

Optimización multi-objetivo de ubicación de sensores de presión para diagnóstico de fugas en redes de distribución

Marco Quiñones-Grueiro* Cristina Verde**
Rolando Carrera***

* *Departamento de Automática y Computación, Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba (e-mail: marcosgg88@gmail.com)*
** *Instituto de Ingeniería, UNAM, México (e-mail: verde@unam.mx)*
*** *Instituto de Ingeniería, UNAM, México, (e-mail: RCarrera@unam.mx)*

Resumen: Se presenta un enfoque multi-objetivo para la ubicación de sensores en redes de distribución de agua (RDAs). El rendimiento de los métodos de detección y localización de fugas depende en gran medida de la cantidad, el tipo y la configuración de los sensores instalados en la red. Dado que las compañías de agua generalmente tienen un presupuesto limitado, determinar la ubicación de pocos sensores es una tarea importante y desafiante considerando las incertidumbres de la demanda, el ruido en la medición y el tamaño variante de las fugas. Este trabajo considera el objetivo de obtener una configuración de sensores que minimice simultáneamente el error en la detección de fugas y su localización. La tarea de colocación de sensores se formula entonces como un problema de optimización multi-objetivo. Se utiliza como caso de estudio una red real de gran escala que representa una versión del sistema de distribución de la ciudad de Modena con datos generados sintéticamente. La viabilidad de la propuesta se demuestra para escenarios con incertidumbre en la demanda, mediciones con ruido y tamaño de fuga variante.

Palabras clave: Optimización Multi-objetivo, Ubicación de Sensores, Detección y localización de fugas, Redes de ductos.

1. INTRODUCCIÓN

Fugas en RDAs ocurren debido a cargas excesivamente altas, alta presión interna, deterioro de la tubería debido a la corrosión o una combinación de esos factores (Puust et al., 2010). Las fugas causan pérdidas de agua con graves consecuencias económicas y ambientales para los consumidores y en las instalaciones. Por lo tanto, el monitoreo de fugas es una tarea relevante para reducir los riesgos económicos, ambientales y de salud pública.

El desempeño en la tarea de monitoreo de fugas depende en gran medida de la cantidad y el tipo de variables medidas en la RDA. Generosamente se instala un número limitado de sensores para medir el flujo y los cabezales de presión en algunos puntos. Se han propuesto técnicas de ubicación de sensores para las RDAs (Casillas et al., 2013). Hay diferentes objetivos detrás de los métodos de colocación de sensores. Algunos enfoques se han centrado en la minimización del número de fugas no detectables (Forconi et al., 2017; Venkateswaran et al., 2018). Mientras, otros minimizan el error en la localización de la fuga (Casillas et al., 2013; Cugueró-escofet et al., 2017). Sin

embargo, una configuración de sensores con una buena detección podría no garantizar una buena localización.

El problema arriba mencionado motiva este trabajo, cuya principal contribución es un enfoque multi-objetivo de ubicación de sensores para la detección de fugas y su localización bajo incertidumbre en la demanda, medición con ruido y tamaño variable de la fuga. Las principales suposiciones hechas en este trabajo son: el monitoreo de fugas se realiza en condiciones de flujo nocturno mínimo (FNM); y sólo se colocan sensores de presión en la red. El primer supuesto es debido al hecho de que las incertidumbres son mínimas en condiciones de FNM y esto simplifica la tarea de detección de fugas. El segundo supuesto se hace porque los costos iniciales de instalación, precio y mantenimiento de sensores de presión son generalmente más bajos.

La estructura de este trabajo es la siguiente. En la Sección 2 se introduce el modelado de una RDA. En la Sección 3, el problema de ubicación de sensores está formulado de forma independiente para detección y localización. Además, se propone el problema de optimización multi-objetivo. El caso de estudio, los detalles de la simulación y resultados se describen en la Sección 4. Las conclusiones y direcciones para trabajos futuros se dan en la Sección 5.

* Financiamiento IT100519-PAPIIT-UNAM, y Conv2016-3, Fondo Sectorial CONACyT-Secretaría de Energía-Hidrocarburos.

