
LOCALIZACIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE OPTIMIZACIÓN CON *HARMONY SEARCH*

NOÉ RODRÍGUEZ MORENO, XITLALI DELGADO-GALVÁN, JESÚS MORA-RODRÍGUEZ Y GILBERTO CARREÑO AGUILERA

RESUMEN

Las fugas de agua en las redes de distribución de agua (RDA) ocasionan desperdicio del recurso y reducen la eficiencia física, comercial y global de los sistemas de abastecimiento de agua. En este artículo se describe una metodología propuesta para definir áreas potenciales para la localización de fugas en una RDA bajo condiciones reales, considerando como herramienta un programa computacional basado en la técnica evolutiva *Harmony Search* (HS). Esta utiliza como punto de partida un modelo hidráulico en *Epanet* que sea representativo de la

RDA y realiza comparaciones de manera iterativa hasta disminuir el error relativo existente entre las presiones medidas y las estimadas. Posteriormente se lleva a cabo una búsqueda exhaustiva con un método de búsqueda directa en el área potencial resultante de la metodología propuesta. Los resultados obtenidos muestran que con la aplicación de la metodología se logra optimizar el espacio de búsqueda e incrementar la efectividad de la localización de fugas no visibles y, con ello, la eficiencia física de la RDA.

En algunos casos, las pérdidas de agua en las redes de distribución de agua (RDA) superan el 30% del total del agua extraída de las fuentes de abastecimiento (Puust *et al.*, 2010; Chan *et al.*, 2018; Al-Washali *et al.*, 2019). En México, se registran pérdidas del 44,6% (IMTA, 2019). Estas pérdidas son atribuidas a errores de medición, robo del agua y, principalmente, a las fugas (Burn *et al.*, 1999).

Las pérdidas de agua se caracterizan como roturas y fugas de

fondo. Las roturas tienen una tasa individual $>0,5\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ a una presión aproximada de $\sim 5\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$. Las fugas de fondo tienen una tasa individual $<0,25\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (WRC, 2002).

La búsqueda de beneficios en términos de reducción de fugas, así como la extensión de la vida útil de la infraestructura, ha impulsado a las empresas de agua a realizar el control activo de la presión de servicio en las RDA (Creaco y Pezzinga, 2018). La detección de fugas no visibles requiere mediciones de campo de presión y caudal. Cuanto

más pequeña sea el área monitoreada, más fácil y rápido es detectar una fuga (Sophocleus *et al.*, 2019). Por ello, las RDA a menudo se dividen en áreas pequeñas llamadas ‘distritos hidrométricos’, que son más fáciles de monitorear y controlar (Moors *et al.*, 2018; Javadiha *et al.*, 2019).

Los métodos de detección de fugas se dividen en métodos de observación directa y métodos de inferencia. Los métodos de observación directa se basan en la inspección de las características de la tubería por observación

PALABRAS CLAVE / Eficiencia / Fugas / *Harmony Search* / Localización / Red de Distribución /

Recibido: 07/07/2021. Aceptado: 20/04/2022.

Noé Rodríguez Moreno (Autor de correspondencia). Ingeniero en Hidráulica, Maestro en Ciencias del Agua y estudiante de doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, Universidad de Guanajuato. Dirección: División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato. Av. Juárez No. 77. Guanajuato, Gto, México. e-mail: n.rodriguezmoreno@ugto.mx

Xitlali Virginia Delgado Galván. Maestra en Gestión Integral del Agua, Universidad Nacional Autónoma de México. Doctora en Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesora, Universidad de Guanajuato, México.

José de Jesús Mora Rodríguez. Maestro en Ingenierías, Universidad Nacional Autónoma de México. Doctor en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España. Profesor, Universidad de Guanajuato, México.

Gilberto Carreño Aguilera. Maestro en Química, Universidad Autónoma Metropolitana, México. Doctor en Ciencias Químicas, Erlangen-Nürnberg Universitaet, Alemania. Profesor, Universidad de Guanajuato, México.

visual o utilizando el equipo adecuado. La localización de fugas se realiza con frecuencia con equipos acústicos, tales como geófonos, correladores o registradores de ruido, y por métodos no acústicos como inyección de gas trazador, tecnología de radar de penetración en el suelo y fotografía infrarroja (Moors *et al.*, 2018). Los métodos acústicos son los más utilizados y los más rentables, pues se ha demostrado que son eficientes en diferentes tipos de material de tubería (Liston y Liston, 1992; Hunaidi y Chu, 1999), incluyendo materiales plásticos como el PVC, que es el material más común en las redes de distribución en México (CONAGUA, 2007). Los métodos de inferencia se basan en el monitoreo de los parámetros de la tubería interna, es decir, presión, flujo y temperatura; y la aplicación de un modelo matemático que, a partir de los datos registrados, realiza la detección de fugas. Diversos autores han propuesto modelos de optimización para la localización de fugas, tales como los algoritmos genéticos (Sang y Hyundong, 2003; Jung Soo *et al.*, 2012; Membretti y Orsi, 2012) y el enjambre de partículas (Ni *et al.*, 2013; Casillas *et al.*, 2015).

