



Análisis de sectorización hidráulica en redes de distribución de agua implementando Epanet e iDistritos

Analysis of hydraulic sectorization in water distribution networks implementing Epanet and iDistritos

Flórez Sepúlveda, A. L.^a; Bonilla Granados, C. A.^b; Celeita Molina, J.^c

^a Universidad Manuela Beltrán, Grupo de Investigación Ambiente y Sostenibilidad. Avenida Circunvalar # 60-00 / Bogotá, Colombia
auraflorez.ls@academia.umb.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-8871-5267>

^b Universidad de Pamplona, Grupo investigación Etenoha. Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona - Norte de Santander, Colombia
carlos.bonilla@unipamplona.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4558-4615>

^c Universidad Manuela Beltrán, Grupo de Investigación Ambiente y Sostenibilidad. Avenida Circunvalar # 60-00 / Bogotá, Colombia
johnathan.celeita@docentes.umb.edu.co, <https://orcid.org/0009-0004-4533-5805>

Correspondencia: carlos.bonilla@unipamplona.edu.co

Recibido: Agosto 8, 2023. **Aceptado:** Agosto 29, 2023. **Publicado:** Agosto 30, 2023.

Resumen

Las redes de distribución de agua tienen como principal objetivo abastecer agua potable para suplir las necesidades de cantidad y calidad demandadas por una población. Estos sistemas se conciben para suministrar agua a todos los habitantes de forma continua durante todo el día. Estas condiciones óptimas de funcionamiento en algunas ciudades no se logran debido a diferentes problemas que se presentan y que afectan el normal funcionamiento de las redes de distribución. Esta investigación presenta una propuesta de mejora y optimización de las redes hidráulicas de la ciudad de Los Patios, ubicada en Norte de Santander, Colombia. Ciudad que actualmente presenta problemas en el funcionamiento de su sistema de distribución debido a factores como el crecimiento poblacional, los asentamientos informales, la falta de planeación en la construcción de sus redes de tuberías y la disponibilidad de agua en la fuente de abastecimiento. La operación actual de la red se realiza a partir del cierre de válvulas de seccionamiento con el fin de generar sectores y de esta forma garantizar turnos de servicio que proporcionan agua por zonas entre dos a tres días por la semana, lo cual incumple con los criterios de continuidad del servicio y afecta la calidad del recurso; en respuesta a esta problemática, la presente investigación tiene como objetivo proponer varias alternativas de sectorización hidráulica de las redes de tuberías analizando las características de conectividad de sus nodos, empleando la teoría de grafos y los softwares iDistritos y Epanet. Como resultado se obtuvo una optimización del funcionamiento hidráulico de la red de distribución aumentando la continuidad del servicio y se describen las acciones y recomendaciones necesarias para desarrollar estas alternativas. Los análisis realizados se convierten en una herramienta útil para la empresa de agua que administra las redes de distribución, en la planificación de las acciones futuras de mejora en la infraestructura existente en la ciudad.

Palabras clave: Sistemas de distribución de agua, optimización, teoría de grafos, sectorización hidráulica, Epanet, iDistritos.

Abstract

The primary purpose of water distribution networks is to supply drinking water to meet a population's quantity and quality needs. These systems are designed to continuously supply water to all inhabitants throughout the day. These optimal operating conditions in some cities are not achieved due to different problems that affect the regular operation of the distribution networks. This research presents a proposal to improve and optimize the hydraulic networks of the city of Los Patios, located in Norte de Santander, Colombia. This city currently presents problems in the operation of its distribution system due to factors such as population growth, informal settlements, lack of planning in constructing its pipe networks and the availability of water in the supply source. The current operation of the network is carried out by closing sectioning valves in order to generate sectors and thus guarantee service shifts that provide water by zones between two to three days a week, which does not comply with the criteria of service continuity and affects the quality of the resource; in response to this problem, the present research aims to propose several alternatives for hydraulic sectorization of the pipe networks by analyzing the connectivity characteristics of its nodes, using the graph theory and the iDistricts and Epanet software. As a result, an optimization of the hydraulic operation of the distribution network was obtained, increasing the continuity of the service, and the actions and recommendations necessary to develop these alternatives are described. The analyses become a valuable tool for the water company that manages the distribution networks in planning future actions to improve the existing infrastructure in the city.

