

# Optimización multi-objeto para la mejora de equidad y fiabilidad en redes de abastecimiento intermitente

## *Multi-object optimization for the improvement of equity and reliability in intermittent supply networks*

David Ferras<sup>®</sup>,<sup>1</sup>, Passwell Pepukai Nyahora<sup>1,2</sup>, Andres Amen<sup>3</sup>, João Ferreira<sup>4</sup>, Mukand Singh Babel<sup>2</sup>

© Autor correspondente: joao.cavaleiro.ferreira@tecnico.ulisboa.pt

<sup>1</sup> Environmental Engineering and Water Technology, IHE Delft Institute of Water, Delft, 2611 AX, The Netherlands.

<sup>2</sup> Water Engineering and Management, Asian Institute of Technology, Bangkok, 12120, Thailand.

<sup>3</sup> POLICONSTRUC-ALEXER Consortium, Ecuador.

<sup>4</sup> CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal.

**RESUMEN:** Sistemas de redes en régimen intermitente están sometidos a una serie de problemáticas como distribución desequilibrada, baja fiabilidad y pobre calidad de agua. La toma de decisiones en redes intermitentes es compleja y, a pesar de los limitados recursos naturales y económicos, la provisión del servicio de agua es primordial. Hasta la fecha, poca investigación ha sido dirigida a la mejora de sistemas de abastecimiento de agua intermitentes o a su transición a sistemas en régimen continuo.

En el presente estudio una herramienta de optimización multi-objeto por medio de un algoritmo genético es desarrollada para dar soporte a la toma de decisiones. Equidad y fiabilidad de la red son maximizadas versus el coste de las actuaciones asociadas. Las actuaciones se han clasificadas en sustitución de tuberías, bombas de elevación y depósitos de distribución. El código implementado es finalmente verificado usando una red sintética.

Palabras clave: Equidad, fiabilidad, abastecimiento intermitente, optimización multi-objeto, algoritmos genéticos.

**ABSTRACT:** Intermittent network systems are subjected to a series of problems such as unbalanced distribution, low reliability and poor water quality. Decision making in intermittent networks is complex and, despite the limited natural and economic resources, the provision of water service is a priority. To date, little research has been focused on the improvement of intermittent water supply or on the transition to continuous systems.

*In the present study, a multi-object optimization tool based on a genetic algorithm is developed to support decision making. Equity and reliability of the network are maximized versus the cost of the proposed measures. The intervention measures have been classified in the replacement of pipes, of pumps and of storage tanks. The implemented code is finally verified using an artificial network.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los objetivos para el desarrollo sostenible (SDG, *Sustainable Development Goals*) abogan por la mejora de los servicios de abastecimiento y saneamiento de agua en términos de cantidad y calidad a una escala global. La visión SDG-6 es alcanzar el acceso universal, seguro e igualitario de agua para el consumo humano a partir del año 2030 (United Nations, 2015). No obstante, a pesar de una tendencia positiva al acceso de agua en términos de espacio, parece que durante los últimos años el abastecimiento es menor en términos de tiempo.

Históricamente los diseños de redes de distribución se han basado en modelos orientados a demanda y presuponiendo sistemas continuamente presurizados. Sin embargo, solo el 37% de la población mundial con acceso a agua tiene un abastecimiento de más de 12 horas por día (WHO & UNICEF, 2017). Períodos de sequía o un crecimiento urbano no planificado, pueden catalizar una gestión en régimen intermitente que los gestores toman como solución temporal para superar la crisis de escasez. Desafortunadamente, una vez se empieza a operar en régimen intermitente es muy difícil revertir la situación (Charalambous & Laspidou, 2017).

Los métodos de optimización multi-objeto (MOO) son usados para la mejora de sistemas de abastecimiento considerando los requisitos de los usuarios finales (Farmani, Walters, & Savic, 2005; Prasad, 2010). Algoritmos Genéticos son usualmente usados como solución al problema de optimización. Investigación precedente en redes intermitentes se basa en la determinación de sus causas (Simukonda, Farmani, & Butler, 2018), rendimiento (Andey & Kelkar, 2007) e impactos (Agathokleous & Christodoulou, 2016; Galaitsi *et al.*, 2016). Los autores recomiendan varias medidas, estructurales y no estructurales, para la mejora del servicio. Las intervenciones estructurales son complejas, puesto que requieren la combinación de numerosas soluciones; su selección óptima es un problema aun no abordado en la literatura científica. La presente investigación pretende considerar una serie de intervenciones para su optimización tomando como referencia criterios de equidad y fiabilidad respecto a costes de inversión. Equidad en el servicio de agua se refiere a la distribución de una cantidad justa entre los usuarios a través del sistema de abastecimiento (Ameyaw, Memon, & Bிக, 2013; Ilaya-Ayza, Martins, Campbell, & Izquierdo, 2017). Esta cantidad justa se puede medir tanto en espacio como en tiempo. Aplicar equidad en redes intermitentes es un reto

complejo que está sujeto a numerosos factores, e.g. presiones, demandas, velocidades, duración y programa del abastecimiento, configuración de la red, etc. (Ilaya-Ayza, Martins, Campbell, & Izquierdo, 2018). Fiabilidad se refiere a la capacidad de la red para abastecer a los usuarios con adecuada cantidad y calidad de agua ante condiciones normales y anormales (Xu & Goulter, 1998; Farmani, Walters, & Savic, 2006). El índice de fiabilidad propuesto por Todini (2000) es frecuentemente usado para la evaluación de redes y se basa en la capacidad de redundancia y la fiabilidad hidráulica de los sistemas de distribución.

