

Calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto El Gato

Ing. Patricia Bosch Fuentes

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de la Habana (EIPHH)

Email: patricia@hidraulicos.cu

Ing. Iosvany Alberto Recio Villa

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae)

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), La Habana

Email: recio@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

El presente trabajo muestra la calibración y simulación del sistema fuente de abasto de agua del acueducto El Gato. La metodología de calibración concebida integra un modelo matemático basado en un algoritmo genético (GA) y la simulación con el software EPANET. Para la calibración se empleó una función de ajuste que minimiza las diferencias entre las mediciones en el sistema y los resultados simulados con EPANET. El aporte principal del trabajo es la estimación de los parámetros como rugosidad de las tuberías, coeficientes de las fugas existentes y demandas reales en el sistema. Finalmente, se demostró que se alcanza un nivel adecuado de calibración del modelo y mediante el proceso de validación se evaluó la capacidad del mismo para reflejar el comportamiento del sistema ante un escenario de operación diferente.

Palabras clave: abasto de agua, algoritmos genéticos, calibración, simulación.

Calibration and simulation of the source system for El Gato water supply aqueduct

ABSTRACT

This work presents the calibration and simulation of the source system for El Gato water supply aqueduct. The methodology of calibration integrates a mathematical model based on a genetic algorithm (GA) with the simulation based on EPANET software. An objective function that minimizes the differences between measurements in the system and the results simulated with EPANET was used for calibration. The main contribution of the work is parameters estimation such as pipe roughness, coefficients of existent leaks and real demand in the system. Finally, it is demonstrated that an adequate level of calibration is attained and that by means of the validation process the capability of the model was evaluated to reflect the behavior of the system under different operating conditions.

Keywords: water supply, genetic algorithms, calibration, simulation.

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos aplicados a los sistemas de distribución de agua (SDA) han alcanzado gran aceptación por parte de la comunidad científica, convirtiéndose en herramientas casi indispensables para el diseño, gestión y explotación de los mismos. Este logro ha sido posible fundamentalmente por la capacidad de los modelos matemáticos de reproducir con adecuada precisión la dinámica de los SDA. La habilidad de modelar los SDA ha mejorado considerablemente en las últimas tres décadas debido al desarrollo de la computación aplicada al campo de la ingeniería hidráulica, permitiendo que se simulen las condiciones de flujo y carga hidráulica dentro de un SDA, Savic and Walters (1995). Entre las aplicaciones de los modelos de los SDA se destacan la capacidad de realizar diseños económicos, evaluar la calidad del agua, estrategias y alternativas de operación, realizar análisis de vulnerabilidad y estudios de calibración (Wu et al. 2002). Tal es el conocimiento que brindan los modelos matemáticos aplicados a los SDA que han sido utilizados para romper paradigmas y demostrar que las redes malladas pueden ser más baratas que las redes ramificadas si se incluyen dentro de la formulación matemática para el diseño de estas últimas el costo asociado al abasto alternativo mediante pipas producto del fallo de una tubería en la red ramificada (Martínez 2008).

Sin embargo, para que un modelo pueda ser utilizado con confianza para la evaluación de un SDA debe ser previamente calibrado, Massimo and Del Giudice (1999). En este sentido, el proceso de calibración de un SDA consiste básicamente en ajustar parámetros que permitan que los resultados brindados por el modelo se correspondan con los datos medidos en el sistema, (Walski et al. 2001). El problema de la calibración de los SDA es un asunto complejo debido a los parámetros que deben ser estimados y la no linealidad de las ecuaciones de flujo, Savic and Walters (1995). En los últimos años, la tendencia de las investigaciones para la calibración de modelos de SDA de elevada complejidad se dirige al desarrollo de modelos matemáticos automáticos capaces de minimizar las diferencias entre los valores medidos en el sistema y los simulados por los modelos, (Walski 2001).

En correspondencia con lo mencionado anteriormente, los procedimientos de calibración más alentadores hasta la fecha se basan en la optimización. Varias son las técnicas de optimización aplicadas a problemas de calibración de los SDA que han demostrado cierta eficacia en la estimación de parámetros logrando buenas soluciones. En este campo uno de los procedimientos más utilizados actualmente son los llamados algoritmos evolutivos. Dentro de éstos se encuentran los Algoritmos Genéticos (GA) inventados por John Holland a mediados de los años 70 e inspirados en el proceso de evolución biológica. Los GA utilizan el principio de selección natural para resolver problemas de optimización y se basan en seleccionar aleatoriamente una población inicial que se evalúa en la función objetivo del problema a resolver, luego se seleccionan a los individuos con mayor capacidad de adaptación que se realiza en dependencia del valor de cada uno en la función objetivo, éstos se cruzan entre sí y se forman nuevos individuos que a su vez son descendientes de los primeros y también se evalúan en la función objetivo, de esta manera se establece la competencia entre los individuos para seleccionar los más capaces.

En los últimos años se han desarrollado los GA para muchas aplicaciones ingenieriles en el campo de la ingeniería hidráulica. En este sentido Takahashi et al. (2010) desarrollaron un GA para el diseño óptimo de un sistema de distribución de agua en la ciudad de Candelaria en Colombia. También Gupta et al. (2005) desarrollaron un GA basado en la fiabilidad para el diseño óptimo de un sistema de abastecimiento de agua.

Muchas aplicaciones exitosas basadas en GA e implementadas en modelos que solucionan el problema de la calibración de sistemas de abastecimiento de agua se han desarrollado en los últimos años, (Wu 1994). También Wu and Sage (2006) desarrollaron un modelo de calibración para detección de pérdidas de agua en una red de distribución de agua, así mismo Vitkovsky et al. (2000) desarrollaron un modelo de calibración para detección de fugas de agua en redes de distribución de agua en situaciones de transitorios hidráulicos.

En los inicios, los modelos matemáticos de optimización implementados en GA y aplicados a la calibración de los SDA se limitaban a determinar las rugosidades de las tuberías a partir de ajustar las cargas piezométricas y caudales en el sistema (Wu et al. 2002). Actualmente se han desarrollado modelos más poderosos que también determinan las magnitudes de las fugas de agua y las demandas reales en los sistemas de distribución de agua. En este sentido destaca el modelo desarrollado para la calibración de los SDA propuesto en Wu et al. (2002) que se encuentra implementado en WaterCAD.