Keywords: Water distribution systems, optimization, Graph Theory, Hydraulic Sectorization, Epanet, iDistricts.

1. Introducción

Los acueductos funcionan mediante un sistema de tuberías que abastecen desde un embalse una demanda de agua potable relacionada con el consumo de una población; para garantizar un correcto desempeño se deben estimar los diámetros de las tuberías que garanticen parámetros adecuados tales como presiones y velocidades en la red, lo cual se refleja en un buen funcionamiento del sistema. Existen múltiples aspectos a tener en cuenta en una red de distribución de agua potable (RDAP) tales como: las fugas del sistema, el agua no contabilizada, el estado físico de la red, bases de datos relacionadas con usuarios y catastro de la red [1]. Las RDAP se representan mediante un modelo hidráulico que permite analizar el comportamiento de sus parámetros utilizando herramientas computacionales. El software más empleado para el análisis es Epanet [2].

Existen redes de distribución que durante su vida útil presentan deterioro en su infraestructura que afecta de forma directa las condiciones del servicio y en algunos casos se refleja en la implementación de acciones operativas como los racionamientos sistemáticos del servicio por zonas e intermitencias en las redes de suministro de agua potable [3], 2009). Para optimizar y mejorar las condiciones de una RDAP con sistema intermitente se pueden realizar diferentes acciones de mejora. Una posible solución consiste en implementar la sectorización hidráulica, con el objetivo de conformar redes autónomas que, abastecidas por una red de distribución general o matriz, permita controlar y mejorar el funcionamiento de la red de acueducto, posibilitando que el agua sea distribuida a todos los usuarios [4].

La industria del agua potable se enfrenta constantemente a cambios, producidos por distintos factores que pueden ser técnicos o naturales, como el deterioro de la infraestructura o el cambio climático, en respuesta a estos desafíos resulta indispensable generar un proceso continuo de optimización de las RDAP, evaluando su funcionamiento y formulando medidas para mejorar la eficiencia en cada sistema [5]. El aumento de las poblaciones en especial aquellas que no se encuentran proyectadas por entidades gubernamentales, como es el caso de los asentamientos ilegales que, por lo general realizan conexiones fraudulentas a las RDAP, generan en los sistemas de abastecimiento una variación notable en su comportamiento [6].

Mejorar la eficiencia de las RDAP se ha convertido en un objetivo principal para los proveedores de agua potable; dentro de las estrategias más implementadas para mejorar la gestión de las redes de distribución se encuentra la sectorización hidráulica, que consiste en dividir una red de distribución de agua en subredes más pequeñas [7]. Esta metodología permite introducir elementos de control de presión y caudal y de medición en las entradas de los sectores propuestos, con lo cual se facilita implementar acciones de análisis y gestión de los parámetros más relevantes en cada zona de forma independiente y efectiva. Es así como se han desarrollado varios avances que permiten mejorar la eficiencia en la distribución de agua y en la planificación y gestión de redes basados en la sectorización hidráulica [8].

Cuando se tiene una sectorización hidráulica se habla de un método para la gestión de la presión y la pérdida del agua [9]. Se puede decir que una red sectorizada está compuesta de sectores que tienen una única entrada con una válvula de cierre controlando el sector y una red matriz que distribuye agua a cada uno de los sectores, de tal forma que el agua demandada por una población no tendría que recorrer todos los tramos de tuberías de un sistema de distribución de una ciudad para llegar al punto más lejano. El agua solo va a recorrer la red matriz propuesta y de ahí derivara a cada uno de los sectores [10].