El reto de redes operando en régimen intermitente es un problema evidente y global; herramientas para su precisa evaluación y gestión deben de ser desarrolladas con el objetivo último de la mejora de los sistemas de abastecimiento. Una optimización integrada basada en un algoritmo genético combinado con solución numérica orientada a presiones es propuesto en el presente trabajo para abordar la problemática de equidad y fiabilidad en abastecimientos intermitentes.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Fundamentos teóricos

MOO son usados para la mejora de la eficiencia de sistemas físicos por medio del ajuste de sus componentes y siguiendo unos criterios específicos, i.e. funciones objetivo. El algoritmo usado en el presente trabajo de investigación se basa en el "Non-dominant Sorting Genetic Algorithm" (NSGA-II) que fue originariamente desarrollado por Deb *et al.* (2002). La principal ventaja de NSGA-II es la reducción del tiempo computacional resolviendo problemas multi-objeto. También permite una mayor diversidad de las soluciones y uniformidad de soluciones Pareto.

Equidad y fiabilidad en redes de abastecimiento intermitente son los objetivos perseguidos en este trabajo de optimización. Para el primer objetivo el coeficiente de uniformidad (UC) es usado (Ilaya-Ayza *et al.*, 2018)

$$UC = 1 - \frac{\sum |S_p - S_{av}|}{S_{av} * n_e} \quad (1)$$

donde  $S_p$  es el ratio de abastecimiento nodal,  $S_{av}$  es el ratio abastecimiento medio, y  $n_e$  es el número total de nodos. Valores bajos de UC indican poca equidad en el sistema mientras que valores cercano de uno indican elevada equidad.

La fiabilidad del sistema es evaluada por medio del

índice de resiliencia ( $I_r$ ):

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n \text{ node}} q_i (h_{ava,i} - h_{req,i})}{\sum_{j=1}^{n \text{ reservoirs}} Q_j H_j + \sum_{i=1}^{n \text{ node}} q_i h_{req,i}} \quad (2)$$

Donde  $q_i$  es la demanda nodal,  $h_{ava}$  es la carga hidráulica al nodo  $i$ ,  $h_{req}$  es la mínima carga permitida,  $Q_j$  y  $H_j$  son el caudal y la carga hidráulica respectiva en cada tanque,  $\gamma$  es el peso específico del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>) y  $P_k$  la potencia de los sistemas de bombeo (Todini, 2000; Farmani *et al.*, 2006). Valores de  $I_r$  cercanos a cero indican fiabilidad baja, mientras que cercanos a uno indican fiabilidad elevada.

Puesto que ambos índices son cruciales para el buen funcionamiento de redes de distribución, en el presente estudio son combinados por medio de factores de peso ( $w_1$  &  $w_2$ ) para formar una función objetivo única (ER).

$$ER = w_1(UC) + w_2(I_r) \quad (3)$$

El coste total de inversión consta de la suma de los costes de sustitución de tubería, estaciones de bombeo y depósitos. El coste objetivo es penalizado en base para asistir a la convergencia de una solución. Ecuación (4) muestra como los costes son minimizados cuantificados:

$$Cost = C_{pipes} + C_{pump} + C_{tank} + P \quad (4)$$

donde  $C_{pipes}$  es el coste de sustitución de tubería,  $C_{pump}$  el de las estaciones de bombeo,  $C_{tank}$  el de los depósitos y  $P$  es la penalización. La penalización es expresada en la siguiente Ec. (5):

$$P = \begin{cases} \alpha (|h_i - h_{max/min}|) + \beta, & \text{si } h_{min} < h_i < h_{max} \\ 0, & \text{si } h_{min} > h_i \text{ o } h_i > h_{max} \end{cases} \quad (5)$$

donde  $h_i$  es la presión nodal,  $h_{min}$  y  $h_{max}$  son los umbrales de mínima y máxima presión y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de penalización (Kim, Choi, Lee, & Jung, 2017).

La base del proceso de optimización es por la herramienta de modelización hidráulica EPANET por medio de WNTR (*Water Network Tool for Resilience*), un paquete desarrollado en Python por Klise *et al.* (2017) que permite crear, simular y analizar redes de distribución de agua. Las índices mostrados en las Ecs. (1) (2) y (3) son calculados en base a EPANET output. En la Tabla 1 se listan los parámetros usados para llevar a cabo el trabajo de optimización.

