

Utilización de Sistemas Inteligentes para optimizar el diseño de redes de distribución de agua en General Pico - La Pampa

Hugo Alfonso, Carlos Bermúdez, Franco Morero, Gabriela Minetti, Carolina Salto
Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes (LISI)
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Pampa
Calle 110 Esq. 9 (6360) General Pico - La Pampa - Rep. Argentina
Te. / Fax: (02302) 422780/422372, Int. 6302
e-mail: {alfonsoh, bermudezc, minettig, saltoc}@ing.unlpam.edu.ar

Resumen Esta línea de investigación aborda la resolución del problema del diseño óptimo de redes de distribución de agua multi-período, usando un algoritmo híbrido basado en la metaheurística *Simulated Annealing*. La propuesta algorítmica inicialmente es testada satisfactoriamente con benchmarks presentes en el estado del arte. En consecuencia y dado que en la provincia de La Pampa el problema del acceso al agua es de tratamiento prioritario, los resultados obtenidos en esta línea de investigación son transferidos y aplicados a una variante de este problema para optimizar el diseño de redes de distribución de agua en un nuevo barrio de 505 hectáreas de la ciudad de General Pico.

Palabras claves: Sistemas Inteligentes, Optimización, Diseño de Red de Distribución de Agua

Contexto

Esta línea de investigación surge de una de las líneas de investigación del Proyecto "Técnicas inteligentes avanzadas y sistemas distribuidos aplicados a la resolución de problemas de decisión complejos" que se desarrolla en la Facultad de Ingeniería de la UNLPam, y puntualmente se enmarca en la convocatoria para Proyectos Orientados en Investigación Regional (POIRE) financiados por la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam). El objetivo de los POIREs es incentivar la investigación en áreas prioritarias para la resolución de problemas regionales con integración de diversos actores sociales. Nuestra propuesta para

la convocatoria 2019 fue seleccionada para su financiamiento y se lleva adelante en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Inteligentes (LISI) de la Facultad de Ingeniería de la mencionada universidad. Este POIRE es dirigido por la Dra. Salto. Cabe destacar que desde hace varios años, los integrantes de este laboratorio mantienen una importante vinculación con investigadores de la Universidad Nacional de San Luis (Argentina) y de la Universidad de Málaga (España), con quienes se realizan trabajos conjuntos.

En el LISI, desde su creación en 1998, nos hemos abocado al estudio de algoritmos cada vez más eficientes para la solución de problemas complejos, tanto de optimización como de diseño. En este dominio, el objetivo consiste en obtener algoritmos nuevos que den solución al problema y que necesiten un esfuerzo computacional más pequeño que los algoritmos existentes, así como caracterizar su comportamiento para las clases de problemas que demanda la comunidad científica e industrial en general. Actualmente, es común enfrentarnos a problemas de alta complejidad en el que intervienen varias variables con un conjunto de restricciones definidas sobre ellas, muchas veces contrapuestas, que deben ser consideradas para evaluar la factibilidad de la solución aportada. En este sentido, las líneas de investigación del LISI se encargan de proponer, adaptar y analizar distintas metaheurísticas con el fin de resolver eficaz y eficientemente diferentes problemas.

Una de las líneas es la que investiga la optimización del diseño de redes de distribución de agua, un campo de investigación muy activo desde

hace algunas décadas, con resultados prometedores. Estas redes están compuestas por reservorios y tuberías que tratan de brindarles a los usuarios un flujo constante de agua con una determinada presión. El problema de optimizar el diseño de estas redes de agua consiste en encontrar el diámetro óptimo de cada tubería, seleccionándolo de un conjunto limitado de tamaños disponibles comercialmente, con el objetivo de reducir el costo global brindando la prestación adecuada a la demanda.

Dado que en nuestra provincia, La Pampa, y la región el problema del acceso al agua es de tratamiento prioritario, en este POIRE se propone abordar una variante del mismo, al transferir los conocimientos adquiridos para desarrollar un sistema inteligente que optimice el diseño de redes de distribución de agua para CORPICO, la prestataria de este servicio en la ciudad de General Pico.