El proceso de sectorización de una red de distribución de agua potable es una técnica utilizada para gestionar la eficiencia hidráulica del sistema y se complementa con la localización de fugas, la gestión óptima de la presión, el control de caudales, entre otros aspectos técnicos que infieren al correcto funcionamiento de una red. Actualmente se han desarrollado numerosas metodologías para darle manejo a este problema; sin embargo, no todas pueden aplicar a las necesidades particulares de cada sistema de suministro [11].

Existen retos interesantes en la homogenización de los métodos del monitoreo y en el análisis de datos, usados para optimizar sistemas de distribución de agua. Así como en permitir que la información obtenida en las RDAP esté disponible para cualquier persona o entidad interesada o involucrada en estas [10][12]. En la actualidad se han propuesto diversas metodologías para sectorizar las redes de agua y generalmente se realizan mediante dos fases: la primera es identificar el número óptimo de sectores y la segunda es identificar las tuberías donde se deben ubicar las válvulas de corte, presión y/o caudalímetros [13].

También se ha utilizado el grado de satisfacción de la demanda como un método de medición que permite evaluar los suministros de agua intermitentes, identificando así el comportamiento de las RDAP [14]. Otras metodologías utilizan el análisis geoespacial para identificar una posible red matriz del sistema y así subdividir las redes en grupos, con el fin de implementar modificaciones creando límites y entradas en las futuras áreas de medición de distrito (DMA) a partir de un grupo de nodos [15]. Apoyados en la teoría de grafos también se han propuesto algoritmos de búsqueda de DMA basados en el análisis de agrupamiento, optimización multiobjetivo y análisis multicriterio [16].

Para el desarrollo de este artículo se tendrán en cuenta dos metodologías para la descentralización de las RDAP con el fin de identificar las posibles opciones de sectorización en la red de análisis. La primera metodología es la sectorización mediante identificación previa de la red arterial; la segunda es la sectorización según la contribución de las fuentes a la demanda en los nodos [17]. Se analizará el modelo hidráulico elaborado en Epanet de la RDAP de la ciudad de Los Patios, Colombia. El análisis se realiza en conjunto con el software iDistritos con el fin

de evaluar y proponer diferentes enfoques para la optimización de esta red.

2. Metodología

2.1 Caso de estudio

La red de agua que se analizará en el caso de estudio corresponde a la ciudad de Los Patios, ubicada en Colombia; y forma parte del área metropolitana de Cúcuta. La elevación promedio es de 410 metros sobre el nivel del mar y tiene una población actual de 81000 habitantes. Tiene una economía basada en diferentes atractivos turísticos [18].

La red de distribución tiene 2 fuentes de suministro de agua desde la Planta de tratamiento de agua potable (PTAP) y la longitud de tuberías en toda la red es de 143.98 kilómetros con diámetros de tuberías que varían entre 62 y 400 milímetros. Con tuberías en materiales tales como asbesto cemento (AC), hierro fundido (HF) y polietileno de alta densidad (PEAD). El transporte de agua se realiza desde la planta de tratamiento y de un embalse ubicado al sur de del municipio, en la Figura 1 se puede observar el modelo hidráulico de la red de distribución el cual consta de 1354 nodos de demanda y 1834 tuberías.



Figura 1. Modelo general red de distribución de Los Patios.
Fuente: Autores.

En este caso de estudio se evaluarán posibles alternativas de sectorización hidráulica de la RDAP empleando la teoría de grafos con ayuda de los softwares iDistritos y Epanet para optimizar el funcionamiento hidráulico de la red buscando aumentar la continuidad del servicio como una solución al problema de intermitencia que se presenta en el sistema y que limita la cantidad de agua que se abastece a la población.