**Tabla 1.** Parámetros de optimización

Parámetro	Valores
Peso 1 ( $w_1$ ) y Peso 2 ( $w_2$ )	0.5
Población inicial	25 - 225
Número de Generaciones	80 - 500
Probabilidad de cruce	0.9 - 1
Probabilidad de mutación	0 - 0.1
Alfa ( $\alpha$ )	10000
Beta ( $\beta$ )	1000
Presión mínima ( $P_{min}$ ) & máxima ( $P_{max}$ ) (m)	30 - 100
Nuevo diametro de tubería (mm)	
Hanoi	305.0 - 1016.0
Milagro	59.0 - 295.6
Diámetro de depósito (m <sup>3</sup> )	150 - 500
Cota del depósito (m)	
Hanoi	35 - 50
Milagro	15 - 30
Caudal y carga de bomba (l/s, m)	
Hanoi	(300,50), (300,60), (300,70), (300,80), (300,90), (300,110)
Milagro	(100,50), (100,60), (100,70), (100,30), (100,35), (100,40),

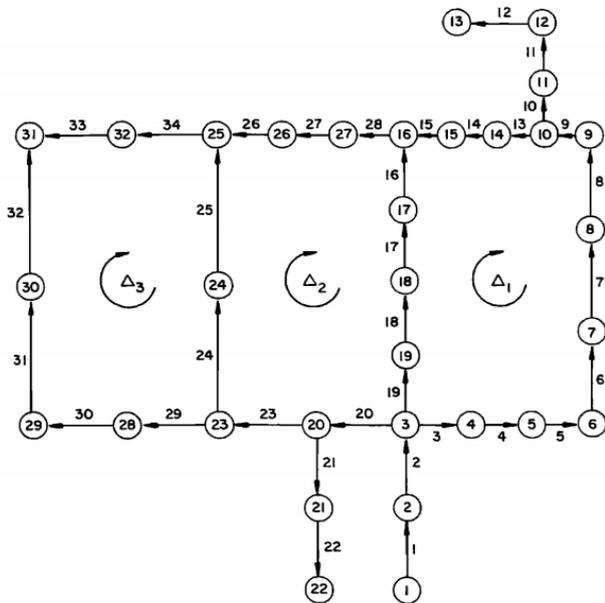
Tres tipos de actuaciones han sido consideradas para llevar a cabo la optimización de la red.

- Actuación-1 se basa en la sustitución de las tuberías, de este modo las pérdidas de carga pueden ser reducidas.
- Actuación-2 representa una combinación de sustitución de tubería y de grupo de presión en línea. De este modo, el sistema de bombeo contribuye a la mejora de presiones en la zona afectada.
- Actuación-3 es una combinación de tres intervenciones: sustitución de tubería, grupo de presión y depósito de distribución. A las ventajas mencionadas en las actuaciones 1 y 2, con depósitos de distribución, se añade la capacidad de regulación y consecuentemente unas presiones más estables.

## 2.2 Hanoi network

Hay varios problemas benchmark sobre redes hidráulicas en la literatura científica que pueden usarse con el propósito de verificación del código implementado. Entre ellos la red de distribución de Hanoi, propuesta por Fujiwara and Khang (1990), ha sido usada en investigaciones con similares propósitos (Vairavamoorthy & Ali, 2000; Farmani *et al.*, 2005; Chandapillai, Sudheer, & Saseendran,

2012; Soltanjilili, Bozorg Haddad, & Mariño, 2013; Sivakumar, Prasad, & Chandramouli, 2015). La Fig. 1 ilustra una red formada por 3 bucles y 32 nudos unidos por 34 tramos. El coeficiente de Hazen Williams adoptado es de 130, el diámetro de tuberías varía de 305 mm a 1016 mm y el mínimo caudal requerido en la red es de  $5 \text{ m}^{3/\text{h}}$ .



**Figure 1.** red de Hanoi

La Ec. (6) es alimentada con valores de Iglesias-Rey *et al.* (2007), que se ajustan a los costes de la red de Hanoi y se basan en la función del diámetro de tubería:

$$Cost_{pipe} = 271.71 * Diameter^{1.5} \quad (6)$$

Marchionni *et al.* (2016) propusieron las siguientes Ecs. (7) a (10) para estaciones de bombeo y depósitos de distribución:

$$C_{cwp} = 11603 * P_k^{0.53} \quad (7)$$

donde  $C_{cwp}$  es el coste de obra civil y  $P_k$  la potencia de las bombas (kW). La Ec. (7) considera otros costes de estaciones de bombeo, que están incluidos en la Ec. (8):

$$C_{ep} = 42853 * P_k^{-0.59} \quad (8)$$

donde  $C_{ep}$  es el coste del equipo. La suma de los resultados de Ecs. (7) y (8) es el coste total de la estación de bombeo.

El coste de inversión para depósitos de distribución consta también de dos partes. Los costes de obra civil están expresados en Ec. (9):

$$C_{cwt} = 358.45 * V^{-0.72} * h^{0.58} \quad (9)$$

donde  $V$  es el volumen del tanque ( $\text{m}^3$ ) aplicable para un rango de 100 – 500  $\text{m}^3$  (v.s. Tabla 1) y  $h$  es la altura del depósito (m). El coste de equipo para el depósito es calculado en base a Ec. (10).

$$C_{et} = 78.01 * V^{0.46} * h^{0.18} \quad (10)$$

### 2.3 Milagro network

San Francisco de Milagro es una ciudad situada en Guayas, Ecuador. La ciudad es la segunda en tamaño en la provincia de Guayas, con un total de 23  $\text{km}^2$  de área urbana; la red de abastecimiento cubre un área de 16  $\text{km}^2$ . La ciudad tiene una población de 147000 habitantes y se estima que esta cifra se incrementa a 193000 en 25 años. La principal fuente de agua se basa en pozos subterráneos distribuidos en distintas zonas de la ciudad. La principal causa de flujo intermitente en la ciudad es la falta de presión durante las horas de máxima demanda; la topología y los reducidos diámetros de los conductos dificultan el abastecimiento. La red fue sectorizada en 4 áreas y la más afectada por flujos intermitentes fue elegida para el presente estudio. La red modelada se presenta en la Fig. 2 y se compone de 63 tuberías, 62 nudos, 6 fuentes (pozos), 2 bombas, 2 depósitos y 7 válvulas.