MODELO DE CALIBRACIÓN

El modelo implementado tiene un algoritmo de calibración, desarrollado para facilitar el proceso de calibración de un (SDA). El problema de optimización tiene asociado una función de ajuste para la calibración que consiste en minimizar las diferencias de la suma de cuadrados de las cargas hidráulicas y caudales en el sistema, donde además se consideran factores de ponderación para los caudales y las cargas hidráulicas.

$$F(x) = \sum_{NH=1}^{NH} W_{NH} \left(\frac{Hsim_{NH} - Hobs_{NH}}{Hobs_{NH}} \right)^2 + \sum_{NQ=1}^{NQ} W_{NQ} \left(\frac{Qsim_{NQ} - Qobs_{NQ}}{Qobs_{NQ}} \right)^2 \quad (1)$$

Los factores de ponderación se definen según se muestra en las ecuaciones 2 y 3.

$$W_{NQ} = f \left(\frac{Hloss_{nh}}{\sum Hloss_{nh}} \right) \quad (2)$$

$$W_{NH} = f \left(\frac{Qobs_{nq}}{\sum Qobs_{nq}} \right) \quad (3)$$

Donde: $F(x)$: Función de ajuste a minimizar, $Hobs_{NH}$: Carga hidráulica observada en el nodo, $Hsim_{NH}$: Carga hidráulica simulada en el nodo, $Hloss_{NH}$: Pérdida de carga en el punto de medición, $Qobs_{NH}$: Caudal medido en una tubería, $Qsim_{NH}$: Caudal simulado en una tubería, W_{NH} : Factor de ponderación de las cargas hidráulicas, W_{NQ} : Factor de ponderación de los caudales.

MODELO DE SIMULACIÓN

El algoritmo de simulación utilizado es el Método del Gradiente, que se encuentra implementado en EPANET. A continuación se presentan las ecuaciones gobernantes del modelo de simulación hidráulica.

En un sistema de tuberías con N conexiones y NF nodos fijos. Se expresa la relación pérdida – caudal en la tubería entre los nodos i y j de la siguiente forma.

$$H_i - H_j = h_{ij} \quad (4)$$

$$h_{ij} = RQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (5)$$

Donde: H : Carga hidráulica en los nodos, h : Pérdidas de carga, R : Coeficiente de pérdidas de energía, Q : Caudal, n : Exponente del caudal, m : Coeficiente de pérdidas en accesorios.

El coeficiente de pérdidas de energía tiene implícito el diámetro, rugosidad y longitud de la tubería, éste a su vez dependerá de la ecuación de pérdidas empleada entre William-Hazen y Darcy-Weisbach.

En el SDA se debe satisfacer la ecuación de continuidad para todos los nodos según se expresa en la ecuación 6.

$$\sum_j^i Q_{ij} - D_i - Q_e = 0 \quad \text{para } i=1..N \quad (6)$$

Donde: D_i : Demanda puntual de caudal en el nodo i , Q_{ij} : Caudales entrantes y salientes de cada nodo, Q_e : Caudal debido a las fugas de agua en el nodo i .

El caudal debido a una fuga de agua puede ser modelado como un emisor y determinado según la ecuación 7.

$$Q_e = K * P^n \quad (7)$$

Donde: Q_e : Caudal debido a las fugas de agua, K : Coeficiente de fugas de agua, P : Presión en el nodo que representa a la fuga de agua, n : exponente de la presión que caracteriza la fuga de agua (generalmente es igual a 0.5).

Por convenio, el signo de los caudales pertenecientes a las demandas y fugas de agua se considera positivo. El Método del Gradiente para resolver el conjunto de ecuaciones expuestas anteriormente, comienza con un valor inicial de caudales estimados en cada tubería que no tiene por qué satisfacer las ecuaciones de continuidad. Mediante un proceso iterativo, el método corrige los caudales en las tuberías de manera que se cumpla la ecuación de continuidad en todos los nodos del sistema. Cumplida esta condición, en una segunda etapa el método determina las cargas hidráulicas y presiones en los nodos, así como pérdidas de energía y velocidades en las conducciones.

CASO DE ESTUDIO: SISTEMA FUENTE DEL ACUEDUCTO EL GATO

El sistema fuente del acueducto El Gato se encuentra ubicado en el pueblo Catalina de Güines, en la provincia Mayabeque. Dicho sistema tiene asociada una población estimada en 380 000 habitantes y realiza una entrega de aproximadamente 7,668 hm³/mes desde el acuífero que existe en la cuenca subterránea Jaruco- Aguacate. El sistema fuente está compuesto por un campo de pozos con 17 estaciones de bombeo, de las cuales 12 se utilizan para la operación y 5 como reserva. El bombeo desde el campo de pozos se realiza hasta un depósito estabilizador del

bombeo (TRP) de 5000 m³ mediante una conductora de acero (L-4) de Ø 1500 mm. Desde el TRP el suministro se realiza aprovechando la gravedad mediante una conductora de Ø1600 mm de hormigón con centro acero (L-5) hasta dos depósitos de almacenamiento, los conocidos depósitos principales (DP) de 30 000 m³ de capacidad cada uno. En la figura 1 se muestra la configuración topológica del sistema fuente, mientras que en la figura 2 se observa en detalle la configuración topológica del campo de pozos. En la figura 1 se puede observar que el sistema tiene entregas en ruta a cuatro pequeños poblados (Zaragoza, Rotolactor, Chivería y El Triángulo) que en total abastece a 1200 personas. También se pueden observar las principales fugas de agua (S) que existen en el sistema fuente, ubicadas durante el proceso de medición de campo. Nótese en las figuras 1 y 2 la localización espacial de las fugas (S) en las tuberías L-1, L-2, L-3 y L-5, desde S-1 hasta S-10.