2.2 iDistritos

iDistricts, o iDistritos en español, es una herramienta que se basa en el algoritmo de búsqueda en amplitud de la teoría de grafos para proponer o identificar sectores y/o distritos hidráulicos. En conjunto con el simulador hidráulico de EPANET logra determinar los valores resultantes de las variables de salida (presiones, demandas, caudales y velocidades) de cada sector o distrito. Además, en cada uno de estos distritos se informa sobre el número de caudalímetros y/o válvulas de corte necesarios para aislar cada sector, el número de fuentes de suministro de agua, el número de bombas, válvulas y nodos con demanda, la longitud total de tuberías, las elevaciones máximas, medias y mínimas, y el desnivel que existe dentro de cada sector [13].

El proceso para identificar los sectores hidráulicos a partir de un conjunto de tuberías donde se propone instalar las válvulas de corte y/o los caudalímetros, se resume en cuatro pasos: (1) Almacenar las propiedades de los elementos del modelo en una estructura de datos temporal y comprobar que todos los identificadores de tuberías donde se instalará una válvula de corte o un caudalímetro sean válidos. (2) “Cerrar” las tuberías de la lista de caudalímetros y válvulas de corte y determinar las líneas adyacentes “abiertas” de cada nodo. (3) Recorrer la red mediante el algoritmo de búsqueda en amplitud y realizar un postproceso para reajustar el número de sectores. (4) Ejecutar una simulación hidráulica de la red sectorizada [11].

La herramienta iDistritos se codificó desde el entorno de programación de Microsoft Visual Basic 2019 (.NET) y se ejecuta de manera independiente del programa Epanet. Cuenta con una interfaz propia que permite organizar todos los escenarios propuestos en la sectorización de una red. Los resultados de los sectores se pueden visualizar desde cualquier programa GIS (Sistema de Información Geográfica).

2.3 Teoría de grafos

El algoritmo principal para las simulaciones hidráulicas de la RDAP se conoce como Algoritmo de gradiente global (GGA), tal como está implementado en Epanet versión 2.2 (Rossman, 2000). En este algoritmo se elabora una definición para matriz de incidencia topológica. Esta matriz, conocida como matriz de incidencia A_{pn} tiene unas dimensiones de $[n_p \times n_n]$, donde n_p es el número de tuberías (tuberías, válvulas y bombas) y n_n es el número de nodos en la red (demanda, tanques y depósitos). Cada fila contiene solo dos valores distintos de cero que corresponden al nodo inicial y final de la tubería. [5]. Por analogía, se puede interpretar esta matriz como la matriz de incidencia de grafos en la que los

los nodos son los vértices de grafos (V_1) y las tuberías son las aristas de los grafos (E_1), siendo así, un grafo G_1 contiene un conjunto de elementos $G_1 (V_1, E_1)$; de esta manera es posible analizar y expresar una RDAP utilizando los mismos principios de la teoría de grafos [19].

De acuerdo con [20], se define un grafo como un conjunto de objetos llamados vértices que se encuentran unidos por enlaces llamados aristas o arcos. Normalmente se representa gráficamente un grafo como un conjunto de puntos (vértices) unidos por líneas (aristas), por lo tanto, este es una herramienta para mostrar cierta relación entre varios elementos.

Una RDAP se puede asociar a un grafo conexo formado por una serie de aristas representando tuberías, válvulas y bombas y una serie de vértices que representan los nodos de extracción del caudal, fuentes de abastecimiento o elementos de almacenamiento como embalses o depósitos. Un grafo es conexo si dos vértices cualesquiera del mismo pueden unirse mediante un trayecto, en un caso contrario se dice que el grafo es inconexo. Una malla o un ciclo es un conjunto de aristas conectados de tal forma que cuando se recorren unas tras otras, ningún vértice se repite hasta que se alcanza el vértice inicial [21].