El objetivo de este artículo es optimizar el espacio de búsqueda y localización de fugas. Se propone una metodología híbrida, combinando un método de inferencia y uno de observación directa. El método de inferencia se basa en la técnica evolutiva *Harmony Search* (HS), la cual fue inicialmente propuesta por Geem (2000) y aplicada para resolver el problema de optimización del diseño de las RDA (Geem *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2015). También ha sido aplicado a proyectos de gestión de la presión en RDA (De Paola *et al.*, 2017), para la localización de fugas en RDA mediante la instalación de correladores, de manera particular y en combinación con otras técnicas evolutivas (Sang y Hyundong, 2003; Sang *et al.*, 2006; Jung Soo *et al.*, 2012). El método de observación directa que se empleó es el geófono, pues es relativamente económico y eficiente en diferentes tipos de tubería.

Metodología Propuesta

La metodología plantea cuatro etapas: i) calibración hidráulica del modelo de la RDA, ii) esqueletización del modelo, iii) optimización del modelo HS para la estimación y ubicación de las fugas, y iv) localización de fugas en áreas potenciales con geófono.

Se realizó una comparativa entre las presiones del modelo estimadas por Epanet (Rossman *et al.*, 2000) y las presiones medidas en diferentes

sitios de la RDA, cuando se tiene la menor variación y los valores más elevados de las presiones. El caudal mínimo nocturno (CMN) en las RDA se identifica normalmente entre las 2:00 y las 4:00, cuando la mayoría de los usuarios se encuentran inactivos y el flujo en este momento es predominantemente causado por fugas (Farley y Trow, 2003; Puust *et al.*, 2010).

Calibración del modelo

La certidumbre de este método depende en gran medida de la calibración hidráulica de la RDA, por lo cual se consideran los siguientes supuestos: 1) Todas las pérdidas de agua son consideradas como fugas. 2) Las diferencias de presiones entre lo medido en campo y lo obtenido en el modelo calibrado es únicamente debido a las fugas. 3) El error de medición en los datos históricos de la RDA es mínimo o tiende a cero.

Inicialmente se debe revisar la infraestructura existente en la RDA para la construcción del modelo hidráulico de Epanet y seleccionar estratégicamente los sitios óptimos para instalar los registradores de presión. Es indispensable conocer las demandas en los puntos de consumo, por lo que se debe instalar mínimo un caudalímetro a la entrada de la RDA.

La calibración del modelo se realiza en estado cuasi-estacionario y la ubicación de las fugas resulta del análisis de las diferencias entre caudales nocturnos y los consumos estimados a la misma hora en el sector (Al-Washali *et al.*, 2019).

Esqueletización del modelo

Una vez que se tiene el modelo calibrado y se conoce el funcionamiento de la RDA, se realiza una esqueletización del modelo calibrado para hacer más eficiente el método de búsqueda y disminuir el tiempo de simulación, al eliminar elementos del modelo bajo las siguientes consideraciones (Bartolín, 2013): 1) Combinación de nodos próximos. 2) Asociación de tuberías en serie y/o paralelo. 3) Nodos que representen la conexión de válvulas de compuerta. 4) Eliminación de ramificaciones en la red, sustituyéndolas por un nodo en la línea principal. 5) Eliminación de tuberías de distribución de diámetro pequeño.

El espacio de búsqueda de fugas no visibles en la aplicación del método de optimización mediante HS se realiza en nodos virtuales que se generan

al centro de cada uno de los tramos de tubería del modelo esqueletizado, además de los nodos del modelo.

HS aplicada a la estimación y ubicación de fugas

La optimización de búsqueda de fugas se basa en la técnica evolutiva HS, la cual trata de imitar la improvisación que sigue una orquesta musical cuando busca una armonía perfecta. El método trata de encontrar cada vez una mejor armonía, que viene representada por una función 'aptitud' (FA), la cual hay que minimizar (Geem, 2000).

Para estimar el caudal de agua fugado en las RDA se asume que toda el agua que se pierde es a causa de las fugas físicas. Entonces, al conocer el caudal de entrada y las demandas en los nodos en el instante del CMN, se puede estimar el caudal fugado. La distribución de las demandas en los nodos de las redes reales se lleva a cabo mediante el método de los polígonos de Voronoi que emplea el programa QGIS.

El caudal total de fugas se usa para definir el rango de valores de demanda que se podrá asignar a los nodos, el cual no podrá ser mayor a la suma del caudal de demanda real en el nodo de consumo más el caudal total de fuga, ya que si alguno de los caudales de demanda es mayor al máximo se estaría proponiendo una solución fuera de los valores medidos, aunque no necesariamente equivocada. Siendo este intervalo la tasa de ajuste del tono (PAR, por sus siglas en inglés de *pitch adjustment rate*), pues serán los valores que pueden ser elegidos para formar las partituras del problema de optimización.