2. MODELADO DE RDAS

El comportamiento de las RDAs formadas por N nodos y P tuberías se rige por las leyes físicas que describen las relaciones de flujo y presión en las tuberías y los elementos de control hidráulico. Sus valores dependen de las demandas de los consumidores, así como de la estructura del sistema. Para una unión o nodo n , la relación entre flujos está dada por

$$\sum_{i=1}^{I_n} q_i - \sum_{j=1}^{J_n} q_j = d_n, \text{ for } n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

donde q_i y q_j denotan flujos de entrada y salida en el nodo n respectivamente, I_n y J_n denotan la cardinalidad del conjunto de tubos con flujos de entrada y salida conectados al nodo n respectivamente, d_n es la demanda respectiva.

La diferencia de presión ΔH entre dos puntos de una red de agua es igual a las caídas de presión (h_g) producidas por G elementos más los levantamientos de la presión (h_w) generados por W elementos. Esto es matemáticamente equivalente a la afirmación de que en cualquier lazo cerrado la presión alrededor del lazo se hace cero (Houghtalen and Hwang, 2010). Esto se puede expresar como

$$\sum_{g=1}^G h_g + \sum_{w=1}^W h_w = \Delta H, \quad (2)$$

La relación entre el flujo q y la caída de presión h_f en una tubería sin tomas laterales se puede describir mediante diversas ecuaciones, que incluyen las proposiciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams (Houghtalen and Hwang, 2010). La relación general toma la forma

$$h_f = \theta q^\alpha, \quad (3)$$

donde θ es un parámetro del tubo que depende del diámetro, longitud y material; además, el exponente α tiene un valor alrededor de dos (Houghtalen and Hwang, 2010).

Por simplicidad, cada escenario de fuga considera sólo la posibilidad de una fuga de valor f_l en el nodo l . Esto significa que una fuga desconocida afecta a la ec. (1) como sigue

$$\sum_{i=1}^{I_l} q_i - \sum_{j=1}^{J_l} q_j = d_l + f_l ; f_l = C_l h_l^\gamma \quad (4)$$

donde $\gamma = 0.5$ y C_l es un coeficiente de descarga conocido como coeficiente de emisión que es proporcional al tamaño del orificio de fuga (Houghtalen and Hwang, 2010; Rossman, 2000). El flujo de salida producido por una fuga afecta la relación de conservación de masa en la misma forma que una variación de la demanda. Por lo tanto, la incertidumbre asociada con la demanda estimada para cada nodo deteriorará el diagnóstico.

3. UBICACIÓN DE SENSORES PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS EN RDA

La metodología adoptada para la detección de fugas en este documento se presenta en la Fig. 1. Se estima un

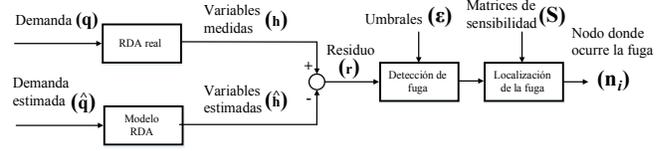


Figura 1. Esquema de detección y localización de fugas

conjunto de variables según el modelo de la RDA con las demandas estimadas de los consumidores como entradas. La diferencia \mathbf{r} entre las salidas del modelo y las variables medidas en la red real se compara con un vector de umbral para determinar la presencia de una fuga. Posteriormente, la ubicación de la fuga se realiza con otro método. En este trabajo se utiliza el siguiente conjunto de suposiciones para la detección y localización de la fuga:

- Detección y localización de la fuga es realizada en regimen de flujo mínimo nocturno (FMN).
- Hay M ($M \leq N$) sensores de presión instalados en la red.
- Sólo ocurre una fuga en la red. Un escenario es sinónimo de una fuga.

Además, el número de sensores instalados se limita a $M \leq N$.