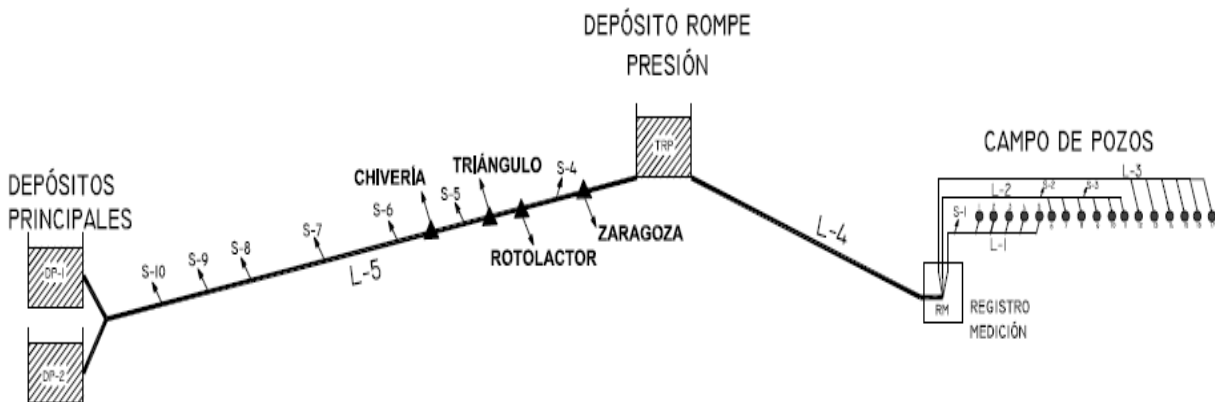


Figura 1. Configuración topológica del sistema fuente del acueducto El Gato

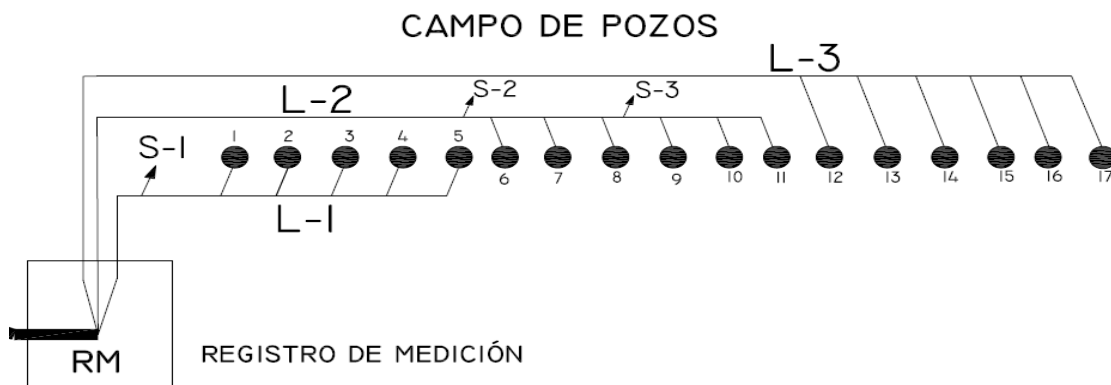


Figura 2. Configuración topológica del campo de pozo del acueducto El Gato

El presente caso de estudio tiene la particularidad de tener fugas de agua (S), que hidráulicamente se modelan como emisores. Anteriormente en la ecuación (7) se mostró la relación existente entre el caudal de una fuga de agua (Q_e), la presión (P) y el coeficiente de fuga de agua (K). Cuando se realiza un estudio de calibración de un SDA en rigor y se incluyen las fugas presentes en el sistema, el parámetro (K) debe ser calibrado. Esto es así debido a que un cambio en la rugosidad de las tuberías cambiaría la presión actuante en la fuga de agua, variando también el caudal de la misma, de igual manera ocurre con los caudales de circulación en todas las tuberías de la red, aún siendo ésta ramificada. Es por este motivo que es necesario en el presente estudio de calibración el empleo de un modelo matemático que contemple la calibración

de la rugosidad (C) en las tuberías, demandas (D) en los nodos y el coeficiente de fugas de agua (K).

SIMULACIÓN INICIAL Y COMPARACIÓN CON LAS MEDICIONES DE CAMPO

Generalmente y antes de proceder a la calibración de un modelo de un SDA resulta aconsejable realizar una simulación inicial con el objetivo de comprobar que la conectividad de los elementos y componentes del SDA es correcta y que los resultados son lógicos para un modelo sin ajustar (Fuentes et al. 2002).

La rugosidad (C) en las conducciones, demandas (D) en los nodos y coeficiente de fuga de agua (K) que inicialmente se insertaron en el modelo para realizar la simulación inicial fueron seleccionados atendiendo a valores lógicos reflejados en literatura técnica especializada en SDA.

Se dispone de dos mediciones realizadas en el sistema, la primera el 12 de Enero de 2012 y la segunda el 2 de Mayo de 2012. En este sentido se selecciona la primera medición para realizar la simulación inicial y efectuar la calibración, y la segunda para posteriormente realizar el proceso de validación. La simulación inicial se realiza con el modelo EPANET, especializado en simulaciones hidráulicas de redes de agua a presión. A continuación en la tabla 1 se muestran los resultados donde se pueden observar las diferencias entre los valores medidos en el sistema y los resultados obtenidos de la simulación inicial con EPANET.

