

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“DETECCIÓN Y ESTIMACIÓN DE FUGAS EN REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA MEDIANTE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO) Y EPANET”

Juan Ramírez Gutiérrez (1), Jesús Mora Rodríguez (2), Idel Montalvo (3), Martín Jiménez Magaña (4)

(1) Estudiante de Maestría en Ciencias del Agua. Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Centro CP. 36000. Guanajuato, México. Tel.+524731020100 Ext.2272. jprg1981@gmail.com

(2) Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica. Universidad de Guanajuato, Av. Juárez 77, Centro CP. 36000. Guanajuato, México. Tel.+524731020100 Ext. 2272. jesusmora@ugto.mx

(3) 3S Consult Company, Alemania, idel_m@hotmail.com

(4) Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM. Rancho Seco S/n. Impulsora Popular Avícola, 57130 Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, México. Tel: +525556231090. Ext. 39221 mrjm.unam.mx@hotmail.com

RESUMEN

Las fugas en redes de abastecimiento de agua potable ocasionan pérdidas de recursos (naturales, energéticos y económicos), se estima que en México se tiene en promedio 36.7% de fugas en relación al agua suministrada a la red. La detección de estas resulta compleja y costosa debido a su naturaleza. En este artículo se presenta una rutina numérica que permite la localización y cuantificación del caudal de fuga en redes de agua potable. El procedimiento numérico se realiza con el trabajo en conjunto del método heurístico PSO y el cálculo hidráulico en EPANET. Con la introducción de las presiones imperantes en una red, la rutina proporciona una configuración de gastos en los que se distinguen las fugas de los consumos. Se presenta la calibración de la PSO para ajustar el método heurístico al planteamiento de la detección de fugas.

Palabras claves: PSO, Particle Swarm Optimization, detección de fugas, redes de agua potable, EPANET.

ABSTRACT

Leaks in water distribution systems produce resources losses (natural, energetic and economical). In Mexico, a mean of 36.7% of the water supply is lost by leaks. The detection of them is complex and expensive due to its nature. This paper shows a numerical routine that detects water losses in the distribution systems. The numerical procedure is made by PSO heuristic method and by hydraulic network solver EPANET. By introducing the existing pressures on a water system, this routine computes a flow arrangement in which the leaks are discriminated from the consumptions. It is shown the calibration of the PSO to adjust the approach to the heuristic method of leak detection.

Key words: PSO, Particle Swarm Optimization, leakage detection, water distribution systems, EPANET.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Autor 1: Recibió el grado de Ingeniero Civil en la Universidad de Colima en 2002, concluyó la maestría en ciencias del agua en la Universidad de Guanajuato en 2013. Su tema de tesis de maestría se titula “Detección y estimación de fugas en redes de abastecimiento de agua potable mediante la metodología Particle Swarm Optimization (PSO) y EPANET”, dicha tesis sirvió como base para la publicación y redacción de este documento.

INTRODUCCIÓN

El problema de la escasez del agua es cada vez más preocupante, el agua dulce es un recurso limitado y a menudo escaso. La falta de agua cada vez más notable, la migración de la población hacia las ciudades y la urbanización, están causando estrés sobre los recursos hídricos.

México ocupa el lugar 53 de 180 países evaluados a nivel mundial en el grado de estrés sobre los recursos hídricos, con un 17.4% (FAO, 2011). En los países en vías de desarrollo, se tiene un problema puntual que es el agua no facturada. Esta se compone por las pérdidas físicas, el consumo no autorizado y los volúmenes suministrados sin ser cobrados. En 2006 el Banco Mundial estimó que entre el 40% y 50% del agua producida en los países en vías de desarrollo, es agua no facturada. En cuanto a fugas físicas, se estima que el agua que se pierde diariamente en los sistemas de agua potable en países en vías de desarrollo, sería suficiente para abastecer a 200 millones de personas (Kingdom *et al.*, 2006).

En los últimos años se han manifestado incrementos substanciales en la demanda del agua. La gente migra de las poblaciones rurales a los centros urbanos y genera un estrés en el servicio al demandar mayores volúmenes de agua. En México, la población en zonas urbanas mayores a 2,500 habitantes, aumentó del 42.6% en 1950 al 76.8% en el 2010 (INEGI, 2010). Para el año 2030, se estima que el 81% de la población en la República Mexicana se encuentre en localidades urbanas (CONAPO, 2007).

Se estima que el 85% del agua no contabilizada en México se debe a fugas en la red de distribución, alcanzando un 36.7% del agua total en la red (IMTA, 2010). Por ejemplo, la Ciudad de México recibe 35.1 m³/s del sistema Cutzamala, Lerma y de pozos profundos. La SEMARNAT y CONAGUA han reportado que la ciudad de México pierde el 38% del agua total que recibe (13.3 m³/s). Este volumen de pérdidas es mayor a cualquiera de los volúmenes suministrados por cualquiera de las tres fuentes de la ciudad (Sosa, 2010).

Es por ello que, en el ámbito de la hidráulica urbana es importante desarrollar técnicas con las que se logre la recuperación del caudal no contabilizado en las redes de distribución de agua. En el presente artículo se muestra una técnica heurística mediante la cual se pretende obtener un escenario numérico

similar al escenario físico que se presenta en la red de distribución, la identificación de sitios de agua no contabilizada y el volumen de la misma.