3.1 Detección de fugas en RDAs

La detección de fugas se realiza comparando las salidas del modelo hidráulico con las mediciones en campo de los sensores instalados en la red. Las mediciones de la presión en la RDA real $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^M$ se comparan con las salidas del modelo RDA $\hat{\mathbf{h}} \in \mathbb{R}^M$. La tarea de detección de fugas se define de la siguiente manera:

Detección de una fuga 1. Una fuga es detectada si el valor absoluto del residuo cumple la siguiente condición:

$$|\mathbf{r}| = |\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}}| > \epsilon \quad (5)$$

donde M es el número de sensores instalado en la RDA y $\epsilon \in \mathbb{R}^M$ es un vector de umbrales.

El valor de cada elemento $\epsilon_n \in \epsilon$ depende de la incertidumbre típica asociada con los parámetros del modelo, la demanda y el ruido de medición. La detección se realiza a partir de una prueba de hipótesis univariada que compara el valor del residuo con un umbral previamente definido. Específicamente, el umbral ϵ_n es el valor del residuo en el cuartil del 97% basado en la distribución de densidad de probabilidad calculada vía la estimación de densidad del Kernel. La demanda suele presentar un comportamiento no estacionario durante el día. Sin embargo, bajo el régimen de flujo nocturno mínimo (FNM), se puede suponer que la demanda es cuasi-estacionaria y sigue una distribución gaussiana con una variancia que depende de la incertidumbre. Debido a este hecho, la detección de fugas en períodos de tiempo en los que se mantienen las condiciones de FNM ha logrado un desempeño exitoso en condiciones reales (Farah and Shahrour, 2017). En este documento, el vector de umbral se calcula en función de la distribución de un conjunto de datos generados sintéticamente sin fugas. Por lo tanto, el número de falsas alarmas se limita teóricamente a igual o menor que 3%

3.2 Ubicación de sensores para la detección de fugas

La selección de las posiciones de los sensores para minimizar el error de detección de fugas dados M instrumentos disponibles se resuelve como un problema de optimización combinatoria. Una configuración de sensores está definida por el siguiente vector binario

$$\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} ; \sum_{i=1}^N x_i = M \quad (6)$$

donde $x_i = 1$ si la presión en el nodo i es medida, de lo contrario $x_i = 0$. El residuo para una configuración se obtiene de la siguiente manera

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = X(\mathbf{x})\mathbf{r}^* \quad (7)$$

donde $\mathbf{r}^* \in \mathbb{R}^N$ considera todos los nodos, y $X(\mathbf{x}) = \text{diag}\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$. Dados I vectores de residuos $\mathbf{R} = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_I\}$ generados a partir de I escenarios de fugas, el problema de ubicación de sensores para minimizar el error de detección de fugas se indica a continuación

$$\mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^N} \sum_{i=1}^I ed_i(\mathbf{x}) \text{ sujeto a } \sum_{i=1}^N x_i = M \quad (8)$$

donde

$$ed_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{si } |\mathbf{r}_i(\mathbf{x})| > \epsilon \\ 1 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (9)$$

$\mathbf{r}_i(\mathbf{x})$ es el residuo para el escenario de fuga i con la configuración de sensores \mathbf{x} .

La generación de I escenarios de fuga es una parte crucial del método de ubicación de sensores porque la configuración obtenida al resolver el problema de optimización minimizará la función con respecto a estos escenarios. En RDA medianas o grandes puede ser difícil obtener datos de fugas de diferentes tamaños en cada nodo porque no es probable que ocurran. Por lo tanto, se debe generar un conjunto completo de escenarios de fugas utilizando un modelo de la red considerando las condiciones estocásticas del sistema real. Si los escenarios utilizados en el problema de optimización no son representativos de la condición de operación nominal de la red y de los tamaños de fuga que puedan ocurrir en cualquier nodo, entonces la configuración obtenida tendrá un desempeño pobre en situaciones reales. Por lo tanto, se deben considerar tres elementos para generar, en el modelo, escenarios que recreen las mediciones de la red real: 1) Se deben generar fugas de diferentes tamaños en cada nodo candidato de la red, 2) Debe considerarse la incertidumbre en la demanda durante la simulación y 3) El ruido de medición típico de los transductores utilizados en el campo se debe agregar a las señales de salida. Se pueden encontrar más detalles sobre cómo se consideran estas incertidumbres en este trabajo en la Sec. 4.1.