Tabla 1. Resultados de la simulación inicial

Estación de Bombeo	Hmedida	Hsimulada	Qmedido	Qsimulado	ΔH	ΔQ
	m	m	L/s	L/s	L/s	L/s
EB-1	157	156,05	174	127	0,95	47
EB-2	156,8	155,57	219	268	1,23	-49
EB-3	156,5	155,98	218	220	0,52	-2
EB-4	FUERA DE SERVICIO					
EB-5	157,5	156,19	210	188	1,31	22
EB-6	155,01	155,32	247	263	-0,31	-16
EB-7	FUERA DE SERVICIO					
EB-8	155,51	155,91	184	207	-0,4	-23
EB-9	156,93	156,73	207	181	0,2	26
EB-10	156,97	156,65	256	256	0,32	0
EB-11	157,16	157,00	218	224	0,16	-6
EB-12	FUERA DE SERVICIO					
EB-13	157,24	157,23	211	190	0,01	21
EB-14	157,2	156,46	247	257	0,74	-10
EB-15	157,6	157,00	194	214	0,6	-20
EB-16	157,19	156,53	219	229	0,66	-10
EB-17	FUERA DE SERVICIO					
Registro de medición (RM)	155,4	155,35	2700	2750	0,05	-50
Depósitos Principales (DP)	116,9	116,1	2600	2650	0,8	-50

En la tabla 1, **Hmedida** representa las cargas piezométricas calculadas a partir de sumar la cota topográfica y la presión medida en cada punto de medición, **Hsimulada** representa las cargas piezométricas obtenidas en cada punto de medición mediante la simulación con el modelo EPANET, ΔH es la diferencia entre **Hmedida** y **Hsimulada**, igualmente, **Qmedido** representa los caudales medidos en los puntos de medición, **Qsimulado** representa el caudal obtenido en cada punto de medición mediante la simulación con el modelo EPANET y ΔQ es la diferencia entre **Qmedido** y **Qsimulado**. En la tabla 1 se puede observar que no existen resultados anómalos, es decir las diferencias entre valores de cargas simuladas y observadas se pueden considerar lógicos, lo mismo sucede con los caudales. En el proceso de calibración estas diferencias deben ajustarse hasta lograr la mejor coincidencia posible.

METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN

A continuación en la figura 3 se observa la metodología utilizada para realizar el proceso de calibración y simulación del sistema.

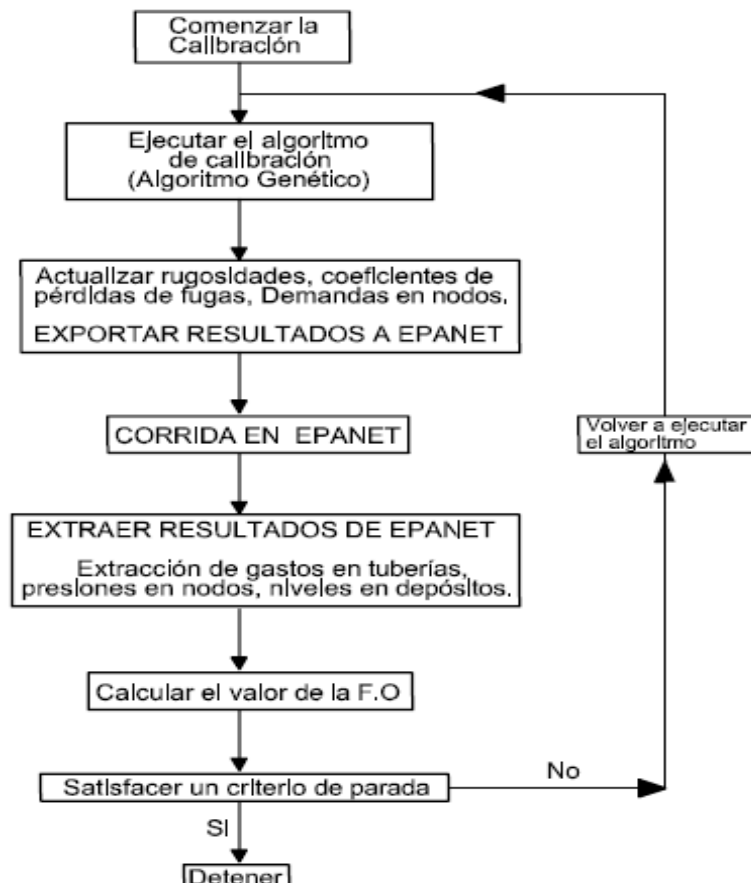


Figura 3. Esquema de la metodología de calibración y simulación

CALIBRACIÓN CON MEDICIONES DEL DIA 12 DE ENERO DE 2012

A continuación se detalla el proceso de calibración del sistema con las mediciones realizadas el 12 de Enero de 2012. En este día el sistema fuente se encontraba operando con 13 equipos de bombeo.

Es conocido que los modelos de optimización basados en GA requieren de una población de individuos, probabilidad de mutación y una cantidad máxima de iteraciones para encontrar una solución óptima (Walski 1985). En este caso se selecciona una población de 50 individuos, con una probabilidad de mutación del 1%. El algoritmo de calibración en el proceso de búsqueda de la solución óptima, requiere de acotar los intervalos factibles de solución para los parámetros a calibrar. En este aspecto el modelador debe tener la precaución de asignar intervalos factibles de solución de manera que se eviten resultados con ajustes numéricamente buenos donde aparezcan valores absurdos de los parámetros a calibrar, por ejemplo, $C=500$. En el modelo de calibración se establecieron intervalos inferiores y superiores a las rugosidades de las tuberías (C) entre 50 y 150, para el caso de los coeficientes de las fugas de agua (K) los límites se establecieron entre 0,2 y 20, mientras que para las demandas reales (D) los intervalos se establecieron entre 0,2 y 30.

Para tener la certeza que el ajuste realizado era adecuado, se realizó un proceso consistente en encontrar las iteraciones óptimas para las cuales el algoritmo de calibración no mejoraba el valor de la función de ajuste. En la figura 4 se observa que después de las 10000 iteraciones el modelo no refleja mejora en el valor de la función de ajuste, dicho valor fue de 1,085 después de las 10 000 iteraciones.