### 3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los tres tipos de actuaciones presentadas en la sección-2 son aquí investigados; primero en la red de Hanoi y después la de Milagro. Los resultados para cada una de las actuaciones y usando la misma configuración de optimización (cf. Tabla-1) son presentados a continuación.

#### Red de Hanoi

El Coste de inversión *versus* equidad y fiabilidad para la sustitución de tuberías después de optimización es presentado en la Fig. 3. La figura también refleja, individualmente, los resultados para el indicador de equidad (UC) y de fiabilidad (Índice Todini).

La fig. 3 muestra como el objetivo combinado de equidad y fiabilidad resulta en índices ligeramente sobre 0.5; no obstante, valores individuales de UC se sitúan entre 0.8-1.0 y los Índices Todini por debajo de 0.1. Los costes de inversión se mantienen en el orden de magnitud esperado de \$6,081,000 (Iglesias-Rey *et al.*, 2007).

El análisis es luego extendido con la inclusión de grupos de presión (actuación-2). La Fig. 4 muestra los resultados.

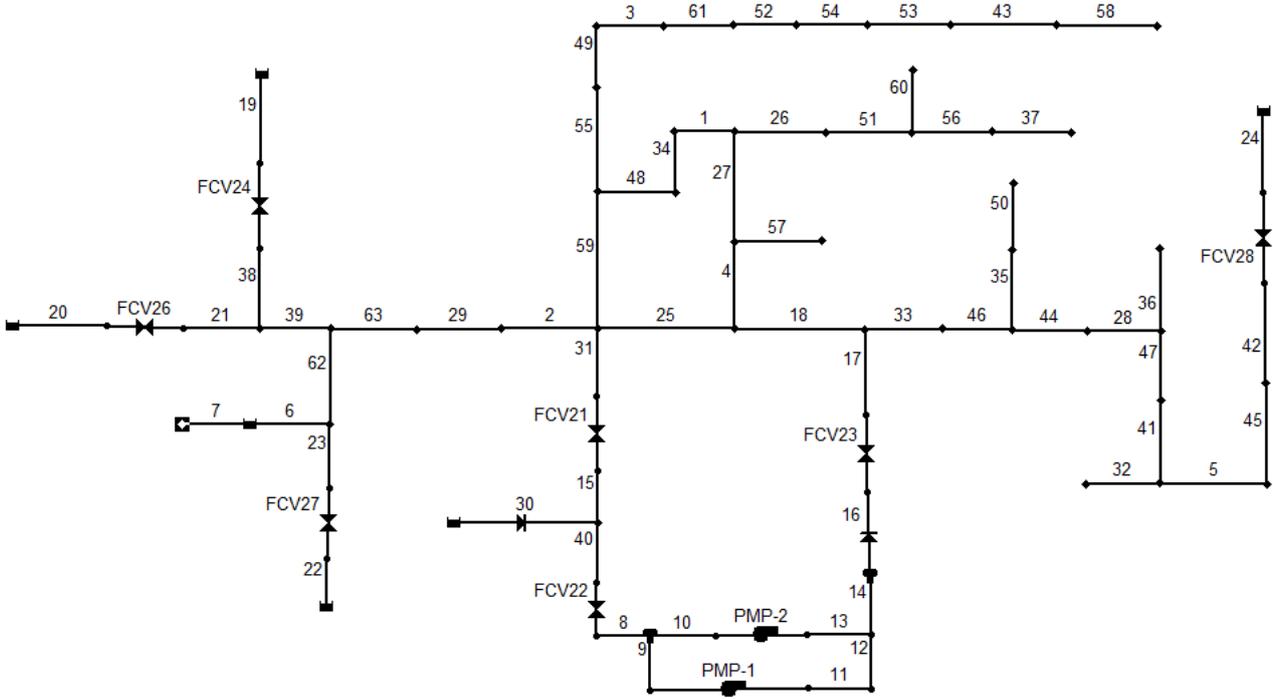


Figure 2. Sector modelado Las Pinas Sector

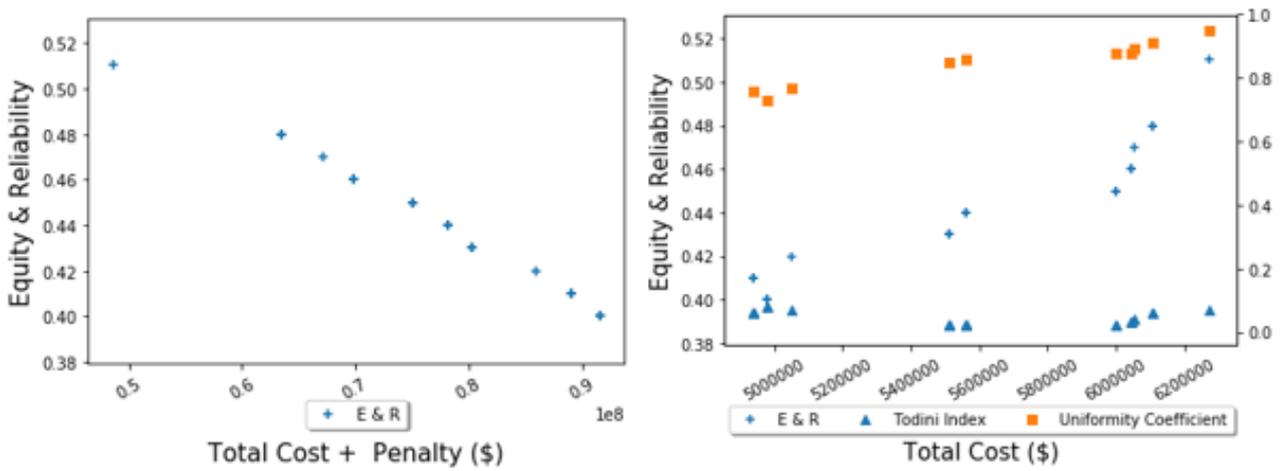


Figure 3. Resultados para la red de Hanoi considerando solo sustitución de tuberías.

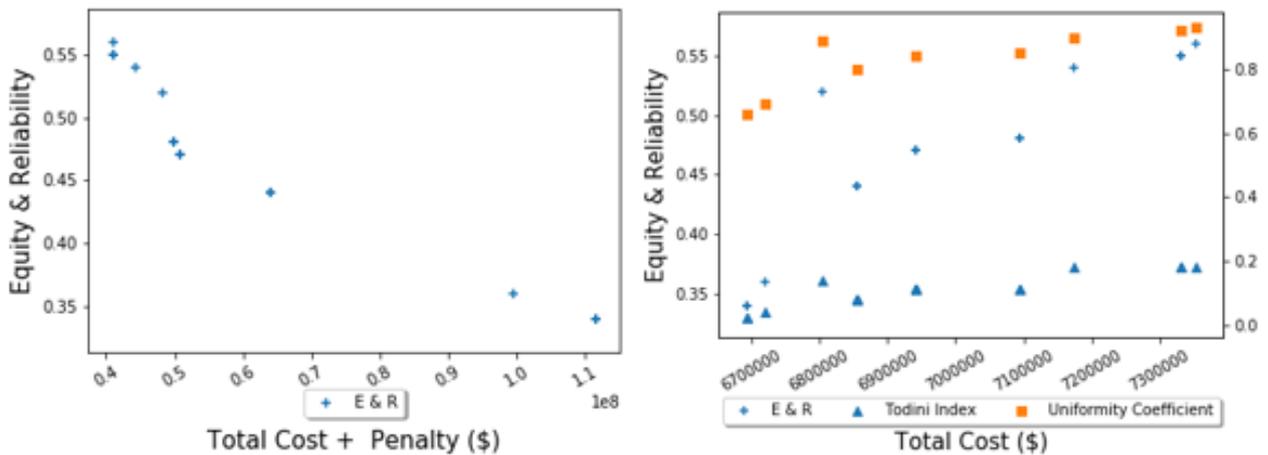


Figure 4. Resultados para la red de Hanoi considerando sustitución de tuberías y grupos de presión