3.3 Localización de fugas en RDAs

La localización de la fuga basada en modelos de una RDA se realiza generalmente comparando la similitud entre el vector de residuos \mathbf{r} y un conjunto de vectores de firma de fuga generados sintéticamente (Casillas et al., 2013; Cugueró-escofet et al., 2017). Estos vectores están

organizados en una matriz de firma de fuga $S \in \mathbb{R}^{M \times L}$ definida de la siguiente manera (Casillas et al., 2013)

$$S_u = [\mathbf{s}_1 \ \mathbf{s}_2 \ \dots \ \mathbf{s}_L] ; \mathbf{s}_j = \begin{bmatrix} s_{1,j} \\ s_{2,j} \\ \vdots \\ s_{M,j} \end{bmatrix} ; s_{i,j} = \frac{h_{i,j} - h_i}{l_j} \quad (10)$$

donde L es el número de escenarios de fuga localizados en los nodos de la RDA, \mathbf{s}_j es el vector de firma de fuga para el nodo j dados M sensores, h_i y $h_{i,j}$ son la presión estimada en el nodo i sin fugas y con una fuga en el nodo j respectivamente, y l_j es el flujo de fuga. Se supone que las fugas se producen sólo en los nodos $L \leq N$. Aquí, el índice u denota las condiciones de operación bajo las cuales se ha generado la matriz S .

La similitud entre el residuo y cada vector de firma se utiliza para la localización de la fuga. La métrica considerada para calcular tal similitud está definida por

$$\psi_j = \frac{\mathbf{r}^T \mathbf{s}_j}{|\mathbf{r}| |\mathbf{s}_j|} \quad (11)$$

donde ψ_j representa la proyección del residuo en el vector de firma \mathbf{s}_j asociado con una fuga que ocurre en el nodo j . Dicha métrica presenta buenos resultados para la localización de la fuga según estudios previos de (Cugueró-escofet et al., 2017). El problema de localización de una fuga se formula de la siguiente manera

Localización de la fuga 1. Una fuga se encuentra en el nodo j_u si se cumple la siguiente condición:

$$\psi_{j_u} = \max(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{L_u}) \quad (12)$$

donde j_u corresponde al nodo j asociado con el vector de firmas de fuga \mathbf{s}_{j_u} de la matriz de firmas S_u .

Los valores de la matriz de firmas S_u dependen del tamaño específico de las fugas y las condiciones de operación de la red, por lo tanto no es única. Bajo el régimen de FMN asumido en este documento, las condiciones de operación no causan cambios significativos. Sin embargo, aún debe estimarse el tamaño de la fuga para seleccionar la matriz adecuada que resuelva el problema de ubicación. Para resolver este problema se propone el uso de un conjunto de matrices de sensibilidad $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_U\}$ definido para diferentes tamaños de fugas. La idea es primero seleccionar el vector de firma que maximice la medida de similitud para cada matriz. La ubicación del nodo se asocia entonces con el índice del vector de firma con la máxima similitud entre todos los calculados previamente.

Localización robusta al variar el tamaño de la fuga 1. Una fuga es localizada en el nodo j_u si la siguiente condición es satisfecha:

$$\psi_{j_u} = \max_{u \in [1, U]} (\max_{l_u \in [1, L_u]} (\psi_{l_u})) ; \quad (13)$$

donde ψ_{l_u} representa la similitud entre el vector de residuos \mathbf{r} y un vector de firmas de fuga \mathbf{s}_{l_u} de la matriz S_u .

3.4 Ubicación de sensores para detección de fugas

El objetivo de la ubicación de sensores es, dados M sensores disponibles, seleccionar sus posiciones tal que mi-

nimicen el error de ubicación de fuga. Una configuración de sensores se define por el vector binario \mathbf{x} . Identificar la ubicación exacta de nodos de fugas en RDAs de tamaño mediano o grande requiere demasiados sensores (Cugueróscotet et al., 2017). Por lo tanto, el algoritmo estima una región centrada en un nodo y limitada por un umbral de distancia topológica d_{th} definido por el usuario antes de resolver el problema de optimización. El objetivo del enfoque de ubicación del sensor es asegurar que la distancia topológica entre el nodo donde se identifica la fuga y el nodo donde se encuentra realmente esté delimitada por d_{th} .