Introducción

El problema de optimización del diseño de redes de distribución de agua (Water Distribution Network Design Optimization - WDND) es un problema de gran interés en la comunidad científica. El objetivo del Problema WDND es minimizar el costo total de inversión (Total Investment Cost - TIC) de una red de distribución de agua. La red puede ser modelada con un grafo conexo el cual está conformado por un conjunto de nodos $N = \{n_1, n_2, \dots\}$, un conjunto de tuberías $P = \{p_1, p_2, \dots\}$, un conjunto de subredes o loops internos $L = \{l_1, l_2, \dots\}$, y un conjunto de tipos de tuberías disponibles en el mercado $T = \{t_1, t_2, \dots\}$. La función a minimizar TIC es obtenida por la fórmula mostrada en el Ecuación 1.

$$\min TIC = \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} L_p IC_t x_{p,t} \quad (1)$$

donde IC_t es el costo de un tubo p del tipo t , L_p es la longitud del tubo, y $x_{p,t}$ es una variable binaria que indica si el tubo p es del tipo t o no. La función objetivo está limitada por: leyes físicas de conservación de masa y energía, demanda de presión mínima en cada nodo, y la máxima velocidad en la cañería, en cada momento $\tau \in \mathcal{T}$. Estas leyes son explicadas en los siguientes párrafos.

Ley de conservación de la masa: Debe ser satisfecha por cada nodo N en cada período de tiempo τ . Esta ley establece que el volumen de agua que fluye hacia un nodo en un momento dado debe ser igual al flujo que traslada (ver Ecuación 2).

$$\sum_{n_1 \in N/n} Q_{(n_1, n), \tau} - \sum_{n_2 \in N/n} Q_{(n, n_2), \tau} = WD_{n, \tau} - WS_{n, \tau} \quad (2)$$

$$\forall n \in N \quad \forall \tau \in \mathcal{T}$$

donde $Q_{(n_1, n), \tau}$ es el flujo desde el nodo n_1 al nodo n en el tiempo τ , $WS_{n, \tau}$ es el agua externa provista y $WD_{n, \tau}$ es la demanda de agua externa.

Ley de conservación de energía: Establece que la suma de la presión del flujo en un circuito cerrado en un instante de tiempo τ es cero. Este flujo puede ser aproximado usando la ecuación de Hazen-Williams con los parámetros usados por el software EPANET 2.0 [1] (ver Ecuación 3).

$$\sum_{p \in l} \left[\frac{10.6668 y_{p, \tau} Q_{p, \tau}^{1.852} L_p}{\sum_{t \in T} (x_{p, t} C_t^{1.852} D_t^{4.871})} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\forall l \in L \quad \forall \tau \in \mathcal{T}$$

donde $y_{p, \tau}$ es el signo de $Q_{p, \tau}$ que indica cambios en la dirección del flujo de agua en relación a la dirección del flujo definido, $Q_{p, \tau}$ es la cantidad de agua que fluye a través de la cañería p en time τ , L_p es la longitud de la cañería, C_t es el coeficiente de rugosidad Hazen-Williams según el tipo de caño t , y D_t es el diámetro del tipo de caño t .

Presión mínima requerida en cada nodo: para cada nodo n en cada período de tiempo τ , se debe satisfacer la siguiente condición (ver Ecuación 4).

$$H_{n, \tau}^{min} \leq H_{n, \tau} \quad \forall n \in N \quad \forall \tau \in \mathcal{T} \quad (4)$$

siendo $H_{n, \tau}^{min}$ la mínima presión en el nodo y $H_{n, \tau}$ la presión actual del nodo.

Máxima velocidad del agua: La velocidad del agua $v_{p, \tau}$ no puede exceder la máxima velocidad estipulada $v_{p, \tau}^{max}$ (ver Ecuación 5).

$$v_{p, \tau} \leq v_{p, \tau}^{max} \quad \forall p \in P \quad \forall \tau \in \mathcal{T} \quad (5)$$

Para resolver este problema de alta complejidad se requiere un método eficaz que sea confiable y fácil de usar, el cual no solo considere los costos

de capital y operativos junto con el rendimiento y la confiabilidad hidráulica, sino también la gestión competente de la energía.

Este problema, aún para sus versiones más simples, es muy difícil de resolver y ha sido clasificado como NP-duro [2]. Muchas versiones del mismo se han focalizado solo en considerar algunas de sus características. Existen variantes que consideran una demanda constante o diferentes demandas en determinadas franjas horarias, las que se identifican como WDND de período simple o multi-período. Las mismas han sido resueltas en varios trabajos aplicando técnicas inteligentes, tales como *Simulated Annealing* [3], [4], [5], *Tabu Search* [6], Algoritmos Genéticos [7], [8], [9], Optimización basada en Colonias de Hormigas [10], [11], *Scatter Search* [12] y Evolución Diferencial [13], entre otras.

Trabajos más recientes abordan variantes que contemplan la variabilidad de los flujos y consideran múltiples objetivos, muchas veces contrapuestos [14], [8]. Una de las más recientes utiliza una metaheurística que optimiza el diseño, al atender la demanda de agua variable durante las 24 horas y contemplar los límites mínimos y máximos de circulación del agua a través de los ductos [15].