Para la red de estudio el embalse y la PTAP son las únicas entradas a la red de distribución y en ellas el transporte de los tramos críticos de la red de distribución se realiza mediante tramos de tubería de AC y HF siendo esto una de las posibles causas de la pérdida de presión en la red; debido a las situaciones anteriormente descritas La ciudad de Los Patios se encuentra constantemente en un suministro de agua con intermitencia, abastecimiento a la población por sectores generados por cierres manuales de válvulas en la red y suministrando agua en cortos periodos de tiempo, algunos días de la semana. De igual forma como se observa en la Figura 1, la red cuenta con una gran cantidad de derivaciones de las redes mayores y principales, lo cual genera que el agua realice recorridos muy largos para llegar a los puntos más alejados de la ciudad. Es posible observar que la RDAP está conformada por una red mallada y con múltiples derivaciones en forma de redes ramificadas.

3. Análisis de resultados

Los objetivos trazados en la sectorización en la red de Los Patios se encaminaron a reducir el área de inspección para generar mayor eficacia en la identificación de puntos de fugas en las diferentes zonas de servicio propuestas; de igual forma, la sectorización hidráulica planteada busca permitir la

Inicialmente se logran identificar zonas comunes de presión en la red, esto nos da un indicio general de la variabilidad de sectores hidráulicos con el mismo valor de presiones. De acuerdo con la metodología descrita se analizaron todos los trayectos identificando los nodos iniciales y finales, la RDAP

regulación de presiones en toda la red con el fin de lograr la distribución de agua potable a todos los usuarios del servicio.

La red de Los Patios se alimenta de dos fuentes principales, el agua de estas se mezcla en determinados puntos y este proceso se realiza dependiendo de la ubicación, elevación y demanda de caudal en los nodos; la red original presenta una presión máxima de 91.2 metros columna de agua (mcaH2O), una presión media de 48.32 mcaH2O y una presión mínima de 0.74 mcaH2O. Se observan velocidades altas en la red mayores a 5.0 m/s y una velocidad media de 0.45 m/s. La modelación hidráulica de la red muestra una gran variedad en el rango de presiones. Existen zonas que tienen presiones bajas (entre 0 y 10 mcaH2O) y zonas con presiones elevadas (mayores a 60 mcaH2O). Estas variaciones generan pérdidas considerables en la RDAP y la empresa de servicios públicos debe implementar el abastecimiento por turnos de servicio para controlar las presiones, garantizar la demanda de agua a los usuarios y evitar las frecuentes roturas de tuberías. En la Figura 2 se muestran los resultados de presión en la hora de máxima demanda que, según el patrón de consumo de la red, a la hora 10:00 del día, resultados obtenidos con Epanet.

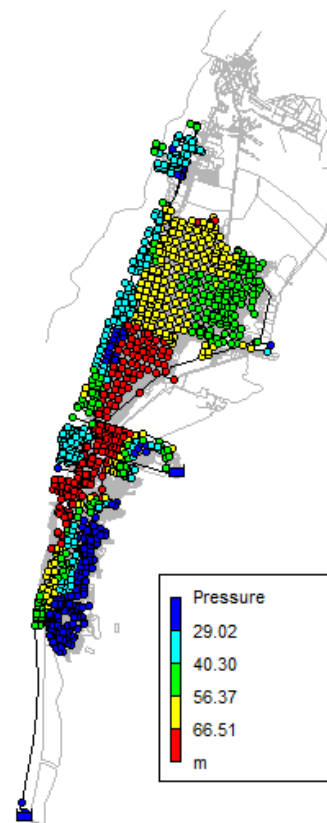


Figura 2. Presiones en la RDAP de Los Patios a la hora 10:00 del día. Fuente: Autores.

de Los Patios posee una gran parte formada en mallas se dificulta la identificación de posibles sectores alimentados desde la tubería de la red matriz.

Se analizaron cuatro posibles alternativas de sectorización. Las alternativas 1 y 2 se presentan como una sectorización de dos sectores en la red, en la alternativa 3 se proponen cinco

sectores hidráulicos y en la alternativa 4 se evalúa la posibilidad de implementar nueve sectores hidráulicos

independientes. En la Figura 3 se muestran las alternativas propuestas y cada sector se observa en un color diferente



Figura 3. Propuestas de sectorización hidráulica para la RDAP de Los Patios (a) Alternativa 1, (b) Alternativa 2, (c) Alternativa 3, (d) Alternativa 4. Fuente: Autor(es).