LAS FUGAS EN LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Las fugas en las redes de distribución de agua pueden definirse como la diferencia entre la cantidad de agua suministrada menos el agua consumida por los usuarios. Los derrames en los tanques de almacenamiento y de regulación, tomas clandestinas, fisuras en las propias tuberías, etc., forman parte de las fugas de agua en la red.

Una fuga puede ocasionarse por múltiples factores, entre algunos de ellos están los siguientes (Farrer, 1979):

- **Alta presión en la red:** La presión afecta principalmente a los cruceros de la red. Cuando se tiene una fisura menor, la presión hace que ésta crezca.

Una fuga depende directamente de la presión, (1).

$$Q = k \cdot H^X \quad (1)$$

En la ecuación (1), Q es el gasto, H es la presión, k es el coeficiente de descarga y X es un exponente que, para el caso de fugas en la red, puede tomar valores desde 0.50 hasta 2.50 (May, 1994).

- **Corrosión:** Esta puede ser interna o externa. La primera la ocasiona el líquido que está siendo transportado, tal es el caso de las aguas corrosivas que debilitan las tuberías metálicas. La corrosión externa es aquella que genera el entorno del suelo alrededor de la tubería.

- **Tránsito vehicular:** Las tuberías cuyas uniones son rígidas, son las más susceptibles a dañarse por los efectos del tránsito. Estos casos se presentan cuando la tubería se encuentra a una profundidad inadecuada, y con ello, a la afectación de las cargas del tráfico.

- **Movimientos del suelo:** Las tuberías presentan fallos debidos a sismos o por características propias del suelo, los cuales cambian su estructura, como es el caso de las arcillas.

- **Defectos en el material:** Un material de baja calidad merma la vida útil de una tubería, genera reparaciones costosas y frecuentes que redundan en un desperdicio de agua. En el costo por reparación de una tubería en una calle asfaltada, el 24% corresponde solamente a la tubería, siendo el 76% restante, los gastos de mano de obra y obra civil.

- **Deficiencias en la instalación y operación:** La mano de obra no calificada puede afectar la vida útil de la instalación. Aquí se incluye la falta de herramienta o equipo inadecuado para su instalación.

- **Golpe de ariete:** Se presenta por cortes en la energía eléctrica del sistema o deficiencias en la operación de la red. Genera sobrepresiones que producen fallos en las tuberías y desplazamientos de los atraques.

- **Edad de la tubería:** Después de la vida útil de la tubería, se presenta una mayor vulnerabilidad a los fallos (Burn *et al.*, 1999).

El problema de las fugas es muy complejo, pues la gran mayoría de estas no son superficiales o apreciables a simple vista. En muchas ocasiones una fuga no se manifiesta y, si lo hace, se manifiesta en un lugar muy distante del que se encuentra. El principal problema no es que tanta agua sale por la fuga, sino el tiempo que se tarda en detectarla (Gama *et al.*, 2010).

LA DETECCIÓN DE LAS FUGAS

Existen varios métodos de detección de fugas (Burn *et al.*, 1999), enlistando los siguientes:

- **Métodos acústicos:** Consiste en la detección de fugas por medio de ruido o vibraciones. Estos son generados por el agua cuando escapa del tubo a presión. Se tienen definidas las frecuencias que genera el agua.

- **Inyección de gas trazador en el agua:** Se inyectan gases no tóxicos, insolubles en el agua y más ligeros que el aire. Comúnmente se usa helio e hidrógeno. El gas se inyecta y sale por las grietas, fisuras o zonas porosas de la tubería, atraviesa el suelo y es detectado por sensores.

- **Termografía:** El agua que escapa por la tubería cambia la temperatura del suelo adyacente a este. Dicho cambio de temperatura se puede detectar por escáneres infrarrojos.

- **Radar:** Se envía un pulso electromagnético al suelo por medio de un radar. El pulso rebota parcialmente cuando encuentra una diferencia entre dos materiales. Con estos datos se puede calcular la profundidad del cambio. Las fugas se pueden ubicar mediante los espacios en el suelo que el agua haya generado al momento del flujo o mediante el cambio de densidad por un suelo saturado de agua.

- **Registradores de presión y flujo:** Estos registradores pueden ir en el interior o en el exterior de la tubería y pueden trabajar por detección de ruido, mediante algún dispositivo mecánico, etc. Pueden ser automatizados, con conexión a SMS, etc.

De los métodos mencionados, los de inspección electromagnética, de termografía y de radar son muy costosos. Los métodos con sustancias trazadoras y con sensores dentro de la tubería aumentan el riesgo de contaminación por la intrusión de elementos y sustancias en el agua. El método acústico es el más usado en la actualidad (De Silva *et al.*, 1999), pero su desventaja es que, factores externos como ruido ambiental, por tránsito vehicular, por equipos de bombeo, etc., tiende a dificultar su efectividad (Tafari *et al.*, 1997). Por su parte, las mediciones de gasto en una red de tuberías de agua potable son complicadas de realizar (Fuentes-Mariles *et al.*, 2010).

La gestión de la presión hidráulica ha sido durante muchos años un sistema de control y, recientemente, ha sido utilizada para combatir las fugas. A mayor presión se genera un mayor gasto de fuga y se presentan mayores esfuerzos en la tubería que, finalmente, harán más grandes las zonas de fuga (Lambert, 2000).