En consecuencia, las metaheurísticas brindan, una vez más, una alternativa de solución eficiente. Por este motivo, en esta línea de investigación se analiza y diseña un algoritmo metaheurístico híbrido basado en *Simulated Annealing* para resolver el problema WDND en cuestión.

Dada las características propias de este tipo de redes, una vez que la metaheurística arma una determinada solución, es necesario evaluar su factibilidad y costo. Para ello se utiliza el simulador EPANET 2.0 [16], el cual es de dominio público y desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Este simulador, además, resuelve todas las ecuaciones hidráulicas de forma externa y se puede configurar para resolver distintas variantes del problema.

Línea de Investigación y Desarrollo

Inicialmente, el problema de optimización WDND multi-período es abordado al hibridar una metaheurística basada en trayectoria en [17], [18],

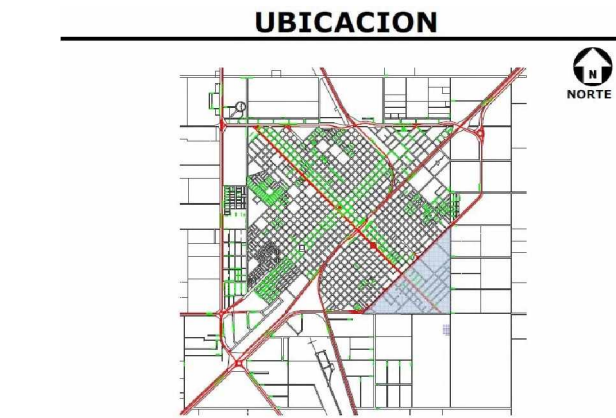


Fig. 1. Mapa tendido redes de agua en General Pico.

[19] y testearla con benchmarks estándares propuestos por la comunidad científica (ver [15]). Esta propuesta, denominada HSA, consiste en un algoritmo de *Simulated Annealing* adaptado e hibridado para resolver el problema planteado.

En particular, para resolver el caso presentado por CORPICO resulta necesario elaborar las instancias a considerar en función de la topología del área fijada por la entidad adoptante CORPICO. El área para la que se diseñará la red de distribución de agua abarca la zona de General Pico denominada "Barrio Quintas Sur", como puede verse en la región sombreada de la Fig. 1. Inicialmente se requiere realizar el diseño sobre un espacio de 165 hectáreas (triángulo delimitado por Ruta Provincial N°1, Diagonal 201 y Diagonal 500, mostrado en la Fig. 2), previendo para los próximos 10 años una extensión de 340 hectáreas colindantes (espacio comprendido desde Diagonal 500 a Calle H. Gandini y desde Diagonal 201 a Calle 233). Al ser una red independiente, debe contemplar la ubicación de un tanque y cisterna en la intersección de Diagonales 201 y 501, desde donde se realizará la distribución a los distintos usuarios.

Resultados obtenidos y esperados

En cuanto al estudio inicial, HSA ha resuelto el problema WDND multi-período en instancias de variada complejidad que contemplan desde 73 a 285 nodos ([17], [18], [19]). Se ha verificado empírica y estadísticamente la eficiencia de este

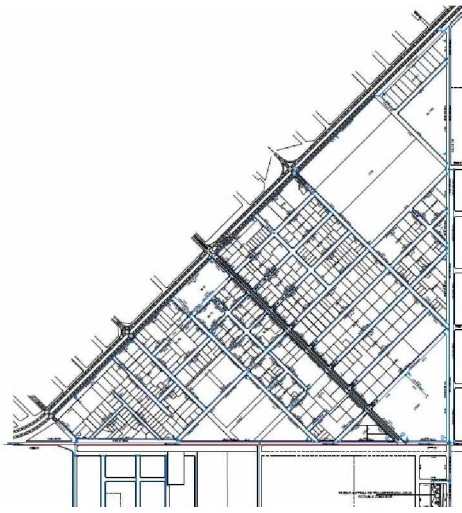


Fig. 2. Mapa Zona 2 de red de agua a diseñar.

algoritmo, así como también su competitividad en comparación a los presentados en la literatura.

En cuanto al trabajo con la institución adoptante, que debe gestionar dicho financiamiento a nivel provincial y nacional, contar con un instrumento que justifique la óptima selección de materiales se estima facilitará dicha gestión. En consecuencia, para lograr un diseño de la red de distribución de agua en una zona de la ciudad de General Pico, que minimice los costos de la inversión a enfrentar en su construcción, que atienda las demandas propias de los actuales habitantes de la zona y que, también, considere su futuro crecimiento, ha sido necesario armar la instancia del problema con los datos reales proporcionados por CORPICO.