La distancia topológica $d_{top}(i, j)$ se define como la ruta más corta entre dos nodos al considerar la red como un grafo ponderado $G(V, E)$ formado por un conjunto de vértices (nodos de demanda de red) V y un conjunto de aristas (tuberías de la red) E donde el peso de una arista corresponde a la longitud de la tubería de conexión. Por lo tanto, cuando se identifica una fuga en un nodo determinado, todas las tuberías y nodos conectados con una longitud menor que d_{th} se consideran como la región de la posible ubicación de la fuga. La selección de d_{th} también es importante porque si se selecciona un valor pequeño no factible, el problema de optimización se reduce a identificar el nodo exacto donde ocurre la fuga. Por lo tanto, el valor mínimo de este parámetro debe ajustarse según la distancia topológica promedio entre dos nodos adyacentes cualquiera de la red.

El problema de ubicación de sensores se formaliza de la siguiente manera. Dados K vectores de residuos $\mathbf{R} = \{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_K\}$ obtenida de fugas detectables, minimizar el error de localización de fuga está dado por

$$\mathbf{x} = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^N} \sum_{k=1}^K \frac{el_k(\mathbf{x})}{K} \quad \text{sujeto a} \quad \sum_{i=1}^N x_i = M \quad (14)$$

donde

$$el_k(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{si } d_{top}(\hat{j}^k, j^k) < d_{th} \\ 1 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (15)$$

y \hat{j}^k es el nodo donde se localiza la fuga para el escenario k de acuerdo con la Ec. 13, $d_{top}(\hat{j}^k, j^k)$ es la distancia topológica entre el nodo j^k donde ocurre la fuga y el nodo estimado \hat{j}^k , d_{th} es el umbral de distancia. Un conjunto de matrices de sensibilidad $\mathbf{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_U\}$ se define para diferentes magnitudes de fuga y la dimensión de la matriz corresponde al conjunto candidato de nodos potenciales donde pueden ocurrir fugas ($L = N$ si todos los nodos de la red son candidatos a fugas). El algoritmo de Dijkstra (Cormen et al., 2009) se usa en este trabajo para encontrar las rutas más cortas entre dos nodos de la red.

3.5 Ubicación de sensores multi-objetivo

En la práctica, se desea detectar fugas con una magnitud pequeña, así como localizarlas con un error pequeño. Por lo tanto, la solución simultánea de la detección de fugas y su ubicación es considerada como un problema de optimización multi-objetivo de la siguiente manera

$$F_d = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^N} \sum_{i=1}^I \frac{ed_i(\mathbf{x})}{I} \quad (16)$$

$$F_l = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^N} \sum_{k=1}^K \frac{el_k(\mathbf{x})}{I} \quad (17)$$

$$\text{sujeto a} \quad \sum_{i=1}^N x_i = M \quad (18)$$

donde M representa el número de sensores a ser ubicado, ed_i y el_i son calculados de acuerdo a las Ecs. 9 y 15. Nótese que los escenarios para evaluar el desempeño de la detección y localización de fugas no son los mismos. Solo las fugas que son detectadas se utilizan para evaluar el desempeño de la ubicación.

El objetivo de resolver el problema multi-objetivo es encontrar el conjunto de soluciones Pareto (Deb et al., 2002). Una solución óptima Pareto significa que no hay otra solución viable que mejore una función objetivo sin degradar al menos una de las otras funciones. Del conjunto de Pareto, un experto debe seleccionar la solución que mejor se adapte a los requisitos del sistema en particular.