A pesar de que la relación presión-fuga es muy conocida, y que la presión es fácilmente medible, no se hace referencia a esta cuando se habla de volúmenes de fuga. Japón ha monitoreado esta relación por más de 20 años y se ha determinado que el incremento en la presión en un 1% aumenta el gasto de la fuga en 1.5% (Lambert, 2000).

Uno de los métodos para la identificación de fugas es la observación de las gráficas de presión o de la energía total en una tubería. Cuando se presenta una fuga, se puede apreciar una caída súbita en la línea de energía.

LA TÉCNICA PSO

Gracias a la era computacional, ahora se tienen métodos de detección de fugas por medio de rutinas de optimización y métodos heurísticos. Se han aplicado dichos métodos utilizando como base la medición de presiones, con la obtención de buenos resultados.

Los métodos computacionales heurísticos contienen variables estocásticas, por lo que se resuelven por prueba y error. El mayor problema en estos métodos es el tiempo necesario para encontrar una solución aceptable. Se ha buscado la forma de encontrar los lineamientos óptimos para resolver un problema de manera eficiente y rápida.

La técnica Particle Swarm Optimization (PSO) es un proceso estocástico y heurístico que simula la inteligencia natural emergente en sociedades organizadas ante un problema. Se inspiró en el vuelo que realizan las aves que migran a un rumbo desconocido por cuestiones climáticas. James Kennedy, un psicólogo social, junto con Russel C. Eberhart, un ingeniero eléctrico, desarrollaron dicha técnica en 1995 (Bai, 2010). La PSO empezó como una simulación de un medio social simplificado. La intención original era el graficar la coreografía de una parvada. Sus raíces se basan en la inteligencia artificial y en la computación evolutiva.

Con respecto a la aplicación de técnicas heurísticas para la detección de fugas se tienen las siguientes aportaciones:

Fuentes-Mariles *et al.* (2011), estimaron el gasto y la localización de fugas en una red de tuberías experimental. Se aplicó algoritmos genéticos para la detección de fuga mediante la diferencia entre los gastos medidos y los estimados por la técnica heurística. Se concluyó que el método es robusto ya que presenta un porcentaje de error bajo y se recomienda una aplicación en una red real.

Belsito *et al.* (1998), determinaron el tamaño y la ubicación de las fugas por medio de redes neuronales artificiales. En dicha investigación se detectaron fugas con un volumen equivalente al 1% del flujo de entrada y se localizaron fugas con una precisión del 50% en fugas pequeñas.

Izquierdo *et al.* (2010), realizaron la detección de fugas mediante la PSO con diversidad enriquecida en la Red de Hanoi. El método de detección de fugas se basó en la diferencia de presiones físicas y las

obtenidas gracias a la PSO. Se concluyó que la PSO fue de gran utilidad para la detección de fugas, pues se tuvieron diferencias de presiones menores a 0.15 mca.

Como se puede observar, para la detección de fugas por métodos heurísticos se comparan las condiciones obtenidas por el algoritmo contra las condiciones físicas imperantes. Por requerir únicamente de datos de la red que, el organismo operador debe de tener a la mano por cuestiones de operación, servicio y mantenimiento (Caudal inyectado, consumos de los usuarios y registros de las presiones), resultan en un método económico para el pronóstico de fugas.

LA METODOLOGÍA PSO PARA LA LOCALIZACIÓN DE FUGAS

Las cargas de presión, el caudal inyectado y los consumos son características básicas en la redes de distribución de agua, ambas se pueden utilizar para la detección de fugas. La medición de ambos parámetros implica instrumentación. Sin embargo, para el registro de caudales, se requiere una instrumentación más costosa y su monitorización debe ser constante. Para utilizar el caudal como variable para calibrar el modelo heurístico en la detección de fugas, se tiene la desventaja de depender de los hábitos de consumo de la población, la variación de esos consumos podría arrojar datos de fuga erróneos. Por ser una forma menos costosa y de mayor fiabilidad, se utiliza en el presente trabajo el registro de las presiones para la calibración del modelo heurístico y con ello, la detección de fugas en redes de distribución de agua.

La finalidad de una red de agua potable es la de dotar de agua a la población. Esta red debe tener un rango definido de presiones para su correcto funcionamiento. Cuando se demanda agua de la red, la presión varía en función de un arreglo de caudales dependiente de los consumos que se tienen en ella. Por lo cual, el arreglo de caudales que se presente en una red de distribución de agua, tendrá una configuración de presiones determinada.

La dinámica que sigue la PSO es la siguiente:

- Un grupo social tiene un problema determinado.
- Cada integrante del grupo obtiene una solución al problema (evaluación).

- Los integrantes analizan cuál fue la mejor solución de todas las propuestas (comparación).
- Todos los integrantes propondrán una nueva solución, pero esta vez tienen una influencia adicional: la social (imitación).
- La experiencia propia y la influencia social influyen para tomar la próxima decisión (Figura 1).

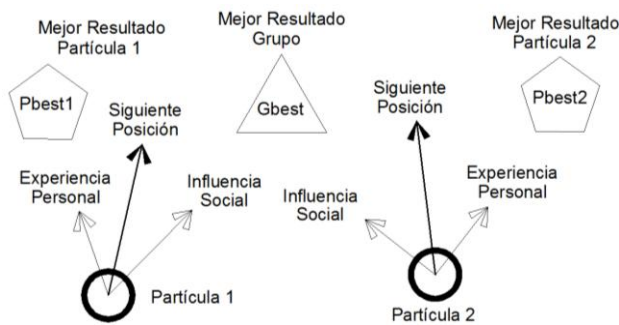


Figura 1. Influencias sobre las partículas.