Al conocer el PAR, se forma de manera estratégica (no aleatoria) la memoria armónica (HM, por sus siglas en inglés de *harmony memory*) con los vectores solución. Lo anterior es con la finalidad de evitar que el algoritmo converja hacia un mínimo local y se tenga siempre la capacidad de buscar el óptimo global. Esto se logra garantizando que cualquier valor estará disponible para ser elegido durante todas las simulaciones. Al tener la población inicial de partituras, con la simulación en el programa Epanet se obtienen los valores de las presiones en cada nodo de la RDA. La FA determina que tan buena o mala es cada partitura simulada, siendo la Ec. 1 la que obtiene mejores resultados y en menor cantidad de tiempo, ya que se logra reducir hasta en un 86,46% el tiempo de solución en comparación con otras

$$FA(X_i) = \sum_i^n |ho_i - hs_i| + (0,5 * \sum_i^n |Q_{sum} - \sum Q_{dsi}|) \quad (1)$$

donde $FA(X_i)$: FA para el arreglo de demandas j , que se evalúa en la HM; ho_i : presión objetivo (PO) en el nodo i ; hs_i : presión simulada (PS) en el nodo i ; Q_{sum} : caudal suministrado a la red; y Q_{dsi} : caudal de demanda simulado en el nodo i .

Una vez completa la HM, se propone una nueva partitura y se evalúa con la FA. Si es mejor que alguno de los arreglos de la HM, entonces toma su lugar, de lo contrario, se desecha.

El algoritmo se repite hasta que se cumple con el número de iteraciones o cuando se cumple la condición de paro, que en este caso es cuando las PS son igual a las PO. El proceso del algoritmo HS se muestra en la Figura 1.

Localización de fugas en áreas potenciales

La definición de las áreas potenciales para la localización de fugas se lleva a cabo con la solución propuesta del algoritmo descrito a partir de las demandas resultantes de la optimización en los nodos. Considerando que se obtiene como área potencial, aquella donde en las líneas o tramos de tubería que el algoritmo asigne demanda a los nodos virtuales y que se calculará su área en función de la longitud de tubería. La localización de las fugas se realiza mediante el método de búsqueda directa con geófono en las áreas potenciales generadas. En caso de identificar algunas fugas, se registra el punto de ocurrencia y la magnitud de éstas. Los recorridos de exploración con geófono se realizan durante el horario del CMN.

Terminado el proceso de localización de fugas con el método de búsqueda directa y en el caso que se hayan identificado y reparado fugas, se procede a medir nuevamente los parámetros para estimar los beneficios obtenidos con el desarrollo de la metodología.

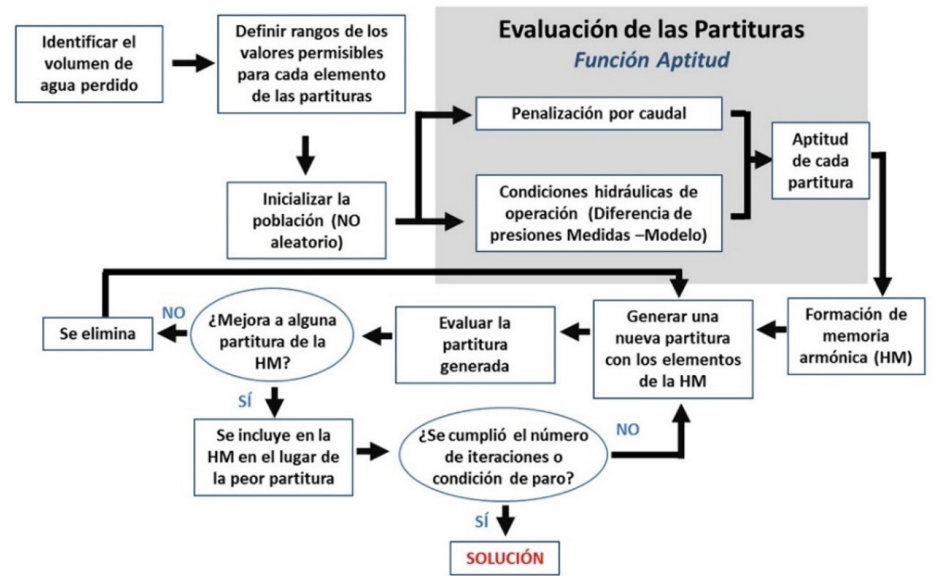


Figura 1. Optimización para la localización de fugas mediante HS.

Aplicación de la Metodología Propuesta y Resultados

La metodología se aplicó a tres RDA, dos teóricas y una real. Las RDA teóricas son el Ejemplo 1 de Epanet y la red de Hanoi; la RDA real se ubica en la ciudad de Guanajuato, México.

Aplicación en RDA Ejemplo 1 de Epanet

La RDA Ejemplo 1 de Epanet consta de un embalse, un tanque, una bomba, nueve nodos y 12 tramos de tubería que acumulan 19.353,94m de longitud. Se consideró la presencia de tres fugas en cinco escenarios de caudal de fuga: a) 3,155; b) 1,577; c) 0,631; d) 0,315; y e) 0,063 litros por segundo (LPS) cada una, ubicándose en los tramos de tubería 111,

121 y 31 de la red. El caudal consumido en la RDA es de 69,41 LPS.

La RDA fue simulada considerando la FA de la Ec. 1. Al llevar a cabo los cinco escenarios se observa que los errores de las presiones medidas y las estimadas convergen a cero en todos los casos (Tabla I), lo cual muestra que el programa es capaz de localizar el área como potencial de fuga a pesar de que se manejen eficiencias físicas elevadas y caudales que se consideran en la clasificación como fugas de fondo, ya que se simularon caudales por debajo de 0,0694 LPS (WRC, 2002).