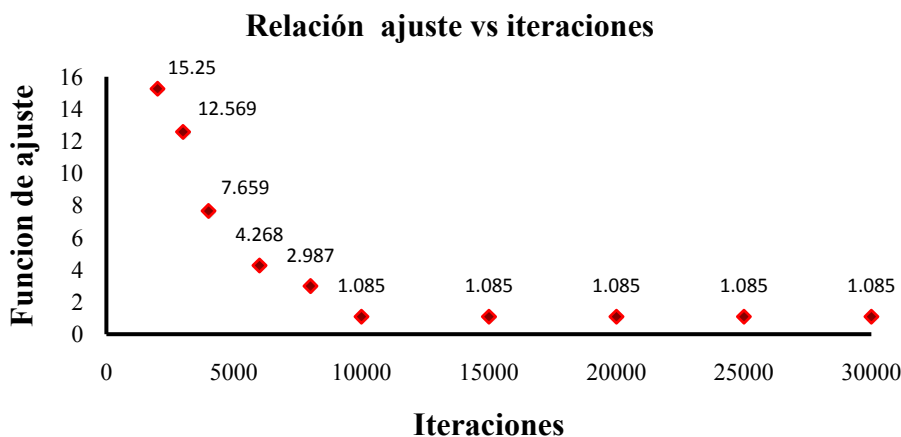


Figura 4. Relación ajuste vs iteraciones en el modelo de calibración

En la tabla 2 se muestran las rugosidades que inicialmente se insertaron en el modelo y las que se posteriormente se obtuvieron del proceso de calibración. Se puede observar que todas las rugosidades ajustadas presentan valores menores que las concebidas inicialmente, esto es así debido a que las rugosidades iniciales representaban valores reflejados en la literatura para tuberías prácticamente nuevas o con pocos años de servicio y en la calibración se ajustaron a valores más cercanos a la realidad, acorde a los casi 26 años de explotación del sistema.

En la tabla 3 se muestran las demandas de los consumidores asociados al sistema (Zaragoza, Rotolactor, Chivería y El Triángulo), nótese que las demandas ajustadas no tienen un peso significativo dentro del sistema, esto se debe a que se trata de consumidores con poca población, asociada a un sistema donde se trasiegan caudales en intervalos de 2700 L/s a 2800 L/s, demostrando que el consumo real de estos poblados no tiene una importancia sustancial en el estado de carga del sistema y por eso prácticamente las demandas no sufren cambios durante el proceso de calibración.

Tabla 2. Rugosidades iniciales y ajustadas con mediciones del 12 de Enero de 2012

FECHA	12 de Enero de 2012	
Tuberías	C inicial	C ajustada
L-1	130	117
L-2	130	100
L-3	130	117
L-4	100	90
L-5	130	120

Tabla 3. Demandas iniciales y ajustadas mediante la calibración

FECHA	12 de Enero de 2012	
Consumidores	Demanda inicial (L/s)	Demanda ajustada (L/s)
ZARAGOZA	3	2
TRIÁNGULO	1	0,5
ROTOLACTOR	1	1
CHIVERÍA	1	0,5

En la tabla 4, donde se muestran los coeficientes de las fugas (K), se puede observar que aumentaron significativamente, lo cual significa que el caudal que se pierde en los salideros es mayor que el que se estimó inicialmente.

Tabla 4. Coeficientes de los emisores iniciales y ajustados mediante la calibración

FECHA	12 de Enero de 2012			
Fugas	Coefficientes iniciales (K) (L/s/(m))^n	Coefficientes ajustados (K) (L/s/(m))^n	Qs iniciales (L/s)	Qs ajustados (L/s)
S-1	2,23	3,43	12,31	15,27
S-2	2,00	3,4	11,66	15,21
S-3	4,72	6,62	17,11	20,26
S-4	2,00	7,3	7,07	13,51
S-5	3,00	9	8,12	14,07
S-6	3,00	8,5	7,75	13,04
S-7	4,00	9	8,25	12,37
S-8	3,00	8	6,71	10,95
S-9	4,00	8,9	7,21	10,76
S-10	4,00	8,9	4,47	6,67
TOTAL	-----	-----	90,66	132,11

Una vez ajustados los parámetros en el proceso de calibración, éstos se introducen en el modelo de simulación de EPANET para evaluar la discrepancia existente entre los resultados medidos y simulados en cuanto a caudales y cargas piezométricas en el sistema.

En las tablas 5 y 6 se pueden observar las diferencias entre las cargas hidráulicas y caudales. De igual manera, en las figuras 5 y 6 se observan gráficos con la correlación existente entre las cargas piezométricas y los caudales donde se puede observar que existe una adecuada correspondencia en los resultados.

Tabla 5. Relación de cargas hidráulicas medidas y simuladas en EPANET

Estación de Bombeo	Hmedida	Hsimulada	ΔH	Error (%)
	m	m	m	
EB-1	156,40	156,05	-0,35	-0,22
EB -2	156,37	155,57	-0,8	-0,51
EB -3	155,66	155,98	0,32	0,21
EB -5	156,80	156,19	-0,61	-0,39
EB -6	155,01	156,32	1,31	0,85
EB -8	155,51	156,42	0,91	0,59
EB -9	156,93	156,73	-0,2	-0,13
EB -10	156,97	156,65	-0,32	-0,20
EB -11	157,16	156,68	-0,49	-0,31
EB -13	157,24	157,23	0,00	0,00
EB -14	156,87	156,46	-0,41	-0,26
EB -15	157,30	156,51	-0,79	-0,50
EB -16	157,19	156,53	-0,66	-0,42
Registro de medición (RM)	155,40	155,35	0,05	0,03
Depósitos Principales (DP)	116,90	116,90	0,00	0,00

Tabla 6. Relación de caudales medidos y simulados en EPANET

Estación de Bombeo	Qmedido	Qsimulado	ΔQ	Error (%)
	(L/s)	(L/s)	(L/s)	
EB-1	174	171	-3	-1,72
EB -2	229	226	-3	-1,31
EB -3	218	217	-1	-0,46
EB -5	210	213	3	1,43
EB -6	247	248	1	0,40
EB -8	184	183	-1	-0,54
EB -9	209	207	-2	-0,96
EB -10	256	250	-6	-2,34
EB -11	218	217	-1	-0,46
EB -13	211	213	2	0,95
EB -14	247	250	3	1,21
EB -15	204	207	3	1,47
EB -16	219	223	4	1,83
Registro de medición (RM)	2 651	2 622	-29	-1,09
Depósitos Principales (DP)	2600	2610	-10	-0,38

Existen criterios orientativos para decidir hasta donde es factible llevar a cabo un proceso de calibración en los SDA, estos criterios se aplican fundamentalmente a los caudales, presiones y cargas piezométricas.