Esta nueva instancia consta de 222 nodos que, además de la distribución domiciliaria considera nodos hidrantes, nodos exclusas y válvulas de limpieza. La red total implica unos 35.000 metros de cañerías de diferentes diámetros para atender la demanda de flujo de cada nodo. Los diámetros de cañerías considerados van entre los 50 y 630 mm, cuyos precios oscilan entre 2,85 y 273,28 dólares el metro lineal. El caudal demandado por cada nodo se ha determinado en función de la cantidad de habitantes en las parcelas y el consumo promedio de cada individuo en las diferentes franjas horarias, motivo por el cual se implementará la búsqueda de la solución en la versión multi-períodos. Actualmente se están llevando a cabo los ajustes algorítmicos de HSA, que nos permitirá evaluar la calidad de

las soluciones y además evaluar los algoritmos utilizados en instancias reales.

Formación de Recursos Humanos

Cada año se incorporan al proyecto alumnos avanzados en la carrera Ingeniería en Sistemas, quienes trabajan en temas relacionados a la resolución de problemas de optimización usando técnicas inteligentes, con el objeto de guiarlos en el desarrollo de sus tesinas de grado y, también, de formar futuros investigadores científicos. Por otra parte, los docentes-investigadores que integran el proyecto realizan diversos cursos de posgrado relacionados con la temática del proyecto, con el objetivo de sumar los créditos necesarios para cursar carreras de posgrado.

REFERENCES

- [1] L. A. Rossman, *The EPANET Programmer's Toolkit for Analysis of Water Distribution Systems*, 1999.
- [2] D. F. Yates, A. B. Templeman, and T. B. Boffey, "The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks," *Engineering Optimization*, vol. 7, no. 2, pp. 143–155, 1984.
- [3] G. Loganathan, J. Greene, and T. Ahn, "Design heuristic for globally minimum cost water-distribution systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 121, no. 2, pp. 182–192, 1995.
- [4] M. Cunha and J. Sousa, "Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 125, p. 215.221, 07 1999.
- [5] M. d. C. Cunha and J. Sousa, "Hydraulic infrastructures design using simulated annealing," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 32–39, 2001.
- [6] M. da Conceicao Cunha and L. Ribeiro, "Tabu search algorithms for water network optimization," *European Journal of Operational Research*, vol. 157, no. 3, pp. 746–758, 2004.
- [7] G. C. Dandy, A. R. Simpson, and L. J. Murphy, "An improved genetic algorithm for pipe network optimization," *Water Resources Research*, vol. 32, no. 2, pp. 449–458, 1996.
- [8] I. Gupta, A. Gupta, and P. Khanna, "Genetic algorithm for optimization of water distribution systems," *Environmental Modelling & Software*, vol. 14, no. 5, pp. 437–446, 1999.
- [9] W. Bi, G. C. Dandy, and H. R. Maier, "Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge," *Environmental Modelling & Software*, vol. 69, pp. 370–381, 2015.
- [10] H. R. Maier, A. R. Simpson, A. C. Zecchin, W. K. Foong, K. Y. Phang, H. Y. Seah, and C. L. Tan, "Ant colony optimization for design of water distribution systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 129, no. 3, pp. 200–209, 2003.
- [11] A. C. Zecchin, A. R. Simpson, H. R. Maier, and J. B. Nixon, "Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 9, no. 2, pp. 175–191, 2005.

- [12] M.-D. Lin, Y.-H. Liu, G.-F. Liu, and C.-W. Chu, "Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks," *Engineering Optimization*, vol. 39, no. 7, pp. 857–876, 2007.
- [13] A. Vasan and S. P. Simonovic, "Optimization of water distribution network design using differential evolution," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, no. 2, pp. 279–287, 2010.
- [14] R. Farmani, G. A. Walters, and D. A. Savic, "Trade-off between total cost and reliability for anytown water distribution network," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 131, no. 3, pp. 161–171, 2005.
- [15] A. De Corte and K. Sörensen, "An iterated local search algorithm for water distribution network design optimization," *Network*, vol. 67, no. 3, pp. 187–198, May 2016.
- [16] L. Rossman, *EPANET2: Users Manual*, 2000.
- [17] C. A. Bermúdez, G. F. Minetti, and C. Salto, "SA to optimize the multi-period water distribution network design," in *XXIX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2018)*, 2018, pp. 12–21.
- [18] C. Bermúdez, C. Salto, and G. Minetti, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, ch. Solving the Multi-Period Water Distribution Network Design Problem with a Hybrid Simulated Annealing, pp. 3–16.
- [19] —, "Designing a multi-period water distribution network with a hybrid simulated annealing," in *XLVIII JAIHO: XX Simposio Argentino de Inteligencia Artificial (ASAI 2019)*. Universidad Nacional de Salta, 2019, pp. 39–52.