El objetivo de la PSO es encontrar un máximo o un mínimo en un espacio de búsqueda; esto es, la PSO nunca intenta resolver un problema. Por tal motivo, el problema en cuestión, deberá plantearse de tal forma que nos proporcione una solución al encontrar un máximo o un mínimo.

El primer paso consiste en determinar el volumen de fuga, ecuación (2). En este artículo se considera fuga a todo aquel volumen de agua no contabilizado, ya sea por una falla en la tubería o una toma clandestina.

$$Vf = Qe - \sum_{i=0}^n Q_{nodo_i} \quad (2)$$

Donde:

- Vf = Volumen total de fuga.
- Qe = Gasto entrada a la red.
- N = Número de nodos en la red.
- Q_{nodo_i} = Gasto contabilizado en el nodo i.

Las partículas de la PSO fueron inicializadas aleatoriamente con una distribución normal entre cero y uno. Dicho número aleatorio se multiplicó por el rango de soluciones posibles, ecuación (3). Esto se hizo debido a que no todos los nodos tienen demanda en la red, pero todos pueden presentar fuga.

$$X_{ij} = rand() * (Vf) + Q_{DEMj} \quad (3)$$

Donde:

- X_{ij} = Gasto propuesto por la partícula i en el nodo j
- rand() = Número aleatorio, distribución normal [0,1]
- Vf = Volumen total de fuga.
- Q_{DEMj} = Gasto de demanda en el nodo j.

La velocidad máxima de vuelo se estableció con un valor equivalente al 33% del volumen total de fuga. La velocidad mínima tiene el mismo valor que la máxima pero con signo negativo. La inicialización de velocidades se realizó aleatoriamente, ecuación (4).

$$V_{ij} = rand() * (V_{max} - V_{min}) + V_{min} \quad (4)$$

Donde:

- V_{ij} = Velocidad de la partícula i en el nodo j.
- rand() = Número aleatorio, distribución normal [0,1].
- V_{max} = Velocidad máxima de vuelo.
- V_{min} = Velocidad mínima de vuelo.

Posteriormente se obtienen las presiones mediante EPANET para cada una de las configuraciones de gastos propuestas por las partículas.

La función objetivo (también llamada factor de aptitud), es una expresión matemática, ecuación (5), que se tiene que idear para poder evaluar el desempeño de las partículas que conforman la PSO y poder expresar la solución de un problema como un máximo o un mínimo.

La función objetivo es la parte responsable en indicarle a la PSO que tan buena o mala es la propuesta encontrada. De esta manera, la PSO orienta su búsqueda hacia las zonas donde se han encontrado los mejores resultados.

En el presente artículo se muestra la aplicación de una función objetivo con dos tipos de penalización, ecuación (5).

$$FA_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [(P_{TEOj} - P_{PSOj})^2 + PVj + PDj] \quad (5)$$

Donde:

- FA_i = Factor de aptitud para la partícula i
- n = Número de nodos evaluados
- P_{TEOj} = Presión teórica (física) en el nodo j
- P_{PSOj} = Presión obtenida con EPANET en el nodo j

PV_j = Penalización por volumen para el nodo j
 PD_j = Penalización por demanda para el nodo j.

Para el cálculo de la penalización por volumen PV_j, se utiliza la ecuación (6).

$$\text{Si } X_{ij} > (Q_{DEMj} + Vf) \text{ entonces :}$$

$$\rightarrow PV_{ij} = 9 \times 10^5 * (X_{ij} - Q_{DEMj} - Vf) \quad (6)$$

Donde:

X_{ij} = Gasto en el nodo j de la partícula i
 Q_{DEMj} = Gasto de demanda en el nodo j
 Vf = Volumen total de fugas.

La penalización por demanda PD_j se determina mediante la ecuación (7).

$$\text{Si } X_{ij} < Q_{DEMj} \text{ entonces :}$$

$$\rightarrow PD_{ij} = Q_{DEMj} - X_{ij} \quad (7)$$

Como se puede observar, las penalizaciones tienden a sancionar de manera excesiva al factor de aptitud al encontrar un resultado no viable. Esto se realiza con la finalidad de mejorar los resultados propuestos por la PSO. Si los gastos no violan las condiciones establecidas (6) y (7), la penalización por demanda y volumen será cero.

Por la forma en la que está estructurada la función objetivo, en este caso en específico, se debe encontrar el mínimo factor de aptitud. Esto es, cuando la función objetivo obtenga un valor de aptitud igual a cero, se habrá encontrado el arreglo de gastos existentes en la red, incluyendo las fugas.

La función objetivo ideada obtiene el error existente entre las presiones calculadas (a partir de los arreglos de gastos propuestos por la PSO) y las presiones registradas en campo o presiones objetivo. Esta contiene dos términos de penalización para ayudar a la PSO a orientar su búsqueda hacia soluciones factibles.

