de Candelaria

Para esta red se encontró que se pueden eliminar 70 tubos de los 567 existentes (un 12.35% del total) sin que se afecte en forma considerable el valor del Ir con respecto a la red inalterada. El valor del Ir de la red con 70 errores fue de 0.90066, mientras que el Ir de la red inalterada fue de 0.90153. En la Figura 5 se indica cuáles fueron las tuberías que no se tuvieron en cuenta para la modelación hidráulica; en ésta se

puede apreciar que los tubos no importantes se encuentran lejos de la salida de los tanques y en zonas donde existen circuitos de flujo que hacen que tengan una alta redundancia.



Figura 5. Ubicación de los 70 errores no importantes generados en la red de Candelaria.

Calculando las curvas de presión y caudal para cada uno de los nodos y tubos de la red inalterada y con errores, se calcularon los coeficientes de bondad de ajuste y se realizaron histogramas de frecuencia donde se muestra el porcentaje de elementos dentro de un rango determinado del R^2 . En la figura 11 se presentan los resultados de todos los nodos y tuberías de la red, donde se presenta la frecuencia de elementos con un valor del R^2 dado unos rangos establecidos. Se puede observar que el modelo con errores puede reproducir el comportamiento del 100% de las presiones en los nodos del sistema y el 71.6% de los caudales de las tuberías con un R^2 mayor o igual al 85%.

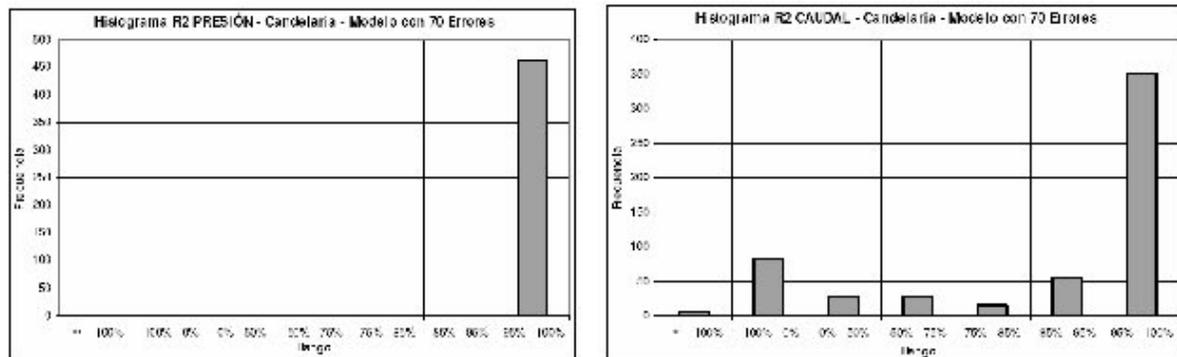


Figura 6. Comportamiento hidráulico de todos los nodos y tuberías de la red de Candelaria.

Al analizar estos resultados se puede concluir que el comportamiento del modelo con errores no importantes es prácticamente igual al del modelo inalterado. Esto implica que se puede llegar a un modelo calibrado a partir de errores no importantes en el catastro de la red, que represente el comportamiento hidráulico real del prototipo. Esto demuestra que los modelos esqueletizados, a partir del concepto de Resiliencia y calibrados con la metodología desarrollada, logran resultados satisfactorios cuando se compara con el comportamiento real del sistema, haciéndolos operativos y aptos para poderlos utilizar en la toma de decisiones.

7. Conclusiones

Esta investigación demostró que las actualizaciones o construcción del catastro de las redes es un problema no resuelto, donde se tiende a cometer muchos errores. Por esto es necesario realizar investigaciones que permitan comprender el efecto que generan sobre la modelación y calibración.

7.1. Con respecto al comportamiento hidráulico

- El comportamiento hidráulico encontrado en las redes de distribución de agua potable con errores en el catastro determinó que los escenarios que generen un ΔI_r alto no son capaces de representar el comportamiento del sistema, afectando en mayor medida la presión. Cuando el error genera un ΔI_r bajo, no se presenta un efecto sobre la modelación hidráulica y el modelo representa perfectamente el comportamiento real del sistema.
- El porcentaje de error del I_r que generaron todas las redes probadas con diferentes errores en el catastro, siempre fue negativo y en la mayoría de los casos no tienen un efecto importante sobre la red. El valor negativo del ΔI_r es un resultado esperado, ya que es lógico que si se presenta un error la red se vuelva más vulnerable (ya que pierde uno de sus elementos para distribuir el agua) y esto hace que el valor del I_r sea menor al del sistema completo.
- Los modelos con errores en el catastro que producen ΔI_r muy altos generan errores muy importantes en el comportamiento hidráulico de los nodos de presión en toda la red, ya que la eliminación de la tubería hace que el flujo tenga que recorrer mayores distancias para suministrar las demandas perdiendo más energía que en la condición inalterada.
- En el caso del comportamiento hidráulico de la masa, ΔI_r muy altos no afectan de manera importante el flujo en las tuberías en redes donde predominan las demandas desconocidas (como en el caso de las tres redes estudiadas) pero debe generar mayores errores en redes con mucha presencia de emisores. Para ambos casos, errores en el catastro que generaron ΔI_r muy bajos no afectan el comportamiento hidráulico del sistema y se logra modelar adecuadamente las redes de distribución.