La Fig. 4 muestra un ligero incremento de la función objetivo combinada (i.e. equidad y fiabilidad) cuando los grupos de presión son incluidos en la solución. El UC sigue siendo elevado y el Índice Todini recibe una ligera mejora. Por otro lado, los costes de inversión aumentan considerablemente. En la tercera actuación depósitos de distribución son incluidos como parte de la solución. Los resultados se presentan en la Fig. 5.

La Fig. 5 muestra un continuo incremento del coste total de inversión mientras que casi todas las soluciones resultan en índices elevados de UC. El Índice Todini refleja una clara mejoría en la fiabilidad de la red, con valores por encima de 0.2. También es interesante observar una reducción de los costes combinados con la infraestructura adicional, indicando un número menor de nudos fuera de los límites de presión requerida.

Considerando los dos factores equidad y fiabilidad con igual peso, los efectos de unos sobre el otro son evidentes. Ambos, no obstante, son cruciales en redes de distribución intermitente, donde la baja fiabilidad de la red afecta a la percepción y confianza de los usuarios. La obtención de valores cercanos a 1 en equidad son posibles por medio de la metodología usada, pero valores de fiabilidad permanecen con valores de hasta 0.2 solo cuando la presión es mejorada por medio de grupos de presión. La topología de la red juega también un papel importante en los resultados de optimización.

### Red de Milagro

El caso de estudio de la red de Milagro fue dividido en sectores, Las Pinas (cf. Fig. 2) fue el sector elegido para la simulación, cuyos valores iniciales se muestran en la Tabla-2.