Al analizar los resultados obtenidos se observa que el área potencial para búsqueda y localización de fugas es diferente en todos los escenarios, pero presenta una tendencia sobre los tramos

TABLA I
RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PARA LA RED EJEMPLO 1

Parámetro	3,155 LPS	1,577 LPS	0,631 LPS	0,315 LPS	0,063 LPS
Q suministrado (LPS)	78,875	74,143	71,303	70,357	69,599
Q consumido (LPS)	69,410	69,410	69,410	69,410	69,410
Q fugado total, (LPS)	9,465	4,733	1,893	0,947	0,189
Eficiencia física	88,00%	93,62%	97,35%	98,65%	99,73%
No. fugas obtenidas	7	6	7	9	9
ID de elementos con fuga	111;121;31	111;121;31;21;122	10;111;121;31	111;121;31;10;11;21	111;121;31;21;122
Longitud con posible fuga (km)	4,828	8,047	6,437	12,838	8,047
% reducido	75,05%	58,42%	66,74%	33,67%	58,42%
% área potencial, de búsqueda	24,95%	41,58%	33,26%	66,33%	41,58%
Error promedio (presiones) %	-0,08522%	-0,00649%	-0,01094%	-0,00778%	-0,00003%

111, 121 y 31 de la RDA (Figura 2), pues todos los escenarios recaen en los elementos que conforman esos tres tramos. La Tabla I muestra el análisis de cada escenario.

Aplicación en RDA de Hanoi

La red de Hanoi fue propuesta inicialmente por Fujiwara y Khang (1990) y ha sido mayormente empleada para resolver el problema del diseño. Esta red consta de un embalse, 31 nodos y 34 tramos de tubería que suman 39.420m. El caudal suministrado es de 5.558,76 LPS. En esta red se planteó un escenario en particular, en el cual se ubicaron dos fugas de 10 LPS en los tramos 12 y 22, con la finalidad de validar que a mayor tiempo de cómputo se obtienen mejores soluciones. Al procesar los resultados de las diferentes simulaciones se identifica que los tramos 12 y 22 son los únicos que aparecen en todos los casos, por lo cual se definen como los tramos con potenciales fugas, logrando reducir el espacio de búsqueda al valor mínimo posible para el escenario planteado (Figura 3).

A pesar de que la eficiencia física de la RDA es elevada, el algoritmo optimiza los espacios de búsqueda de una manera efectiva. En este caso, al tratarse de fugas de mayor tamaño que a las propuestas en la red del Ejemplo 1, el algoritmo propuso el caudal fugado exacto en todas las simulaciones, pues la penalización por diferencia de caudal afecta considerablemente en estos casos. Se puede observar que conforme incrementa el número de iteraciones se reduce el error entre las PO y las PS (Tabla II).

Aplicación en RDA sector Las Teresas, condiciones reales

Con la finalidad de validar la metodología propuesta, se llevó a cabo el análisis bajo condiciones reales de una RDA del Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG), en la ciudad de Guanajuato, México, correspondiente a la colonia Las Teresas (5.500 habitantes). Esta RDA se alimenta con un tanque superficial de 400m³ de almacenamiento, tiene 46 válvulas (2 reductoras de presión y 44 de compuerta). La longitud de los tramos suma 8.824,57m (con diámetros de 2 a 10 pulgadas) y material diverso (galvanizado, asbesto y en su mayoría PVC). Revisando la información del agua que se suministró en el sector durante el periodo de análisis (20.159,28m³/mes) y la que se facturó a la RDA (11.992,75m³/mes), se estimó una eficiencia física inicial del 59,49%.

Previo a la aplicación del algoritmo, se llevó a cabo una revisión del catastro para la construcción del modelo hidráulico en Epanet y con ello tener una representación confiable del sector. Posteriormente, se realizó una esquematización del modelo hidráulico sin que se vieran afectados los valores de las cargas de presión en los nodos del modelo, con la finalidad de reducir nodos en la

red (se pasó de 271 nodos en el modelo completo a 135 en el modelo esqueletizado). De esta manera se disminuyó en un 51,07% el rango de la matriz HM y con ello se optimizó el proceso de cálculo del algoritmo HS. Se seleccionaron siete sitios estratégicos para instalar registradores de presión con data logger y tomar lecturas cada 15min durante una semana. De igual manera se instaló un caudalímetro a la

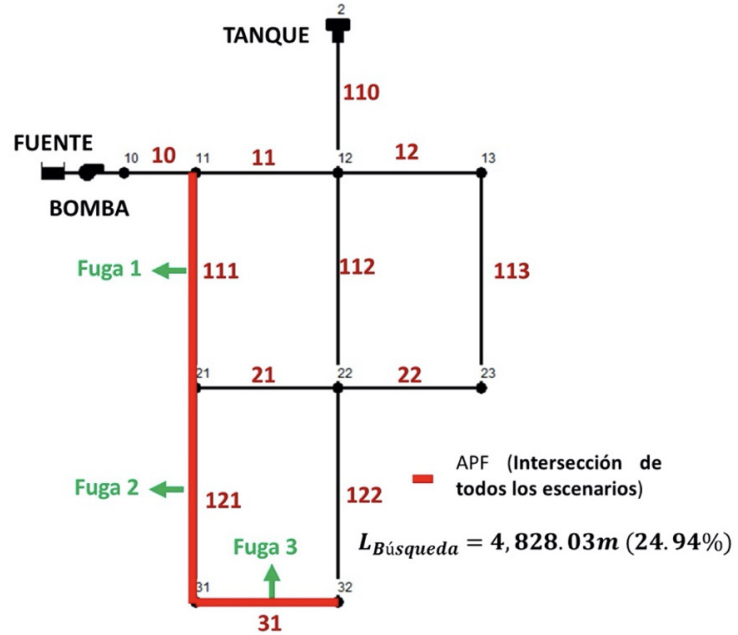


Figura 2. Área potencial de fugas en los cinco escenarios del Ejemplo 1 de Epanet.