7.2. Con respecto a los resultados de calibración

- La calibración de modelos con errores importantes en el catastro permite obtener modelos calibrados que representan adecuadamente las redes e identifican la zona donde ocurren. La metodología de calibración responde a estos errores con la asignación de diámetros mayores en la zona donde se presentan, ya que esto logra compensar las pérdidas de energía generadas debido a que estos tubos alterados tienen menores pérdidas por fricción. Además, se debe identificar los puntos de medición de presión que están siendo afectados por errores, para limitar su validez en la calibración de la Línea Base 2.
- Los errores en el catastro hacen que el agua tenga que recorrer mayores distancias para suministrar las demandas de caudal a lo largo de toda la red, lo que genera que se produzcan mayores pérdidas por fricción. Al aumentar los diámetros del grupo donde ocurren estos errores, se compensa esta pérdida adicional de energía con el ahorro de energía perdida por fricción al tener diámetros mayores en el sistema. Esta acción logra que la calibración del modelo con un error importante en el catastro, logre representar perfectamente las curvas de medición de caudal y presión y además logra identificar la zona donde se produjo este error.

7.3. Con respecto a los errores no importantes

- Esta investigación demostró que se puede modelar y calibrar modelos con varios errores no importantes en el catastro. Se encontró que las tuberías que generan un ΔI_r mínimo no afectan el comportamiento

del sistema ni los resultados de la calibración, validando el uso de modelos esquelizados. Tratar de incluir cada conexión domiciliaria, válvula y cualquier otro componente de un sistema grande en el modelo, demuestra que no se entiende el problema, dificulta su construcción y mantenimiento, y consume mucho tiempo, esfuerzo y dinero, sin que estos componentes tengan un impacto importante en los resultados de la modelación.

- Los modelos con errores no importantes en el catastro logran representar adecuadamente el comportamiento de la presión y caudal. Esto demuestra que se pueden tener modelos esquelizados operativos y que la metodología desarrollada logra identificar las tuberías importantes y no importantes de las redes de distribución, donde se puede corroborar la información sobre los principales elementos de la red y se pueden descartar los no importantes para así obtener modelos menos complejos pero igual de funcionales.
- Se puede llegar a un modelo calibrado a partir de una topología con errores no importantes en el catastro de la red, donde se logra obtener modelos funcionales, que sirvan como herramientas operativas y para la toma de decisiones.

8. Referencias

- Araque, D. A. *Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones*. Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia. 2006.
- Bahadur, R. Johnson, J. Janke, R & Samuels, W. *Impact of Model Skeletonization on Water Distribution Parameters as Related to Water Quality and Contamination Consequence Assessment*. Environmental and Water Resources Institute (EWRI) American Society of Civil Engineers. 2006.
- Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA. *Diseño e Implementación del Plan Estratégico de Manejo de las Redes de Distribución de Agua Potable de los Municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Bolívar, Bugalagrande, Candelaria, Ginebra, Guacarí, La Cumbre, y Toro*. Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia. 2006.
- Cist, D.B. & Schutz, A.E. *State of Art for Pipe & Leak Detection*. Geophysical Survey Systems, Inc. 2001.
- Cortés, O. J. *Calibración de redes de tuberías utilizando lógica difusa*. Universidad de Los Andes. 2005.
- Franco, L.E. *Comportamiento de diferentes ecuaciones de fricción en los problemas de calibración de redes de distribución de agua potable*. Tesis de Maestría. Universidad de Los Andes. 2005.
- Jurado, C. M. *Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable*. Tesis de Maestría, Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia. 2007.
- Leal, F. *Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas*. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes. 2003.
- Perelman, L. & Ostfeld, A. *Aggregation of Water Distribution Systems for Contamination Detection*. Environmental and Water Resources Institute (EWRI) American Society of Civil Engineers. 2006.
- Rodríguez, D. *Estado del Arte para Evaluar las Metodologías de Detección y Localización de Fugas en Sistemas de Distribución de Agua Potable*. Tesis Pregrado. Universidad de Los Andes. 2005.
- Saldarriaga, Juan G. *Hidráulica de Tuberías*. Bogotá, Colombia: McGraw Hill, 2001.

- Strasser, A. Hale, B. & Koval, E. *Denver Water's System Especific Study for the Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule*. Environmental and Water Resources Institute (EWRI) of the American Society of Civil Engineers. 2005.
- Todini, Ezio. *Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Design*. Urban Water. Vol. 2. September 2000: 115 – 122.
- Walski, C. L. Chase, D. A. & Savic, D. A. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Primera edición. Haestad Press. 2001.