**Table 2.** Resultados de la simulación hidráulica en el sector de Las Pinas

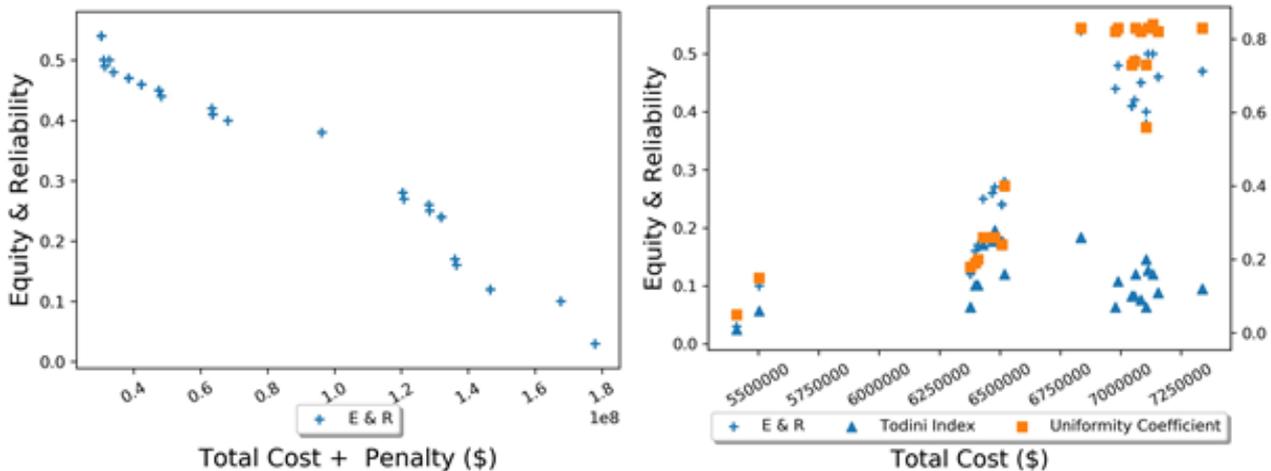
Parámetro	Valores
Equidad y Fiabilidad	0.71
Coefficiente de Uniformidad	0.39
Índice Todini	1.02

El valor elevado del índice de fiabilidad puede ser atribuido a el número de fuentes (pozos) en el sistema; no obstante, los valores de equidad se sitúan por debajo de 0.5.

En la Fig. 6, un incremento marginal (0.01) de equidad y fiabilidad es observado. Por separado, el UC tiene un incremento sobre 0.4, pero el índice Todini se reduce a 0.7. Además, hay varios nodos que no cumplen el criterio de presión mínima de 30 m. Como refleja la Fig. 7, hay un considerable descenso en la función de equidad y fiabilidad, atribuible a la baja fiabilidad. Con la inclusión de estaciones de bombeo, la función de costes de inversión es también incrementada.

La fig. 8 muestra una reducción en la función combinada de equidad y fiabilidad y un incremento en el coste total, puesto al efecto de los costes de los grupos de presión y los depósitos que suponen aproximadamente el 70% del coste de inversión total. La fiabilidad parece ser más comprometida debido a la potencia de bombeo añadida en la red. Alternativamente, distintos umbrales de presión requerida podrían mejorar el Índice Todini.

A pesar de una reducción en la función combinada de equidad y fiabilidad hay una mejora general de la distribución de agua, puesto que el coeficiente de uniformidad (UC) crece considerablemente. El coste de sustitución de tubería decrece con la inclusión de sistemas de bombeo y depósitos. La situación



**Figure 5.** Resultados para la red de Hanoi considerando sustitución de tuberías, grupos de presión y depósitos de distribución

y la capacidad de las bombas y depósitos pueden tener un impacto negativo en la fiabilidad de la red. Esto se debe a la configuración específica de la red

de Las Pinas; su topología no permite redistribuir las presiones adicionales aportadas por las estaciones de bombeo.

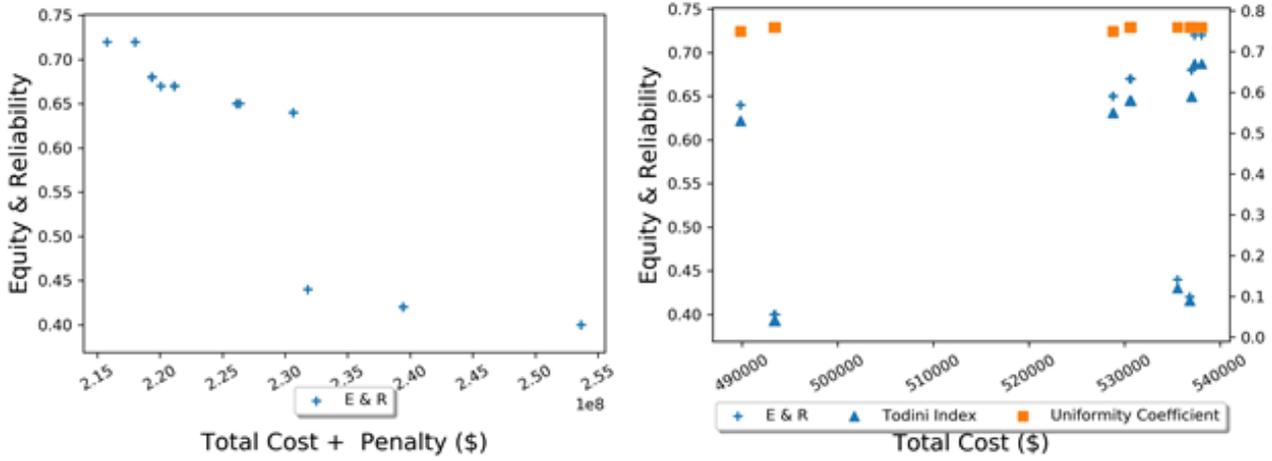


Figure 6. Resultados para la red de Las Pinas considerando solo la sustitución de tuberías.