El planteamiento de las alternativas se hizo de forma gradual, inicialmente se evaluaron dos opciones que dividieron la red en dos sectores (Figura 3a y Figura 3b). Luego se definieron las tuberías principales con el fin de aislar las redes de mayor diámetro como red matriz que alimenta los sectores propuestos, ubicando caudalímetros y válvulas de cierre en la

entrada de cada zona y se fue aumentando el número de sectores propuestos con el fin de reducir el tamaño de las áreas de cada sector hidráulico. Se evaluó la sectorización con cinco (Figura 3c) y nueve sectores (Figura 3d). La primera alternativa (Figura 3a) evalúa dos sectores hidráulicos, la presión máxima promedio por sector es de

110.0 mca H₂O y la presión mínima es 6.70 mca H₂O. Esta solución se considera poco eficiente y no optimiza la red, por el contrario, la presión promedio de la red aumenta en comparación con el modelo original. Adicionalmente uno de los sectores propuestos tiene un área muy pequeña en comparación con el otro sector, lo cual mostraría una diferencia amplia de demandas de caudal. La velocidad máxima promedio por sector es de 4.13 m/s, valor cercano al máximo permitido (velocidad < 5 m/s).

Para la segunda alternativa (Figura 3b), también se analizaron dos sectores hidráulicos, la división de áreas se realiza a partir de la vía principal de la ciudad, dejando un sector al oeste y otro al este. Los sectores mantienen una diferencia considerable en relación de tamaño. La presión máxima promedio por sector es de 129.88 mca H₂O, se necesitará implementar válvulas reductoras y/o reguladoras de presión. Se obtiene con esta configuración resultados de presión negativa en algunas horas del día, por lo cual algunos usuarios no serán abastecidos en algunos periodos de tiempo. La velocidad máxima promedio por sector es de 6.07 m/seg, mayor al límite permitido.

Las alternativas anteriores 1 y 2 generarían pocas intervenciones en la red, pero no se considera las opciones más viables por que muestran resultados que no representan una optimización de la red y no facilitan las futuras labores de prevención de fugas sobre la red principal que garanticen el suministro de agua en la RDAP del municipio Los Patios.

En la tercera y cuarta alternativa, se incorporaron las tuberías principales, de mayor diámetro, a los sectores hidráulicos ubicando caudalímetros y válvulas de cierre en la entrada de cada zona. En la tercera alternativa (Figura 3c), se propusieron 7 caudalímetros con sus válvulas de cierre y se obtuvo un resultado de cinco sectores hidráulicos. Se obtuvo una presión máxima promedio por sector de 104.09 mca H₂O y una presión mínima promedio por sector es de 16.94 mca H₂O. Los valores mínimos de presión garantizan el abastecimiento continuo de agua durante el día, sin interrupciones. Para los valores altos de presión (presión > 60 mca H₂O), será necesario instalar válvulas reductoras y/o reguladoras de presión en la entrada de cada sector, para realizar una gestión óptima de presiones. La velocidad máxima promedio por sector obtenida fue de 3.71 m/s.

En la última alternativa evaluada (Figura 3d), se analiza la opción de implementar nueve sectores hidráulicos independientes, se proponen 12 caudalímetros. La presión máxima promedio por sector es de 93.94 mca H₂O resultando el menor valor obtenido en comparación de las cuatro alternativas. La presión mínima promedio por sector es de 17.85 mca H₂O. La velocidad máxima promedio por sector es de 2.92 m/s. Se observa que esta alternativa presenta los mejores resultados en términos de presión y velocidad. El resumen de los parámetros analizados en cada alternativa se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de parámetros en las alternativas propuestas.