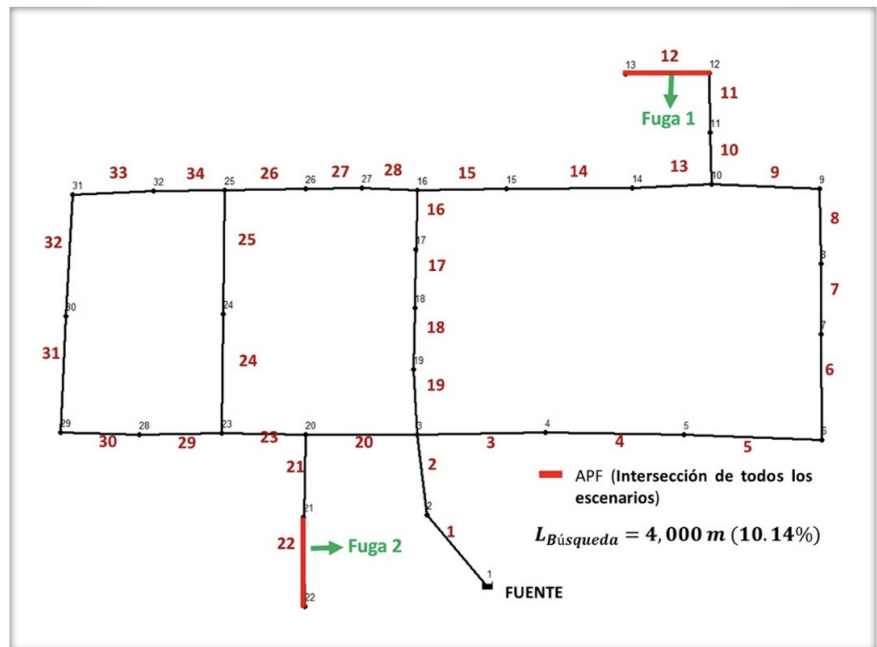


Figura 3. Área potencial. de fugas en la red de Hanoi, resultado de las simulaciones.

TABLA II
RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS DIFERENTES SIMULACIONES PARA LA RED DE HANOI

Parámetro	500 K	1 M	1.5 M
Q suministrado (LPS)	5558,760	5558,760	5558,760
Q consumido (LPS)	5538,760	5538,760	5538,760
Q fugado total. (LPS)	20,000	20,000	20,000
Eficiencia física	99,64%	99,64%	99,64%
No. fugas propuestas	8	5	5
ID de elementos con fuga	3; 4; 12; 21; 22; 25; 26	8; 9; 11; 12; 13; 14; 22	4; 12; 22
Longitud con posible fuga (km)	7,925	8,825	5,130
% reducido	79,90%	77,61%	86,99%
% Área potencial de búsqueda	20,10%	22,39%	13,01%
Error promedio (presiones) %	0,81423%	0,16300%	-0,02387%

salida del tanque. De acuerdo con las lecturas del caudalímetro se observa que el CMN fue de 4,1 LPS y se mantuvo casi constante entre las 3:00 y las 5:00. Para el análisis se consideró el periodo de las 4:00 a las 5:00. Se consideró como PO el promedio de los valores de las presiones registradas en dicho horario.

La distribución de las demandas del modelo de la RDA se realizó considerando una repartición por áreas, empleando la herramienta de los polígonos de Voronoi de QGis. De esta manera, todos los usuarios que quedaron dentro de un polígono se sumaron para estimar la demanda total en el nodo del sector; cada usuario fue ponderado según los consumos históricos y la demanda se obtuvo con la Ec. 2, multiplicando el factor de peso por el caudal total consumido de las 4:00 a las 5:00 que fue de 2,4 LPS, el cual resulta de multiplicar el CMN por la eficiencia física de la RDA.

$$Q_{di_{4-5}} = w_i * Q_{s_{4-5}}$$

donde $w_i = \frac{\text{consumo promedio mensual del usuario } i}{\text{consumo promedio total del sector}}$ (2)

y $Q_{di_{4-5}}$: caudal de demanda en el nodo i de las 4:00 a las 5:00, w_i : factor de peso del usuario i , y $Q_{s_{4-5}}$: caudal promedio suministrado de 4:00 a 5:00.

Asignadas las demandas en los nodos, al modelo con la información final se le agregaron los nodos virtuales, los cuales son considerados como los puntos de fuga.