Con la finalidad de buscar nuevas soluciones, la PSO “vuela” en busca de nuevas alternativas en el espacio de búsqueda. Para el vuelo de las partículas se utilizó la ecuación (8), sin factor de inercia (Kennedy & Eberhart, 2001).

$$V_{ij(t+1)} = V_{ij(t)} + \varphi_1 [P_i - X_{ij(t)}] + \varphi_2 [P_g - X_{ij(t)}] \quad (8)$$

Donde:

V_{ij(t+1)} = Velocidad en la siguiente iteración
 V_{ij(t)} = Velocidad actual para el nodo
 φ₁ = Confianza individual
 P_i = Mejor posición obtenida por el individuo
 X_{ij(t)} = Posición actual
 φ₂ = Influencia social
 P_g = Mejor posición obtenida por el grupo.

La confianza individual e influencia social se calcularon mediante la multiplicación de un número aleatorio con distribución normal entre cero y uno multiplicado por dos. Esto se realizó en cada nodo de cada partícula.

Debido a que, en la PSO las partículas tienden a acelerarse rápidamente, la velocidad fue controlada mediante las siguientes condiciones:

$$V_{\max} < V_{ij(t+1)} < V_{\min}$$

$$\text{Si } V_{ij(t+1)} < V_{\min} \rightarrow V_{ij(t+1)} = V_{\min}$$

$$\text{Si } V_{ij(t+1)} > V_{\max} \rightarrow V_{ij(t+1)} = V_{\max}$$

La obtención de nuevas configuraciones de gastos se realizó mediante la ecuación (9).

$$X_{ij(t+1)} = X_{ij(t)} + V_{ij(t+1)} \quad (9)$$

Donde:

X_{ij(t+1)} = Posición de la partícula en la siguiente iteración
 X_{ij(t)} = Posición actual de la partícula
 V_{ij(t+1)} = Velocidad de la partícula en la siguiente iteración.

En resumen, la metodología consiste en que, por medio de la PSO, se generen configuraciones aleatorias de gastos. Estas se evalúan mediante el programa de cómputo EPANET, calculándose el arreglo de presiones equivalente a la configuración de gastos. Cuando las presiones calculadas por EPANET sean lo más similares posible a las presiones físicas en la red, se habrá obtenido un arreglo de gastos calculado. Al cotejar el arreglo de gastos calculado, contra el que se consideró inicialmente, se podrán observar unas variaciones, dichas variaciones serán las fugas

Las condiciones consideradas en esta metodología de detección de fugas son las siguientes:

1. La red trabaja en estado permanente.

2. Se asume que el organismo operador cuenta con registradores de presión en todos los nodos de la red.
3. Una fuga se considera como si se tratara de una demanda adicional.
4. Para la ubicación de fugas, todas las tuberías se dividen por mitad y, en ese punto, se genera un nodo virtual.
5. Las fugas puntuales en los nodos se incluyen en los mismos. Las fugas entre nodos se consideran al centro del tramo de tubería comprendido entre dichos nodos, es decir, en el nodo virtual.
6. Se conocen los gastos demandados y el gasto de entrada a la red.
7. Se conocen a la perfección las características de la red: elevación, geometría, diámetros, material, longitudes, etc.

La rutina computacional fue desarrollada en el programa MATLAB, se determinó la función objetivo, se analizó el comportamiento de la PSO en diversas etapas de su configuración para evaluar el impacto en el ajuste de los resultados numéricos con respecto al escenario de la red de abastecimiento.

Se evaluó que modificaciones hechas a la PSO aumentaron la eficiencia del proceso, cuáles modificaciones fueron críticas y cuáles restringieron o no impactaron al método.

La rutina elaborada en MATLAB permite visualizar el espacio de búsqueda (Figura 2) y las posiciones que van tomando cada una de las dimensiones que componen a las partículas. También permite la exportación de los datos generales de la rutina y todos los datos calculados durante la simulación (figura 3).

La rutina trabaja extrayendo los datos de arranque proporcionados mediante archivos TXT con un formato similar al EPANET. El usuario indica el número de partículas con las que desea simular y el gasto de entrada de la red. Posterior a ello, MATLAB establece un vínculo con EPANET para la evaluación de las propuestas realizadas por el vuelo de la PSO. La función objetivo le indica a la PSO cuáles valores fueron los mejor encontrados y dirige a las partículas a esa zona del espacio de búsqueda.

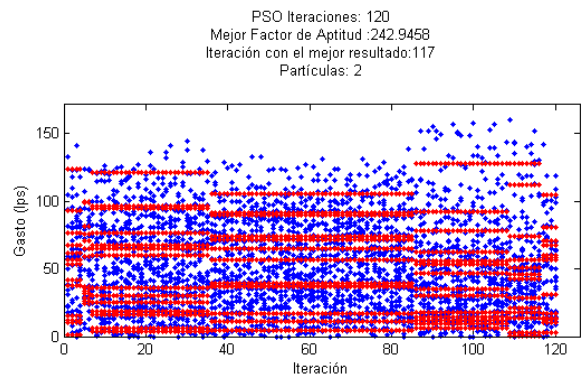


Figura 2. Vuelo de las partículas por el espacio de búsqueda

** Iteración número 1 *****

X (Valores de gasto)							
61.78	93.47	76.33	93.20	123.39	67.30	42.16	
81.80	57.46	62.05	133.05	94.17	104.70	18.17	
VEL (Velocidades)							
3.10	9.72	3.80	2.33	-0.53	16.67	17.03	
-19.74	-18.46	-7.71	-3.97	-12.57	1.69	-14.24	
PENVOL (Penalización por volumen)							
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
PENDEM (Penalización por demanda)							
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
PRESPSO (Presiones calculadas con EPANET a partir de las configuraciones de gasto X)							
40.69	-10.61	23.85	-16.40	4.12	-3.04	19.82	

Figura 3. Visualización de datos calculados durante la simulación

La rutina es rápida y estable, pues en una computadora de bajas características, realiza cuando menos 2 evaluaciones hidráulicas por segundo. La rapidez de simulación depende del número de partículas, el tamaño del problema a resolver y de las características del equipo de cómputo en el que se realice.