Alternativa	Sectores hidráulicos	Presión mínima y máxima (mca H ₂ O)	Velocidad máxima (m/s)
1	2	6.70 - 110.00	4.13
2	2	P < 0.0 - 129.88	6.16
3	5	16.94 - 104.09	3.71
4	9	17.85 - 93.94	2.92

Al analizar los resultados obtenidos se observa que el planteamiento propuesto de nueve sectores hidráulicos en las RDAP de la ciudad de Los Patios permitiría mejorar los parámetros de presión y velocidad en cada sector, también se logra reducir el área total de la red en un número importante de zonas que podrán controlarse de forma más detallada para implementar y desarrollar acciones complementarias que permitan continuar con la optimización de la red.

Será necesario aislar las tuberías principales de la red para que funcionen como red matriz y de esta se realicen conexiones únicas que deriven a la entrada de cada sector propuesto, controlando así los volúmenes de agua abastecidos y las presiones de operación.

4. Conclusiones

Se planteó un análisis que permite observar el comportamiento de la RDAP de la ciudad de Los Patios, con el fin de seleccionar una alternativa viable de sectorización hidráulica, se evaluaron parámetros importantes como el tamaño de cada sector, buscando un mejor control hidráulico, el promedio de presiones máximas y mínimas y el promedio de velocidades máximas. Con estos parámetros se garantiza un buen estado de funcionamiento de la red.

De acuerdo con la evaluación multicriterio, teniendo en cuenta los objetivos que se buscan al momento de sectorizar una red de distribución de agua, se recomienda la alternativa cuatro (Figura 3d) que tiene nueve sectores en la red, cada sector tendría un promedio de 114 nodos. El rango de presiones esperado oscilaría entre 17.85 y 93.94 mca H₂O, valores aceptables pero que se pueden mejorar con la instalación de válvulas reductoras y/o reguladoras de presión en la entrada de cada sector. Se obtendrá una velocidad máxima promedio de 2.92 m/s.

Con este trabajo se logra demostrar que iDistritos es una herramienta útil y practica para definir sectores de demanda partiendo de un modelo de red en Epanet. Siendo el resultado un punto de partida para la optimización de una red de agua y que debe ser complementado con acciones relacionadas con la gestión óptima de presiones, la ubicación óptima de sensores en la red para implementar macro medición y monitorización de presión y caudal y la detección de fugas. Se hace indispensable al momento de ejecutar la idealización física de esta propuesta, implementar un sector piloto que permita plasmar en la red física cada sector y que logre funcionar de forma adecuada, mostrando que la continuidad

del abastecimiento de agua de una ciudad se puede mejorar con la sectorización hidráulica