Con respecto a la presión, una discrepancia entre valores medidos y simulados en los nodos del modelo de ± 1 m.c.a puede considerarse una buena aproximación (Fuertes et al. 2002). En este sentido, Walski et al. (2004), señala que la pérdida de carga proporcionada por el modelo no debe diferir en más de un 10-20 % de la medida en el campo. Por otra parte Allen (1987) plantea que en el 85% de los nodos el error relativo en las presiones y cargas piezométricas no debe ser superior de 5% y en el 95 % de los nodos no debe superar el 10%.

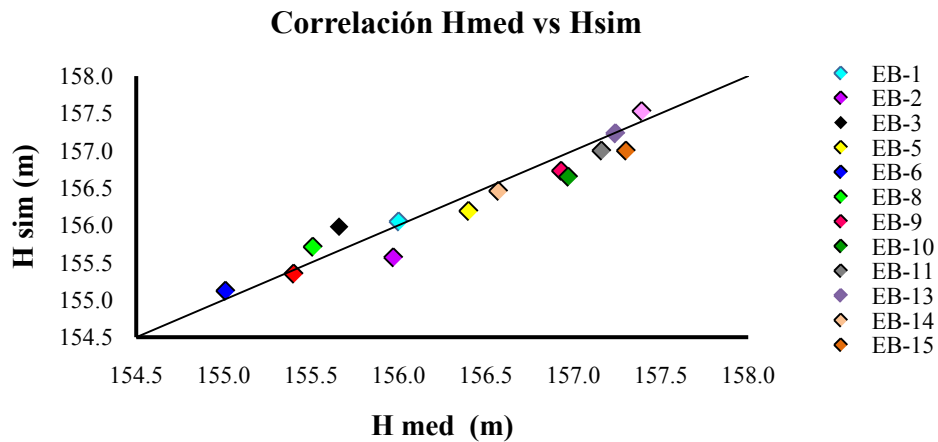


Figura 5. Correlación entre las cargas piezométricas medidas y simuladas

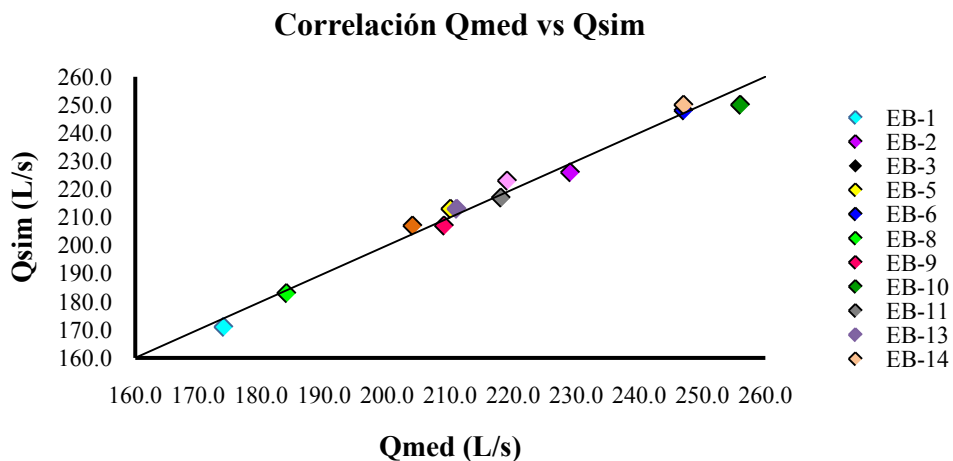


Figura 6. Correlación entre los caudales medidos y simulados

Al aplicar los criterios mencionados anteriormente y según los resultados obtenidos y reflejados en las tablas 5 y 6 y en las figuras 5 y 6, se evidencia que en el 100 % de los nodos el error relativo en las cargas piezométricas es menor del 5%, mientras que las diferencias entre las cargas piezométricas calculadas a través de mediciones y simuladas son menores que 1,50 m.c.a en el 100 % de los nodos de medición.

VALIDACIÓN DEL MODELO CON MEDICIONES DE 2 DE MARZO DE 2012

El conocimiento en cuanto al funcionamiento de los SDA que se adquiere mediante el uso de un modelo en ocasiones es más importante que realizar demasiadas iteraciones para lograr incrementar la precisión en el proceso de calibración del mismo, (Walski 2001). Debido a la complejidad y gran variedad de uso de los modelos de SDA, no pueden desarrollarse reglas rígidas para asegurar que un modelo esté adecuadamente calibrado. En este sentido debe comprobarse que los parámetros obtenidos del proceso de calibración permitan que el modelo matemático del SDA en estudio tenga la capacidad de reflejar adecuadamente el comportamiento

del SDA en diferentes escenarios de operación. Es por esta razón que se hace necesaria la validación del modelo del SDA en estudio para tener absoluta certeza de la validez de los valores de los parámetros estimados.

La validación del modelo matemático de un SDA, se lleva a cabo evaluando la capacidad del modelo calibrado de reproducir escenarios y estados de cargas diferentes con una precisión adecuada. En el proceso de obtención de los datos de campo se realizaron dos mediciones, como se apuntó con anterioridad. En la etapa de calibración resultaba conveniente seleccionar la medición del 12 de Enero de 2012 como fecha para calibrar el modelo, quedando la medición del 2 de Marzo de 2012 para la validación.

El 2 de Marzo de 2012 existía un escenario de operación diferente al del 12 de Enero de 2012 en el sistema fuente del acueducto El Gato. Con una simple comparación entre la tabla 1 y la tabla 7 se puede observar que el 2 de Marzo de 2012 las EB-4 y EB-12 se encontraban funcionando, mientras la EB-5 estaba fuera de servicio.

El proceso de validación se concreta en realizar una simulación con EPANET insertando los valores obtenidos de los parámetros rugosidad (C), demandas (D) y coeficiente de fugas (K) en la etapa de calibración. Una vez insertados los valores de los parámetros mencionados se realiza la corrida en EPANET pero con el escenario de operación existente en el sistema el 2 de Marzo de 2012. De esta forma se procede a evaluar la capacidad del modelo del SDA en estudio de reflejar adecuadamente un escenario de operación diferente en el sistema.