Con los resultados obtenidos se logró delimitar un área potencial de localización de fugas (Figura 4), pues el programa le asignó demanda adicional (fuga) a los nodos del modelo que se muestran en la Figura 4 para ajustar lo más posible las PS a las PO (Figura 5). Se redujo el espacio de búsqueda a 3.598,94m de tubería, lo que representa una reducción del 59,22% de longitud,

por lo que se exploraría con el geófono un 40,78% del total del sector de Las Teresas. Después de recorrer el área potencial de localización de fugas con el geófono, se logró identificar y reparar dos fugas no visibles dentro de la zona marcada (Figura 4).

Discusión

Los resultados obtenidos en la red Ejemplo 1 de Epanet muestran que el algoritmo es capaz de ubicar fugas de manera efectiva independientemente del caudal simulado, existiendo una relación entre el tamaño de fuga y la dificultad para localizarla; es decir, entre más pequeña la fuga más difícil es su localización y viceversa. El espacio reducido ronda entre el 33,67% y el 75,05%. Con la

simulación en la red de Hanoi se simuló con una eficiencia física del 99,64% sin que se vieran afectados los resultados, pues quedó demostrado que entre mayor sea el número de iteraciones mejores serán los resultados.

La aplicación del modelo en la RDA del sector Las Teresas mostró que se pueden lograr ahorros significativos tanto en el tiempo requerido para detectar y localizar una fuga no visible, como en el volumen de agua perdido a causa de esta. Al realizar una medición de los caudales suministrados en el sector posterior a la reparación de las fugas, se estimó una reducción del volumen perdido de 75,96 m³/día, lo que implica un incremento del 6,42% en la eficiencia física, si se consideran los mismos consumos que las condiciones iniciales. Únicamente desde que se realizaron las mediciones hasta la reparación de las fugas localizadas, se estimó un volumen perdido de más de 14,178m³ de agua.

Considerando que la aplicación del modelo permitió que los técnicos del SIMAPAG encontraran y repararan las fugas en lapso de 15 días de búsqueda, se habría producido un ahorro volumétrico de agua del 92,80%, además de que se pueden evitar grandes impactos económicos derivados de las afectaciones que estas pudieran ocasionar.

El método utilizado es aplicable a cualquier RDA y su efectividad depende en gran medida de la cantidad de información y del número y ubicación de las estaciones de medición, además de la precisión de la calibración del modelo y la simulación. En sistemas grandes puede llevar mucho tiempo la aplicación del algoritmo, pero una vez que se tiene esqueletizado el modelo en Epanet y se conoce la información de campo se vuelve eficiente la búsqueda de fugas mediante esta propuesta híbrida.

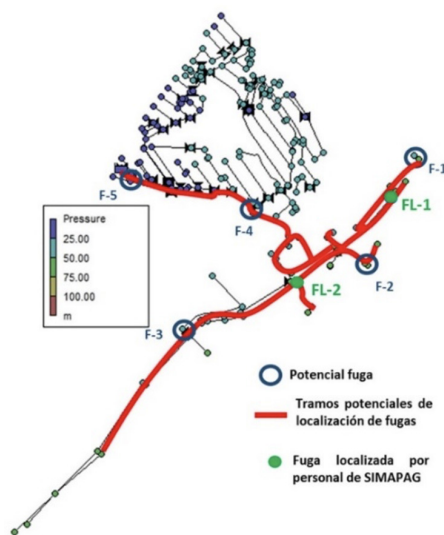


Figura 4. Delimitación de área de búsqueda y ubicación de fugas propuestas y reales de la red de Las Teresas.

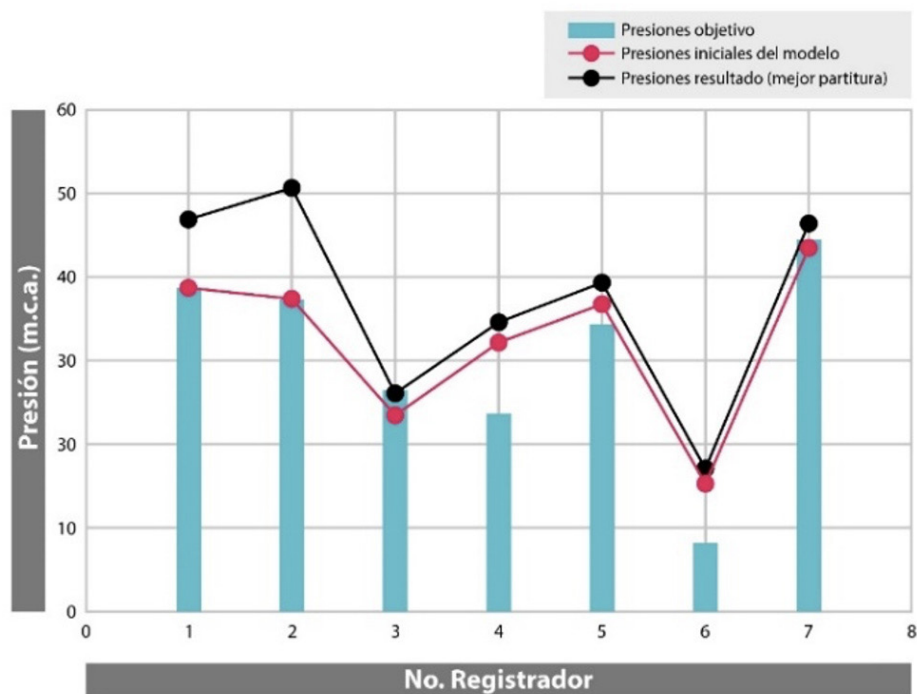


Figura 5. Presiones en nodos medidos antes y después de la simulación.