Se utiliza un algoritmo genético elitista controlado basado en el algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) (Deb et al., 2002) para resolver el problema de optimización. Como resultado del proceso de optimización se obtiene un conjunto de soluciones no inferiores, también llamadas frentes de Pareto. Los puntos de solución no inferiores son aquellas soluciones en el espacio donde una mejora en una función objetivo implica una degradación en el otro objetivo. El algoritmo se basa en una población donde cada individuo representa una posible solución al problema dado. Se aplican tres operadores matemáticos sobre la población de cada generación para buscar soluciones no inferiores: selección, cruce y mutación. El elitismo controlado favorece a los individuos con el mejor valor de ajuste, pero también a individuos que pueden ayudar a incrementar la diversidad de la población. Las condiciones de parada son un máximo de 500 generaciones y si el cambio promedio en la extensión del frente de Pareto en las 100 generaciones es inferior a una tolerancia de 10^{-10} . La extensión es una medida del movimiento del conjunto de Pareto. Finalmente, dado que las poblaciones iniciales se inicializan aleatoriamente, los resultados podrían estar mal condicionados por estos valores iniciales. Por lo tanto, el algoritmo se ejecuta diez veces con una población de 30 miembros.

4. CASO DE ESTUDIO

Como un caso de estudio se selecciona una representación de la RDA de la ciudad de Modena. La red a gran escala alimentada por gravedad que se muestra en la Fig. 2 tiene una estructura en lazos y está formada por 317 tuberías y 268 nodos de demanda. Los diámetros de la tubería se establecen de acuerdo con (Wang et al., 2015). Se generan sintéticamente un total de 10 fugas por cada nodo para resolver el problema de ubicación de sensores (2680 escenarios de fugas). Se considera un período de muestreo de 15 minutos y se usan valores promedio por

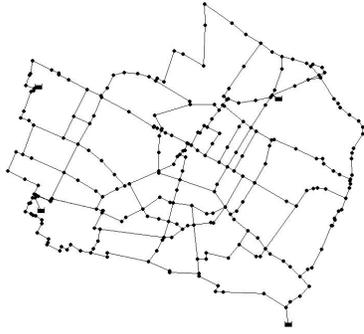


Figura 2. Red de Modena

hora de las mediciones con el objetivo de reducir el efecto de las incertidumbres.

Se ha utilizado el paquete EPANET (Rossman, 2000) para simular el comportamiento de la RDA junto con MATLAB.

4.1 Incertidumbre en la demanda, mediciones y tamaño de la fuga

Para simular el caso de estudio se utiliza una distribución uniforme muestreada para generar demandas inciertas, ruido de medición y tamaño de fuga variable de la siguiente manera:

1. Se produce una sola fuga en cada escenario con una magnitud relacionada con el tamaño del coeficiente del emisor en el rango $C_e \in [0.01, 2]$. El tamaño de la fuga está entre el 0,01 % y el 3 % de la demanda total de la red. Pequeñas fugas favorecen la búsqueda de configuraciones de sensores que garanticen su detección. Fugas grandes son simuladas para maximizar la localización de las fugas entre diferentes tamaños de fugas. Los coeficientes de emisores mayores a 2 provocan fugas que probablemente sean reportadas primero por los usuarios porque la caída de presión en los nodos es muy grande.
2. Las mediciones de presión están contaminadas con ruido blanco aditivo (media cero y 0.025 m de variancia).
3. La demanda tiene un valor incierto tomado de una distribución gaussiana con una media establecida según el consumo nominal de cada nodo y una variancia del 5 % de ese consumo nominal. Así, la incertidumbre alta está asociada a nodos de alto consumo. El umbral de variancia es estático porque se supone un régimen FMN.

4.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El problema de ubicación de sensores se resuelve para 5, 10 y 15 sensores de presión. La distancia topológica promedio entre dos nodos adyacentes cualquiera en la red es de 225.89 metros. Por lo tanto, el umbral de distancia d_{th} se elige de 500 metros para flexibilizar el tamaño de la región de fuga a estimar. Los umbrales de detección calculados para cada nodo con base en las incertidumbres simuladas se muestran en la Fig. 3. El

umbral para el residuo de cada nodo ϵ_n se calcula en el cuartil del 97 % según la distribución de densidad de probabilidad calculada a través de estimación de densidad Kernel. El umbral de detección de los residuos depende de la variabilidad típica de la demanda en condiciones nominales de FMN.