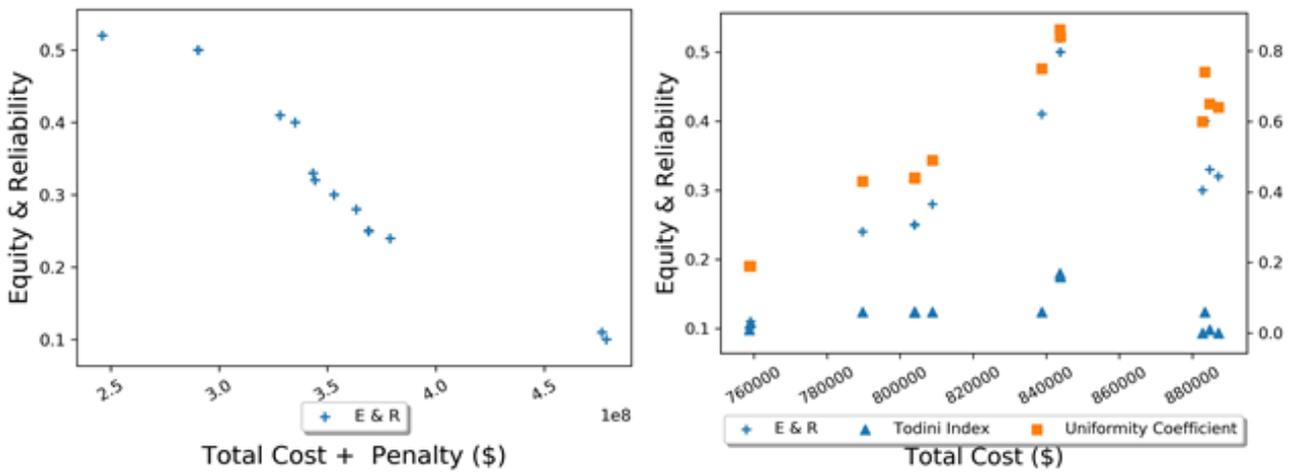


Figure 7. Resultados para la red de Las Pinas considerando la sustitución de tuberías y grupos de presión.

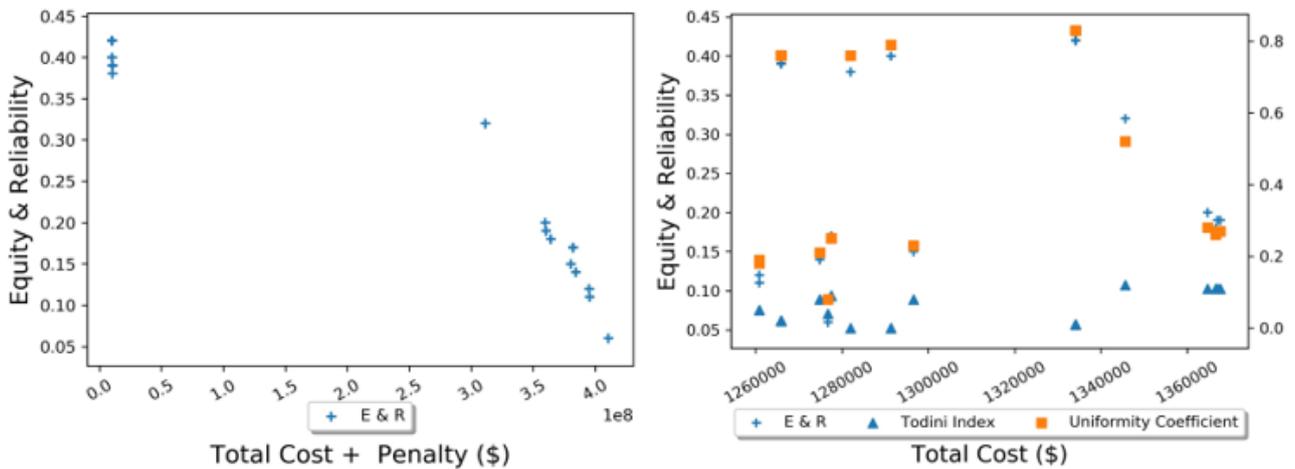


Figure 8. Resultados para la red de Las Pinas considerando la sustitución de tuberías, grupos de presión y depósitos de distribución

## CONCLUSIONES

La metodología presentada permite la optimización de redes de abastecimiento de agua en régimen intermitente con el objetivo de mejorar equidad y fiabilidad. Estos objetivos son factibles con la consideración de las actuaciones apropiadas. La mejora de equidad, en general, tiene un impacto global sobre toda la red en términos de fiabilidad y es por eso que un análisis integrado es necesario. Cuando solo sustitución de tuberías es considerado como única actuación, la equidad en la red es mejorada, pero los resultados son altamente dependientes de la topología de la red. En redes altamente malladas la fiabilidad claramente aumenta con el incremento de diámetros. Este efecto sugiere la limitación de la aplicación del Índice Todini en redes pobremente malladas. Los parámetros de actuaciones considerando sustitución de tubería, estaciones de bombeo y depósitos deben de ser cuidadosamente seleccionados con conocimiento *a-priori* de la red. La correcta situación de las bombas y depósitos es crítico; información del gestor del servicio puede ser útil para pre-establecer las áreas óptimas. Más investigación es requerida para desarrollar soluciones respecto a la optimización de situación y potencia de grupos de presión. También otros índices alternativos a UC y Todini deben ser analizados para determinar los más adecuados según la topología de red.