Cada rutina se programa para que explore soluciones posibles y registre el mejor valor de aptitud encontrado por cualquier partícula. El número de revisiones hidráulicas por iteración equivale a la cantidad de partículas de la PSO. La rutina termina cuando se ha encontrado un factor de aptitud igual a cero, o cuando se han alcanzado un número determinado de iteraciones sin haberse mejorado el factor de aptitud.

APLICACIÓN DE LA PSO EN UN CASO DE DETECCIÓN DE FUGAS

Para la aplicación de la técnica de PSO para la localización de fugas, se propone una red similar a la propuesta por Alperovits *et al.* (1977). Dicha red consta de 1 tanque con carga de 210 m, 6 nodos con elevación de 10 m, la longitud de cada uno de los tramos de tubería es de 100 m, la fórmula para el cálculo hidráulico usada fue la de Hazen-Williams. La red tiene una demanda total de 94.50 l/s y se tienen 3 tipos diferentes de materiales (figura 4).

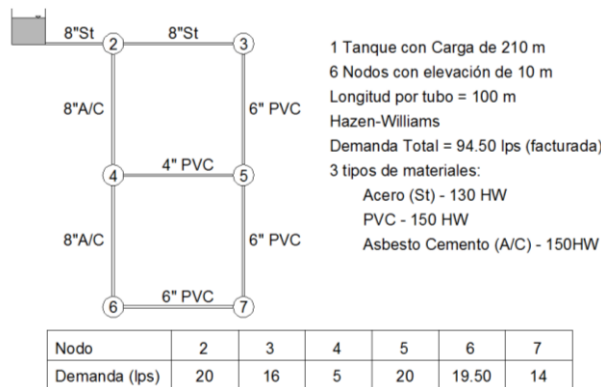


Figura 4. Red de distribución de agua

Para la ubicación de fugas, se dividió cada tramo de tubería en dos segmentos, generando 16 tramos de tubería y 15 nodos. El gasto de entrada de la red son 100 l/s y el volumen de fugas es de 5.50 l/s (Figura 5), los cuales se repartieron de la siguiente manera, para el nodo 2, un caudal fugado de 2 l/s y para el nodo virtual 14, un caudal no contabilizado de 3.5 l/s

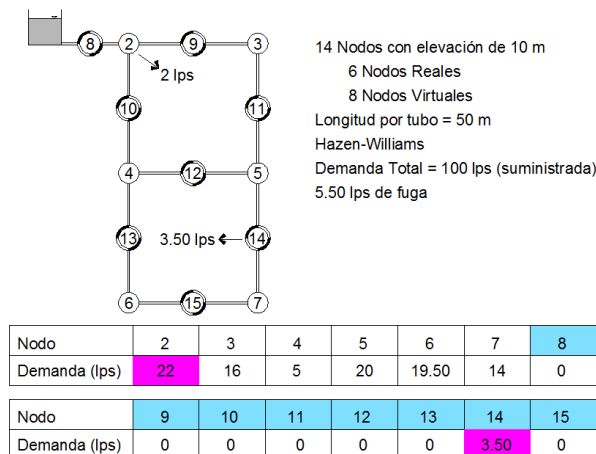


Figura 5. Red numérica para la aplicación de PSO con nodos virtuales

Los parámetros usados en la rutina para la configuración de la PSO son los indicados en la Metodología descrita. La rutina de detección de fugas se programó para que se efectuara hasta 800 iteraciones sin haber tenido mejora alguna en el factor de aptitud o hasta que se encontrara un factor de aptitud de cero, los resultados se muestran a continuación.

El procedimiento utilizado para la aplicación de la metodología fue el siguiente:

1. Se genera una red de distribución con todas sus características hidráulicas, demandas de los usuarios, etc. El gasto de entrada debe ser igual a la suma de las demandas de los usuarios.
2. Se le agregan las fugas deseadas al modelo, dichas fugas pueden ubicarse en los nodos o en el centro de la tubería. El gasto de entrada para esta red será igual al gasto suministrado cuando no existían fugas más el volumen total de fugas.
3. Mediante EPANET se obtienen las presiones del modelo con fugas y estas pasan a ser las presiones objetivo.
4. Al cargar los datos de la red, todos deberán hacer alusión a la red sin fugas. Solamente las presiones objetivo (PRESIONES.TXT) deberán ser las calculadas en la red con fugas.

Cabe mencionar que, para la prueba de la metodología, la presión “física” de los nodos virtuales fue considerada; esto no sería posible en la aplicación práctica.