Referencias

- [1] E. CAMPBELL GONZALEZ, "Propuesta para una metodología de sectorización de redes de abastecimiento de agua potable," 2014, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/39139>
- [2] L. A. Rossmann, H. Woo, M. Tryby, F. Shang, and R. Janke, *Manual del usuario de EPANET 2.2*. EPA, US Environmental Protection Agency, 2002.
- [3] J. C. Gil Jaramillo, *Sistemas de distribución de agua con intermitencia de servicio. Gestión de demanda y optimización operacional*. 2009.
- [4] L. F. Sandoval, J. R. R. y Zurvia-Flores, and G. T. López, "La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica," *Ing. Hidráulica y Ambient.*, vol. 37, no. 2, pp. 29-43 p., 2016, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://riha.cujae.edu.cu/index.php/riha/article/view/333>
- [5] M. E. Castro-Gama, Q. Pan, A. Jonoski, and D. Solomatine, "A Graph Theoretical Sectorization Approach for Energy Reduction in Water Distribution Networks," *Procedia Eng.*, vol. 154, pp. 19–26, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.PROENG.2016.07.414.
- [6] S. Takahashi and S. Adachi Takeshi Takemoto Minoru Umeki, "Featured Articles Water Distribution Solution for More Efficient Operation of Water Supply," *Hitachi Rev.*, vol. 64, no. 9, 2015.
- [7] S. Hajebi, S. Temate, S. Barrett, A. Clarke, and S. Clarke, "Water Distribution Network Sectorisation Using Structural Graph Partitioning and Multi-objective Optimization," *Procedia Eng.*, vol. 89, pp. 1144–1151, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.11.238.
- [8] P. Gómez, F. Cubillo, and F. J. Martín, "Comprehensive and Efficient Sectorization of Distribution Networks," *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 753–762, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROENG.2014.02.082.
- [9] M. M. Rokstad and K. Van Laarhoven, "Technical note: Graph-theory-based heuristics to aid in the implementation of optimized drinking water network sectorization," *Drink. Water Eng. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, Jun. 2022, doi: 10.5194/DWES-15-1-2022.
- [10] R. A. Ospino, B. A. R. Valencia, and J. A. R. Valencia, "Sistema de adquisición de datos para el monitoreo de la calidad del agua a través de las variables de PH, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 17, 2011, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcta/article/view/1979>
- [11] O. T. Vegas Niño, F. Martínez Alzamora, and V. G. Tzatchkov, "A Decision Support Tool for Water Supply System Decentralization via Distribution Network Sectorization," *Process. 2021, Vol. 9, Page 642*, vol. 9, no. 4, p. 642, Apr. 2021, doi: 10.3390/PR9040642.
- [12] A. D. Bonilla Granados, C. A., Tarazona Tobo, L. V. ., & Caicedo Calderón, "Análisis estadístico del consumo de agua potable residencial en Toledo, Colombia.," *BISTUA Rev. la Fac. Ciencias Básicas*, vol. 20(1), pp. 70–75, 2022, doi: <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n%25i.2022.1319>.
- [13] O. Vegas, F. Martínez Alzamora, and V. Tzatchkov, "iDistritos: Sectorización de modelos de redes hidráulicas de Epanet," *Rev. Hidrolatinoamericana Jóvenes Investig. y Prof.*, vol. 5, pp. 13–15, 2021, doi: 10.4995/Thesis/10251/33152.
- [14] D. D. J. Taylor, A. H. Slocum, and A. J. Whittle, "Demand Satisfaction as a Framework for Understanding Intermittent Water Supply Systems," *Water Resour. Res.*, vol. 55, no. 7, pp. 5217–5237, Jul. 2019, doi: 10.1029/2018WR024124.
- [15] J. E. Pesantez, E. Z. Berglund, and G. Mahinthakumar, "Geospatial and Hydraulic Simulation to Design District Metered Areas for Large Water Distribution Networks," *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 146, no. 7, p. 06020010, May 2020, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001243.
- [16] B. M. Brentan, S. Carpitella, J. Izquierdo, E. Luvizotto, and G. Meirelles, "District metered area design through multicriteria and multiobjective optimization," *Math. Methods Appl. Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 3254–3271, Apr. 2022, doi: 10.1002/MMA.7090.
- [17] Ó. T. Vegas Niño, "Nuevas herramientas para la gestión técnica de redes de distribución de agua basadas en el modelo matemático y la topología de la red.," Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2023. doi: 10.4995/Thesis/10251/192474.
- [18] E. Anselmo and R. Arrieta, "Factores socio económicos y ambientales que afectan el desarrollo sostenible de la comunidad de Isla Grande," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 39, Aug. 2022, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcta/article/view/1420>
- [19] A. Yazdani and P. Jeffrey, "Complex network analysis of water distribution systems," *Chaos*, vol. 21, no. 1, Mar. 2011, doi: 10.1063/1.3540339/986125.
- [20] & T. Vegas, O., Martínez, F., "Aplicación de la teoría de grafos a la identificación de subsistemas hidráulicos en redes de distribución de agua," in *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Perú*, 2016, pp. 963–966.
- [21] O. T. Vegas Niño, "Herramientas de ayuda a la sectorización de redes de abastecimiento de agua basadas en la teoría de grafos aplicando distintos criterios," Nov. 2012, Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/handle/10251/18008>