La calibración del modelo, es decir, el ajuste de los coeficientes de rugosidad de las tuberías y las demandas en los nodos, mediante prueba y error, tiene pocas posibilidades de cumplir con el criterio de calibración aún más estricto que se requiere para el modelado. Por ello se recomienda instalar la mayor cantidad posible de equipos de medición en los sectores a analizar, para que con el apoyo de optimizadores matemáticos se logre una calibración al grado que se distinguen más claramente entre las pérdidas de carga inducidas por alguna fuga y aquellas que surgen de otras fallas como las tomas clandestinas, válvulas cerradas, diámetros o rugosidades incorrectas, demandas en los nodos mal estimadas, etc.

Conclusiones

Se presentó una metodología híbrida para la localización de fugas en las RDA, la cual contempla la aplicación de un modelo matemático basado en la técnica HS para reducir el espacio de búsqueda y localizar las fugas mediante la búsqueda con geófono.

El modelo de optimización se probó en las RDA del Ejemplo 1 de Epanet y de Hanoi, lo cual sirvió para identificar las ventajas y limitaciones de este método. Posteriormente, el modelo se validó en una RDA bajo condiciones reales en la ciudad de Guanajuato, México.

Durante el desarrollo de la investigación se identificó que la certidumbre de los resultados depende de la información disponible, de la manera en que se procese y de la calidad de esta, ya que si no se cuenta con información confiable o no se procesa adecuadamente se puede obtener resultados equivocados. Así pues, resulta indispensable la recopilación continua de información de las RDA, pues cuanto más información se tenga mejor será la calibración del modelo hidráulico y los resultados obtenidos.

En el caso de la RDA bajo condiciones reales se redujo el espacio de búsqueda a un 40,78% de la longitud total de tubería según la solución óptima del modelo, espacio en el cual el personal técnico del SIMAPAG logró identificar y reparar dos fugas no visibles, incrementando la eficiencia física del sector al 66,22% lo que representa una recuperación de 24.939m³ de agua anualmente. Si consideramos que el precio de producción por metro cúbico de agua para el SIMAPAG es de 0,7116 USD, se logrará reducir los costos en 17.747,48 USD por año.

Con el análisis del CMN se puede establecer un valor de caudal suministrado umbral, el cual es un indicador para aplicar la metodología a fin de optimizar la búsqueda de las fugas de manera temprana y confiable, pues si ese caudal se sale del rango, implica la ocurrencia de alguna problemática en la RDA, siendo en

su mayoría la ocurrencia de fugas, las cuales persistirán hasta su reparación.

El caudal mínimo de fuga que se puede detectar y localizar está determinado por: a) el cambio de presión causado por las fugas, b) la variación causada por los errores/incertidumbre en las lecturas de medición de la presión, y c) el umbral de ruido que el geófono sea capaz de detectar. De acuerdo con los resultados obtenidos en la red Ejemplo 1, el algoritmo es capaz de detectar caudales con valores por debajo de los 0,063 LPS.

El tiempo de simulación es una variable importante para obtener resultados efectivos, pues entre mayor sea la cantidad de iteraciones mejor deben ser los resultados. Las simulaciones en la red de Hanoi muestran que a partir de 1×10⁶ iteraciones los resultados son confiables. En este caso en particular, los errores relativos están por debajo de 0,005.

REFERENCIAS

- Al-Washali T, Sharma S, Al-Nozaily F, Haidera M, Kennedy M (2019) Modelling the leakage rate and reduction using minimum night flow analysis in an intermittent supply system. *Water* 11:48. doi:10.3390/w11010048
- Bartolín (2013) *Confección de Modelos de Redes de Distribución de Agua Desde un SIG y Desarrollo de Herramientas de Apoyo a la Toma de Decisiones*. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia. España. 476 pp.
- Burn S, De Silva D, Eiswirth M, Hunaidi O, Speers A, Thornton J (1999) *Pipe Leakage - Future Challenge and Solutions*. Pipes Wagga Wagga. Australia. 18 pp.
- Casillas M, Garza L, Puig V (2015) Optimal sensor placement for leak location in water distribution networks using evolutionary algorithms. *Water* 7: 6496-6515. doi:10.3390/w7116496
- Chan T, Chin C, Zhong X (2018) Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection. *IEEE Access*. doi:10.1109/ACCESS.2018.2885444
- CONAGUA (2007) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Comisión Nacional del Agua. México.
- Creaco E, Pezzinga G (2018) Comparison of algorithms for the optimal location of control valves for leakage reduction in WDNs. *Water* 10: 466. doi:10.3390/w10040466
- De Paola F, Galdiero E, Giugni M (2017) Location and settings of valves in water distribution networks using a harmony search approach. *J. Water Resour. Plann. Manag.* 143(6): 760.
- Farley M, Trow S (2003) *Losses in Water Distribution Networks*. International Water Association. Londres, RU. 296 pp.
- Fujiwara O, Khang DB (1990) A two phase decomposition method for optimal design of looped water distribution network. *Water Resour. Res.* 26: 539-549.
- Geem Z (2000) *Optimal Design of Water Distributions Networks Using Harmony Search*. Thesis. Korea University. Corea.