Según los resultados obtenidos en la tabla 7 se evidencia que en el 100 % de los nodos los errores relativos en cuanto a cargas piezométricas son menores de 5%, mientras que las diferencias entre las cargas piezométricas medidas y simuladas son menores que 1,50 m.c.a en el 100 % de los nodos de medición.

Tabla 7. Relación de caudales observados el 2 de Marzo de 2012 y simulados en EPANET

Estación de Bombeo	Qmedido	Qobservado	ΔQ	Error	H.observadas	H.simuladas	ΔH	Error
	(L/s)	(L/s)	(L/s)	(%)	m	m	m	%
EB -1	143	144	-1	-0,70	156,0	156,1	-0,05	-0,03
EB -2	206	206	0	0,00	155,8	155,6	0,20	0,13
EB -3	175	174	1	0,57	155,7	155,8	-0,12	-0,08
EB -4	177	178	-1	-0,60	156,2	156,2	0,05	0,03
EB -5	FUERA DE SERVICIO							
EB -6	219	214	5	2,34	155,0	155,1	-0,11	-0,07
EB -7	FUERA DE SERVICIO							
EB -8	176	173	3	1,73	155,5	155,7	-0,20	-0,13
EB -9	191	188	3	1,60	156,9	156,7	0,20	0,13
EB -10	229	228	1	0,44	157,0	156,9	0,12	0,08
EB -11	190	189	1	0,53	157,2	157,0	0,16	0,10
EB -12	246	244	2	0,82	157,0	156,9	0,15	0,10
EB -13	198	200	-2	-1,00	157,2	157,2	0,01	0,01
EB -14	244	244	0	0,00	156,6	156,5	0,11	0,07
EB -15	187	183	4	2,19	157,3	157,2	0,10	0,06
EB -16	217	219	-2	-0,90	157,4	157,5	-0,14	-0,09
EB -17	FUERA DE SERVICIO							
Registro de medición	2640	2630	10	0,38	155,4	155,4	0,05	0,03

En las figuras 7 y 8 se pueden observar los gráficos resultantes del proceso de validación donde se aprecia la adecuada correlación entre los caudales y las cargas piezométricas en las estaciones de bombeo del sistema.

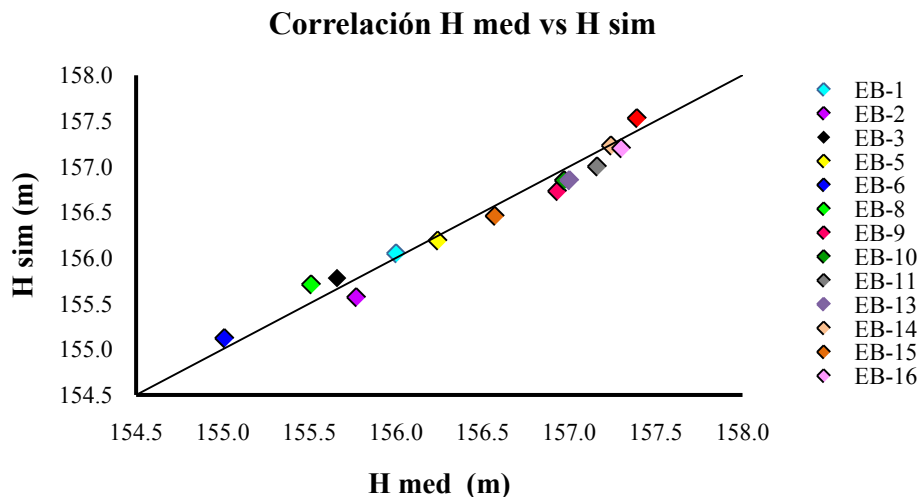


Figura 7. Correlación entre las cargas piezométricas medidas y simuladas

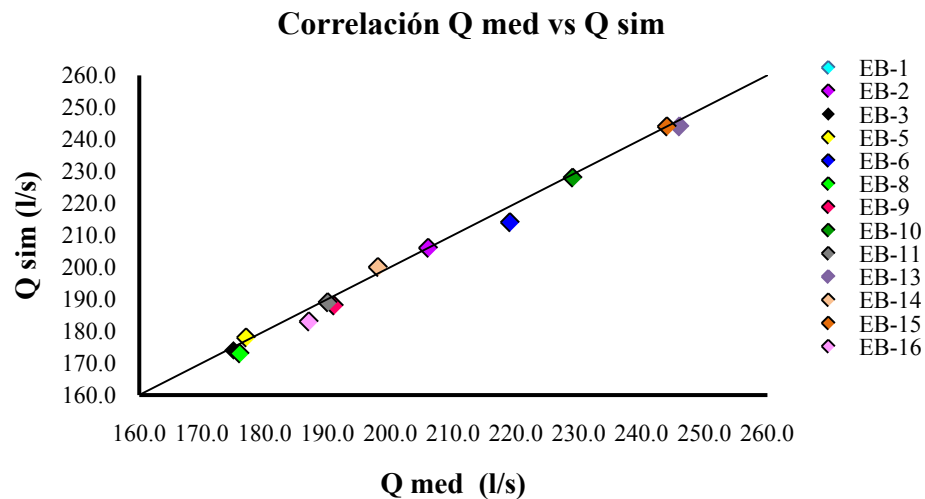


Figura 8. Correlación entre las cargas piezométricas medidas y simuladas

RESULTADOS Y DISCUSION

En el presente artículo se ha evidenciado una vez más la capacidad de un GA para llevar a cabo un estudio de calibración en un SDA, donde se ha sido posible estimar los valores de demanda de agua (D), rugosidades de las tuberías (C), los coeficientes de fugas de agua (K) y a través de estos últimos el caudal de las fugas de agua (Q_e).