## REFERENCIAS

Agathokleous, A., & Christodoulou, S. (2016). Vulnerability of Urban Water Distribution Networks under Intermittent Water Supply Operations. *Water Resources Management*, 30(13), 4731-4750. doi:10.1007/s11269-016-1450-3

Ameyaw, E. E., Memon, F. A., & Bick, J. (2013). Improving equity in intermittent water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 62(8). doi:10.2166/aqua.2013.065

Andey, S. P., & Kelkar, P. S. (2007). Performance of water distribution systems during intermittent versus continuous water supply. *Journal - American Water Works Association Journal - American Water Works Association*, 99(8), 99-106.

Chandapillai, J., Sudheer, K. P., & Saseendran, S. (2012). Design of Water Distribution Network for Equitable Supply. *Water Resources Management*, 26(2), 391-406. doi:10.1007/s11269-011-9923-x

Charalambous, B., & Laspidou, C. (2017). *Dealing with the Complex Interrelation of Intermittent Supply and Water Loss*: IWA Publishing.

Chiandussi, G., Codegone, M., Ferrero, S., & Varesio, F. E. (2012). Comparison of multi-objective optimization methodologies for engineering applications. *Computers & Mathematics with Applications*, 63(5), 912-942. doi:10.1016/j.camwa.2011.11.057

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. doi:10.1109/4235.996017

Farmani, R., Walters, G., & Savic, D. (2005). Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design. *Engineering Optimization*, 37(2), 167-183. doi:10.1080/03052150512331303436

Farmani, R., Walters, G., & Savic, D. (2006). Evolutionary Multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality. *Journal of Hydroinformatics*, 165 -179.

Galaitis, S., et al. (2016). Intermittent Domestic Water Supply: A Critical Review and Analysis of Causal-Consequential Pathways. *Water*, 8(7). doi:10.3390/w8070274

Gottipati, P. V. K. S. V., & Nanduri, U. V. (2014). Equity in water supply in intermittent water distribution networks. *Water and Environment Journal*, 28(4), 509-515. doi:10.1111/wej.12065

Iglesias-Rey, P., Mora-Meliá, D., Martínez-Solano, F., & S. Fuertes, V. (2007). *Study of sensitivity of the parameters of a genetic algorithm for design of water distribution networks* (Vol. 1).

Ilaya-Ayza, A. E., Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2017). Implementation of DMAs in Intermittent Water Supply Networks Based on Equity Criteria. *Water*, 9(11). doi:10.3390/w9110851

Ilaya-Ayza, A. E., Martins, C., Campbell, E., & Izquierdo, J. (2018). Gradual transition from intermittent to continuous water supply based on multi-criteria optimization for network sector selection. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 330, 1016-1029. doi:10.1016/j.cam.2017.04.025

Kaminsky, J., & Kumpel, E. (2018). Dry Pipes: Associations between Utility Performance and

- Intermittent Piped Water Supply in Low and Middle Income Countries. *Water*, 10(8). doi:10.3390/w10081032
- Kim, J. H., Choi, Y. H., Lee, H. M., & Jung, D. (2017, 16-19 April 2017). *Development of warm initial solution approaches to improve the quality of Pareto optimal solutions in water distribution network design*. Paper presented at the 2017 Seventh International Conference on Information Science and Technology (ICIST).
- Klise, K. A., et al. (2017). Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual, U.S. Environmental Protection Agency Technical Report, EPA/600/R-17/264, 47p.
- Marchionni, V., Cabral, M., Amado, C., & Covas, D. (2016). Estimating Water Supply Infrastructure Cost Using Regression Techniques. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(4), 04016003. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000627
- Molden, D. J., & Gates, T. K. (1990). Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(6), 804-823. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(804)
- Prasad, T. D. (2010). Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 129-132. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:1(129)
- Simukonda, K., Farmani, R., & Butler, D. (2018). Intermittent water supply systems: causal factors, problems and solution options. *Urban Water Journal*, 1-13. doi:10.1080/1573062x.2018.1483522
- Sivakumar, P., Prasad, R. K., & Chandramouli, S. (2015). Uncertainty Analysis of Looped Water Distribution Networks Using Linked EPANET-GA Method. *Water Resources Management*, 30(1), 331-358. doi:10.1007/s11269-015-1165-x
- Soltanjalili, M.-J., Bozorg Haddad, O., & Mariño, M. A. (2013). Operating Water Distribution Networks during Water Shortage Conditions Using Hedging and Intermittent Water Supply Concepts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 644-659. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000315
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115-122. doi:10.1016/S1462-0758(00)00049-2
- United Nations. (2015). Sustainable Development. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Retrieved from <https://population.un.org/wup/DataQuery/>
- Vairavamoorthy, K., & Ali, M. (2000). Optimal Design of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(5), 374-382. doi:10.1111/0885-9507.00201
- WHO, & UNICEF. (2017). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines*. Retrieved from Geneva: <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2017/launch-version-report-jmp-water-sanitation-hygiene.pdf>
- Xu, C., & Goulter, I. C. (1998). Probabilistic Model for Water Distribution Reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(4), 218-228. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:4(218)