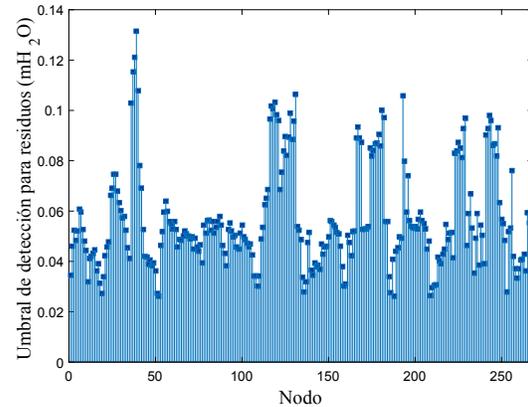


Figura 3. Umbrales de detección para los residuos de cada nodo de la RDA

Los frentes de Pareto encontrados para cada número de sensores se presentan en la Fig. 4. Se puede observar que cuando el número de sensores aumenta se pueden encontrar mejores configuraciones para la detección y localización de fugas. La Fig. 5 muestra las soluciones

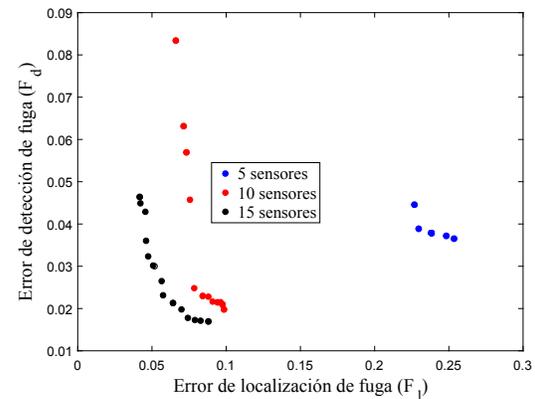


Figura 4. Frentes de Pareto para diferentes números de sensores

factibles cuando se colocan 10 sensores en la red. El frente de Pareto en el espacio objetivo se muestra con diamantes negros. Se puede apreciar que la mejor configuración para la detección de fugas ($F_d = 0.019$) no es la mejor para la localización de fugas (el mejor rendimiento de la localización es $F_l = 0.066$). Por lo tanto, se debe establecer un compromiso para seleccionar la configuración apropiada. La configuración que equilibra ambos objetivos tiene un rendimiento de $F_d = 0.024$ y $F_l = 0.077$.

La figura 6 muestra la configuración para 10 sensores en la red con un compromiso ($F_d = 0.024$, $F_l = 0.077$).

La detección de fugas se realiza usualmente empleando las señales de los sensores de flujo ubicados en los puntos

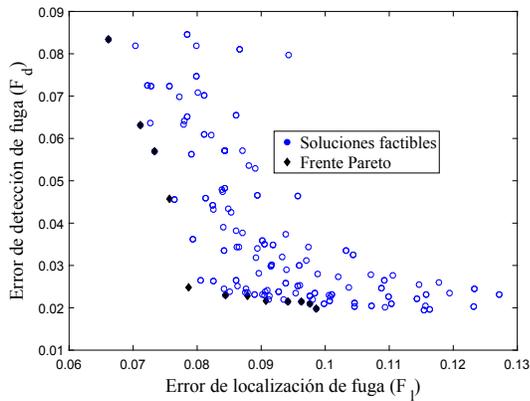


Figura 5. Espacio de soluciones factibles y frentes Pareto para 10 sensores

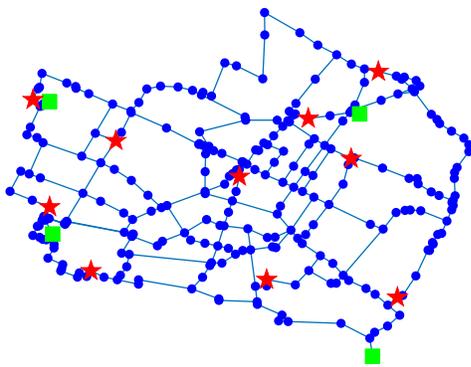


Figura 6. Configuración compromiso que maximiza localización y detección de fuga. ● nodo de demanda, ◇ tanque y ★ sensor.