El resultado alcanzado del proceso de obtención de las iteraciones óptimas para la calibración del SDA se considera muy bueno. En la figura 1 se observa que ha sido posible determinar que las iteraciones óptimas a utilizar para la calibración del modelo son 10000, para la cual se

obtiene un valor de la función de ajuste de 1,085. Numéricamente este valor de la función de ajuste es satisfactorio y refleja la calidad del proceso de calibración utilizando la medición del 12 de Enero de 2012.

La calidad de los parámetros estimados se puede considerar buena según los valores brindados por el algoritmo de calibración. En cuanto a las rugosidades de las tuberías (C) se obtienen valores en el intervalo entre 90 y 120. Estos valores están comprendidos dentro de los intervalos inferiores y superiores de búsqueda impuestos al algoritmo de optimización, entre 50 y 150. Nótese que el algoritmo encuentra una solución donde no existen valores de rugosidades (C) iguales a los intervalos inferiores y superiores, demostrándose una buena convergencia del algoritmo en el proceso de búsqueda. En cuanto a las demandas (D) de los poblados conectados al sistema se evidencia que no tienen un peso significativo dentro del estado de carga del sistema ya que ésta representa el 0,36 % del caudal de circulación. Mediante la estimación de los coeficientes de fugas de agua (K) ha sido posible determinar el caudal de fugas de agua (Q_e) en el sistema fuente en 132,11 L/s.

Después de analizar las comparaciones entre los resultados simulados y medidos para cada escenario (12 de Enero de 2012 y 2 de Marzo de 2012) durante los procesos de calibración y validación, y demostrarse que en el 100 % de los nodos los errores relativos en cuanto a cargas piezométricas son menores de 5%, y las diferencias entre las cargas piezométricas medidas y simuladas son menores que 1,50 m.c.a en el 100 % de los nodos de medición, se puede afirmar que el modelo está adecuadamente calibrado y validado, siendo éste capaz de reflejar con buena precisión diferentes condiciones de operación en el sistema.

CONCLUSIONES

- Se ha realizado la calibración y simulación del sistema fuente del acueducto El Gato, donde se observa una buena correlación para los caudales observados y simulados, al igual que para las cargas piezométricas medidas y simuladas.
- Como resultado del proceso de calibración mediante el uso de un GA, se obtuvieron las rugosidades actuales de las tuberías (C), coeficientes de los emisores (K) y las magnitudes de las fugas en el sistema.
- Se realizó un proceso de obtención de efectividad en la calibración mediante la búsqueda del valor mínimo de la función de ajuste mediante iteraciones en el modelo de calibración.
- Se dispone de un modelo fiable de análisis hidráulico del sistema fuente del acueducto El Gato implementado en EPANET.
- Se ha realizado la validación del modelo donde se demuestra la capacidad de éste para reflejar con buena confiabilidad diferentes estados de carga y escenarios de operación en el sistema.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por las siguientes instituciones: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Empresa de Acueductos y Alcantarillados del Este y la Dirección de Operaciones del Acueducto El Gato. También se desea agradecer al Ing. Nelson Fontanil, especialista de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado Este de La Habana y al Ing.

Ederman Viera, jefe de la fuente de abasto del acueducto El Gato por la amabilidad y cooperación y al Dr. Ing. José Bienvenido Martínez por sus consejos para enfrentar el trabajo realizado, que fue un estudio nuevo para los autores.

REFERENCIAS

- Allen R.** (1987). "Network analysis—the real story". III International Conference on applications for water supply and distribution. Ed Leicester Polytechnic, United Kingdom.
- Fuertes V. S., García-Serra L., Iglesias P. L., López G., Martínez F. J. y Pérez R.** (2002) "Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua", Ed. Grupo Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Gupta R., Balasubramaniyan G. and Nema A. K.** (2005) "Reliability-based optimal design of water distribution networks using genetic algorithm", XXXI IAHR Congress, September Vol.11, No 16, pp. 1269 – 1280, Seoul, Korea.
- Martínez J. B.** (2008). "Las redes malladas de abasto no son más caras (2ª parte)", VIII Seminario Ibero-americano, SEREA, DE-Vol. 43-2, pp. 681-688, Lisboa.
- Massimo G. and Del Giudice G.** (1999) "New approach to water distribution network calibration", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 8, ASCE, ISSN 0733-9429/99/0008-0849-0854, USA.
- Savic D. A. and Walters, G. A.** (1995). "Genetic algorithm techniques for calibrating network models", University of Exeter, Centre for Systems and Control Engineering, Report Number: 95/12, United Kingdom, Dec.
- Takahashi S., Saldarriaga J. G., Vega M. C. and Hernández F.** (2010). "Water distribution system model calibration under uncertainty environments" Journal of Water Science & Technology, Water Supply, Vol. 1, No 1, pp. 31 – 38.
- Vitkovsky J. P., Simpson A. R. and Lambert M. F.** (2000) "Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms". Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, July-August, Vol. 126, No. 4, pp. 1230-1238.
- Walski T. M.** (2001). "Understanding the adjustments for water distribution system model calibration." Journal of Indian Water Works Association, April-June, Vol. 4, No. 3, pp. 151-157.
- Walski T. M., Chase D. and Savic D.** (2004) "Acceptable levels of calibration". Currents Method, Haestad Methods, Vol. 1, No. 1, pp 4 – 12, USA.
- Walski T. M.** (1985) "Assuring accurate model calibration". Journal of the AWWA, Vol. 17, No. 12, pp 38-41, USA.
- Walski T. M., Chase D. V., Savic D. A., Grayman W. M. and Beckwith S.** (2001). "Advanced water distribution modeling and management", Haestad Press, Waterbury, USA.
- Wu Z. Y.** (1994). "Automatic model calibration by simulating evolution", M.Sc. Thesis, H.H. 191, International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering, Delft, Netherlands.
- Wu Z. Y., Walski T., Mankowski R., Herrin G. and Gurrieri R.** (2002). "Calibrating water distribution model via genetic algorithms". AWWAIM Tech Conference, DE-Vol. 4 -2, pp. 25-35, April 16-19, Kansas City, Missouri, USA.
- Wu Z. Y. and Sage P.** (2006) "Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration". Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis, Cincinnati, Ohio, August 27-30.