La opción de exportar datos le permite al usuario el seguir paso a paso la exploración de la PSO, las tendencias que se generan y en qué partes se están teniendo debilidades en la exploración o análisis de soluciones.

RESULTADOS

Para el análisis de resultados se despreciaron los valores marginales obtenidos, esto es, los resultado encontrados con el mayor y menor factor de aptitud de la simulación.

Se simuló la red en cuestión (Figura 5) para la función objetivo con penalización expresada en la ecuación (3). Con la finalidad de observar su comportamiento con diferente número de partículas, se ejecutó la rutina para escenarios con 25, 50, 75, 100 y 150 partículas en la PSO. La rutina se ejecutó en 7 simulaciones para cada caso. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de FA para diversos números de partículas

No. de Partículas	Tiempo medio [s]	FA media	Mejor FA	Peor FA
25	1,591.96	1.5975	0.8879	3.2212
50	3,004.12	0.8725	0.3507	1.7056
75	5,609.15	0.3083	0.1373	0.6177
100	6,588.96	0.7826	0.5609	1.3801
150	10,990.21	0.4393	0.2271	1.0173

La gráfica de la figura 6, muestra el inverso del Factor de Aptitud (1/FA) con la finalidad de hacer más evidente el mejor resultado encontrado para las simulaciones realizadas para los diversos número de partículas propuesto. En la figura 6 se observa que para el número de partículas igual a 75, se obtuvo el mejor factor de aptitud.

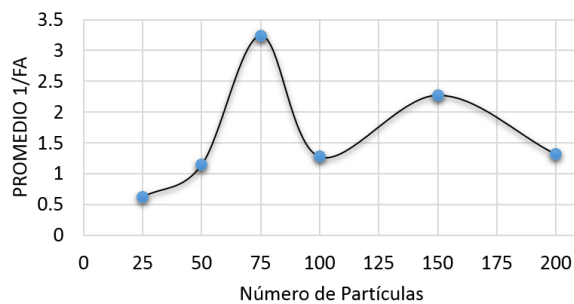


Figura 6. Impacto del número de partículas en un factor de aptitud con penalización

Al tener identificado el número de partículas óptimo para la aplicación de la metodología PSO para la detección de fugas, se simuló el mismo escenario con una función objetivo sin penalización y con penalización con 75 partículas. La función sin penalización es igual a la indicada en la ecuación (3), con la salvedad de que PVj y PDj siempre se les asignó el valor de cero. La simulación se realizó con una rutina que se ejecutó 102 veces y se descartaron los valores marginales.

Los factores de aptitud obtenidos con la función objetivo sin penalización fueron más bajos, pero esto

no quiere decir que sean mejores resultados, pues no se sanciona por soluciones no viables.

Como medio de comparación entre ambos métodos, se cotejó el mejor resultado obtenido con la función objetivo con penalización y aquella sin penalización. Los resultados en los gastos de consumo en los nodos son comparados con los gastos de la red propuesta, en la tabla 2, se muestran los gastos de consumo y las fugas, escenario (A). En el escenario (B) se muestran los consumos y fugas para el mejor resultado de factor de aptitud de la PSO con penalización. En el escenario (C) se muestran los consumos y fugas para el mejor resultado de factor de aptitud de la PSO sin penalización. Como se puede observar al no tener penalización, escenario (C), se han alcanzado los valores de fuga más cercanos en los nodo 2 y 14, considerando que son los nodos que en mayor medida excede el valor del gasto del escenario (A), sin embargo este escenario genera valores negativos de caudal. Para los resultados del escenario (B) con penalización, se logra controlar los caudales negativos pero no puede obtener una tendencia que muestre la localización de los nodos con fuga.

Tabla 2. Ajuste de los gastos para los diversos nodos.

ESCENARIO	Q (l/s) EN LOS NODOS						
	2	3	4	5	6	7	NV 8
(A)	22.00	16.00	5.00	20.00	19.50	14.00	0.00
(B)	20.69	16.61	5.22	20.66	19.79	14.61	0.63
(C)	21.94	15.23	4.46	20.00	20.10	14.87	0.30

ESCENARIO	Q (l/s) EN LOS NODOS VIRTUALES						
	9	10	11	12	13	14	15
(A)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50	0.00
(B)	0.25	0.05	0.56	1.07	0.44	0.22	0.39
(C)	1.00	-0.28	0.15	0.12	-0.07	2.44	-0.09

En la figura 7 se muestra gráficamente los mejores resultados obtenidos de factor de aptitud con penalización (escenario B) y sin penalización (escenario C) comparados con la solución (escenario A). En dicha gráfica no se aprecia fácilmente una solución más viable pues ambas convergen en casi los mismos resultados, aunque la función objetivo sin penalización en ocasiones produce resultados de caudales negativos.



Figura 7. Mejores resultados obtenidos por la rutina.

Al comparar los peores resultados obtenidos de factor de aptitud (figura 8), se aprecia que la función objetivo sin penalización (escenario C) no se asemeja en nada a la solución del problema. En cambio, la función objetivo con penalización (escenario B) obtiene resultados más consistentes.



Figura 8. Peores resultados obtenidos por la rutina.

Además de trabajar en las variables del número de partículas y penalizaciones, la configuración de la PSO para adecuarla lo mejor posible a la localización de fuga, se está implementando modificaciones al código que le brinde un mayor poder de exploración/explotación a la PSO. Dichas modificaciones comprenden diferentes fórmulas de vuelo, factores de inercia, reinicializaciones, división del enjambre en sub-enjambres, etc.