de entrada de la red. En la red de Modena existen cuatro tanques por lo que se suponen cuatro sensores instalados. Los sensores de presión que se instalan en redes de gran escala permiten mejorar el desempeño en la detección que se logra solo con los sensores de flujo. Para demostrar esto se generó un nuevo conjunto de datos con las mismas condiciones de la demanda pero con fugas de los siguientes tamaños $C_e = [0.01 \ 0.03 \ 0.05 \ 0.07 \ 0.09 \ 1 \ 1.2 \ 1.4 \ 1.6 \ 1.8 \ 2]$. Los resultados en la detección correspondiente a la configuración que considera la detección y la localización (10 sensores de presión) son comparados con la utilización de los cuatro sensores de flujo en la tabla 1.

Tabla 1. Desempeño en la detección de fuga utilizando diferentes sensores (FM: Flujo, P: Presión))

Precisión del sensor	F	P	F + P
Tres decimales	0.78	0.80	0.87
Dos decimales	0.77	0.78	0.85
Un decimal	0.77	0.75	0.84

Como puede observarse, la detección que se alcanza con la configuración de 10 sensores de presión es ligeramente mejor que usando solo sensores de flujo. Sin embargo, el mejor desempeño se logra a partir de utilizar los 14

sensores, por lo que puede concluirse que los sensores de presión mejoran la detección en casi un 10%. Se observa además que cuando el sensor utilizado presenta una peor precisión, los resultados en la detección también empeoran.

5. CONCLUSIONES

Se presenta un enfoque multi-objetivo para la colocación de sensores en redes de distribución de agua. Los objetivos del método son minimizar los errores tanto de la detección de fugas como de su ubicación. La propuesta permite encontrar una configuración adecuada que equilibre el desempeño en la detección y localización de fugas. Los experimentos con una red real con datos sintéticos demuestran que si los objetivos no se consideran simultáneamente, entonces la configuración encontrada no es óptima en una de las funciones objetivo. El enfoque propuesto es una herramienta útil para redes de agua.

REFERENCIAS

Casillas, M.V., Polit, P., Garza-casta, L.E., and Rosich, A. (2013). Optimal Sensor Placement for Leak Location in Water Distribution Networks Using Genetic Algorithms. *Sensors*, 13. doi:10.3390/s131114984.

Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., and Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms*. MIT Press.

Cugueró-escofet, M.À., Puig, V., and Quevedo, J. (2017). Optimal pressure sensor placement and assessment for leak location using a relaxed isolation index: Application to the Barcelona water network. *Control Engineering Practice*, 63, 1–12.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197.

Farah, E. and Shahrour, I. (2017). Leakage detection using smart water system: Combination of water balance and automated minimum night flow. *Water Resources Management*, 31(15), 4821–4833.

Forconi, E., Kapelan, Z., Ferrante, M., Mahmoud, H., and Capponi, C. (2017). Risk based sensor placement methods for burst/leak detection in water distribution systems. *Water Science & Technology*, 17(6), 1663–1672.

Houghtalen, R. and Hwang, N.H.C. (2010). *Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems*. Prentice Hall.

Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D.A., and Koppel, T. (2010). A Review of Methods for Leakage Management in Pipe Networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25–45.

Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2 User's Manual*. United States Environmental Protection Agency.

Venkateswaran, P., Han, Q., Eguchi, R.T., and Venkatasubramanian, N. (2018). Impact Driven Sensor Placement for Leak Detection in Community Water Networks. doi:10.1109/ICCPS.2018.00016.

Wang, Q., Guidolin, M., Savic, D., and Kapelan, Z. (2015). Two-Objective Design of Benchmark Problems of a Water Distribution System via MOEAs : Towards the Best-Known Approximation of the True Pareto Front. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3), 1–14.