- Geem Z, Tseng C, Williams J (2009) Harmony Search algorithms for water and environmental systems. En *Music-Inspired Harmony Search Algorithm*. SCI 191: 113-127
- Hunaidi O, Chu W (1999) Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Appl. Acoust.* 58: 235-254.
- IMTA (2019) *Indicadores de Gestión Prioritarios en Organismos Operadores*. Informe final. HC1915.1. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.
- Javadiha M, Blesa J, Soldevila A, Puig V (2019) Leak localization in water distribution networks using deep learning. *6th Int. Conf. on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'19)*. (23-26/04/2019). Paris, Francia.
- Jung Soo Y, Do Guen Y, Ho Min L, Joong K (2012) Optimal leakage detection model of water distribution systems using Semi-Pressure Driven Analysis and Harmony Search. *Urban Water* 12: 23-31. doi: 10.9798/kosham.2012.12.3.023
- Liston DA, Liston JD (1992) Leak detection techniques. *J. New Engl. Water Works Assn.* 106: 103-108.
- Mambretti S, Orsi E (2012) Genetic algorithms for lake detection in water supply networks. *Urban Water* 122: 63-74, doi:10.2495/UW120061
- Moors J, Scholten L, Van der Hoek JP, Den Besten J (2018) Automated leak localization performance without detailed demand distribution data. *Urban Water J.* 15: 116-123, doi: 10.1080/1573062x.2017.1414272
- Ni L, Jiang J, Pan Y (2013) Leak location of pipelines based on transient model and PSO-SVM. *J. Loss Prevent. Proc. Indust.* 26: 1085-1093.
- Puust R, Kapelan Z, Savic DA, Koppel T (2010) A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water J.* 7: 25-45. doi: 10.1080/15730621003610878
- Rossman LA (2000) *EPANET 2: User's Manual*. EPA/600/R-00/057. Environmental Protection Agency. Washington, DC, EEUU.
- Sang K, Hyundong L (2003) The leak detection method using GA and HS algorithm. *World Water and Environmental Resources Congress*. 10 pp.
- Sang K, Wan Y, Kwang O, In H, Jeong O (2006) Transient analysis and leakage detection algorithm using GA and HS algorithm for a pipeline system. *J. Mech. Sci. Technol.* 20: 426-434.
- Sophocleous S, Savić D, Kapelan Z (2019) Leak localization in a real water distribution network based on search-space reduction. *J. Water Resour. Plann. Manag.* 145(7): 04019024.
- Wang X, Gao X, Zenger K (2015) An introduction to Harmony Search optimization method. En *Springer Briefs in Computational Intelligence*. Vol. VI, 88 pp. doi 10.1007/978-3-319-08356-8_2.
- WRC (2002) *Benchmarking of Leakage for Water Suppliers in South Africa. User guide for the Benchleak Model*. Water Research Commission. Sudáfrica.

LEAK LOCALIZATION IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS BY MEANS OF HARMONY SEARCH OPTIMIZATION

Noé Rodríguez Moreno, Xitlali Delgado-Galván, Jesús Mora-Rodríguez and Gilberto Carreño Aguilera

SUMMARY

Water leaks in water distribution networks (WDN) cause waste of the resource and, reduce the physical, commercial and global efficiency of the water supply systems. This paper describes a methodology proposed to define potential areas for leak localization in a WDN in real conditions, considering as a tool a computer program based on the Harmony Search evolutionary technique. It uses as a starting point a hydraulic model in Epanet that is representative of the WDN and makes

iterative comparisons until the relative error between the measured pressures and those estimated is reduced. Subsequently, an exhaustive search is carried out with a direct search method in the potential. area resulting from the proposed methodology. The results obtained show that with the application of the methodology it is possible to optimize the search space and increase the effectiveness of the location of non-visible leaks and, thus, the physical efficiency of the WDN.

LOCALIZAÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA MEDIANTE OTIMIZAÇÃO COM HARMONY SEARCH

Noé Rodríguez Moreno, Xitlali Delgado-Galván, Jesús Mora-Rodríguez e Gilberto Carreño Aguilera

RESUMO

Vazamentos de água em redes de distribuição de água (RDA) provocam desperdício do recurso e reduzem a eficiência física, comercial e global dos sistemas de abastecimento de água. Este artigo descreve uma metodologia proposta para definir, em condições reais, áreas potenciais na localização de vazamentos em uma RDA, considerando como ferramenta um programa informático baseado na técnica evolutiva Harmony Search (HS). Esta utiliza como ponto de partida um modelo hidráulico em

Epanet que seja representativo da RDA e realiza comparações iterativas até reduzir o erro relativo existente entre as pressões medidas e as estimadas. Posteriormente é realizada uma varredura exaustiva com método de busca direta na área potencial resultante da metodologia proposta. Os resultados obtidos mostram que, com a aplicação da metodologia consegue-se otimizar o espaço de busca e aumentar a efetividade na localização de vazamentos não visíveis e, com isto, a eficiência física da RDA.