Otro punto a desarrollar es la combinación de diversas metodologías de búsqueda en un mismo enjambre e incluso, la posibilidad de que el usuario pueda interactuar con el enjambre en la búsqueda de soluciones.

El factor más importante por desarrollar es la conceptualización de una fuga como tal en la metodología. Actualmente, la fuga se considera como una demanda más y no como un emisor de fuga. Por último, En cuanto esté la configuración óptima de PSO con las variables y combinaciones

antes mencionadas, se requerirá la puesta a prueba de la metodología en una red real para verificar las fortalezas y debilidades de la técnica propuesta.

CONCLUSIONES

La rutina desarrollada es amigable, fácil de manipular y muy estable. La velocidad de la metodología comparada con otras técnicas heurísticas es mucho mayor.

La posibilidad de graficar el vuelo de la PSO permite al usuario el observar la convergencia de la metodología. Al observar que partes del espacio de búsqueda están quedando sin explorar y cuáles se están sobre-explorando, el usuario puede idear que parámetros implementar para evitar la rápida convergencia de la PSO.

La implementación de un factor de aptitud con penalización permite la obtención de soluciones factibles, a pesar de no obtener en algunas ocasiones un factor de aptitud demasiado bajo.

Considerando que el análisis de fugas con esta metodología es veloz, no requiere insumos, ni información adicional a la comúnmente usada por los organismos operadores es que se concluye que es una técnica viable a desarrollar.

La generación de nodos virtuales para la concentración de fugas en una tubería es un método sencillo para la detección de fugas. Esta conceptualización permite simplificar la búsqueda de una fuga en una red. Sin embargo, sería recomendable aumentar el número de nodos virtuales entre tuberías con la finalidad de delimitar más el problema.

BIBLIOGRAFÍA

- Bai Q. (2010) "Analysis of Particle Swarm Optimization Algorithm". *Computer and Information Science*. 3(1) 180-184. ISSN 1913-8997 (Online)
- Belsito, S., Lombardi, P., Andreussi, P. and Banerjee, S. (1998), "Leak detection in liquefied gas pipelines by artificial neural networks". *AIChE Journal*, 44 (12) 2675–2688. doi: 10.1002/aic.690441209

- Burn S., De Silva D., Eiswirth M., Hunaindi O., Speers A., Thornton J. (1999) "Pipe Leakage – future challenges and solutions" Pipes Conference, Wagga Wagga, N.S.W., 12-14.
- CONAPO (2007). Proyecciones de la población de México 2005-2050. México.
- De Silva D., Mashford, Burn S. (2011) Computer aided location and sizing in pipe networks. Urban Water Security Research Alliance Technical Report No 17. CSIRO. ISSN 1836-5558.
- Farrer H. (1979). "Control de fugas en redes de distribución de agua". Taller para ingenieros sobre operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Lima-Perú; CEPIS; Octubre 1979. 30 p.
- FAO (2011). Information System on Water and Agriculture, Aquastat. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=es> (07/04/2011).
- Fuentes-Mariles O., Rodríguez-Vázquez K., Palma-Nava A. (2010). "Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos" Ingeniería Investigación y Tecnología. 12 (2) 235-242. ISSN 1405-7743 FI-UNAM
- Gama L., Sánchez M., Ochoa C (2010). "Diseño de una interfaz para la detección de fugas de agua". Revista Digital Universitaria [en línea]. 11 (2) ISSN: 1607-6079.
- IMTA(2010). El agua se pierde 43.2% en fugas: ONU. <http://www.imta.gob.mx/internacional/index.php/noticias-internacionales/noticias-del-sector-hidrico-internacional/243-el-agua-se-pierde-432-en-fugas-onu.html>
- INEGI (2010). Volumen y Crecimiento. Población total en zona urbana por países seleccionados, 1950 a 2010. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/Default.aspx?t=mdemo114&s=est&c=23643>
- Izquierdo J., Montalvo I., Pérez-García R., Alonso C. (2010). Swarm Intelligence for Optimization in the Urban Water Industry. Modelling Simulation and Optimization, Gregorio Romero Rey and Luisa Martinez Muneta (Ed.), ISBN: 978-953-307-048-3.
- Kennedy J., Eberhart R. (2001). Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers. ISBN-13: 978-1558605954. Pp. 512
- Kingdom B., Liemberger R., Marin P. (2006) "The Challenge of reducing non-revenue water in developing countries". Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series. The World Bank Group. No 8.
- Lambert A. (2000). "What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems". Proceedings of IWA Conference 'System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management' in Brno, Czech Republic, in May 2000. ISBN 80-7204-197-5.
- May J., Pressure Dependent Leakage, World Water and Environmental Engineering, Octubre, 1994. p 10.
- Sosa F. (2010). "Exploring the risks of ineffective water supply and sewage disposal: A case of study of Mexico City". Environmental Hazards. V.9. Issue 2. Pp. 135-146. doi: 10.3763/ehaz.2010.0016
- Tafari A., Yezzi J., Watts D., Carlyle J. (1997). "Leak detection and leak location in underground pipelines". International oil spill conference proceedings. April 1997, Vol. 1997, No. 1, pp. 379-381. doi: 10.7901/2169-3358-1997-1-379