

FORMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE CRITERIOS PARA LA MODIFICACIÓN TOPOLÓGICA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE ANTE FUTUROS ESCENARIOS DE CAMBIO EN LA DEMANDA

Laura Vega¹, Daniela Rojas² y Juan Saldarriaga³

^{1,2} Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de Los Andes.

³ Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes.

E-mail: lc.vega173@uniandes.edu.co; d.rojas1887@uniandes.edu.co; jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

El constante crecimiento poblacional y desarrollo urbano constituyen un gran desafío dentro del diseño, operación y mantenimiento de las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP), pues su desempeño puede verse drásticamente afectado al no existir una adecuada articulación entre el crecimiento urbano y los planes o esquemas de ordenamiento territorial; como en el caso de la generación de asentamientos informales o sobredensificación de suelos. Teniendo en cuenta que esta problemática es una situación de gran incidencia en ciudades de países en desarrollo, como Colombia, el presente trabajo busca definir un nuevo criterio de rehabilitación topológica de RDAP, denominado Potencia Disponible, y compararlo con una aproximación previa desarrollada en el CIACUA, con el criterio de Potencia Específica (Saldarriaga et al., 2010). Para ello, se ha desarrollado una metodología de rehabilitación y evaluación con una valoración exhaustiva tubería a tubería. Ambos criterios fueron analizados por medio de cinco casos de estudio de redes preexistentes en Colombia, a nivel sectorial o municipal, bajo diferentes escenarios futuros de demanda. En cada caso se identifica la infraestructura instalada que debe ser reemplazada con prioridad con el fin de conseguir la presión mínima requerida y lograr un alto desempeño y confiabilidad del sistema.

Metodología

Los casos de estudio se seleccionan teniendo en cuenta la inclusión de diferentes configuraciones topológicas. Estos corresponden a dos redes de distribución en municipios con menos de 12.000 habitantes (Ginebra y Bugalagrande) y tres Distritos Hidrométricos (DMA) en ciudades principales de Colombia (Sector 35 de Bogotá D.C., comuna Norte y Noreste – DNN- en Bucaramanga y sector Simón Bolívar en Santa Marta). La metodología propuesta para la evaluación de criterios de rehabilitación de SDAP cuenta con seis pasos, según la Fig. 1.

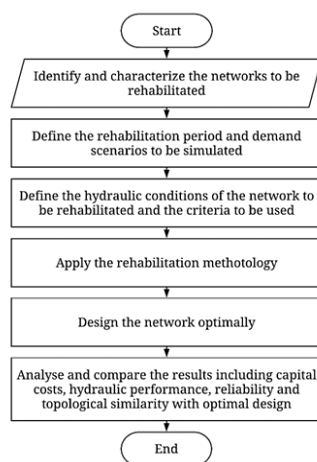


Figura 1. -Metodología de evaluación planteada.

En primera medida, se identifican las características hidráulicas, topológicas, topográficas principales y sus condiciones operacionales actuales para la definición del contexto de rehabilitación.

Teniendo en cuenta que las RDAP se diseñan para un periodo de tiempo entre 25 y 30 años, se escoge un periodo de rehabilitación equivalente a 30 años junto con sus respectivos escenarios de demanda, con el fin de evaluar qué cambios se han de efectuar al final de este periodo de diseño. Adicionalmente, se plantean seis escenarios de rehabilitación gradual, que describen un proceso de rehabilitación más acorde con la realidad, ya que corresponden a intervalos de tiempo más cortos con incrementos en la demanda cada 5 años, hasta completar el periodo de diseño. De esta forma, para cada uno de los casos de estudio se toman las respectivas proyecciones de población del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia) y las tasas de consumo de agua per cápita, más un 30% adicional por pérdidas. A partir de esta información, se analiza la variación en las demandas del sistema mediante la generación de diferentes escenarios: uno con enfoque determinístico y dos con enfoque estocástico para la obtención de funciones de distribución de probabilidad.

Posteriormente, como la metodología de rehabilitación busca mejorar la capacidad hidráulica de la red existente y aumentar su confiabilidad, se definen dos condiciones hidráulicas principales: la presión mínima requerida por la red (P_{min}), y el porcentaje máximo de nudos con demanda que no pueden cumplir con P_{min} ; esto según la caracterización hecha en el primer paso. Al mismo tiempo, se establecen los criterios de rehabilitación usados para todos los casos de estudio y escenarios de demanda propuestos. Por un lado, se tiene la Potencia Específica (PE), la cual consiste en la energía por unidad de peso que es disipada en una tubería; y otro lado, la Potencia Disponible (PD) entendida como una adaptación a pequeña escala del Índice de Resiliencia Hidráulico de Tuberías (PHRI, por sus siglas en inglés) introducido por Liu et al. (2016).

Ambos criterios permiten determinar el desempeño hidráulico de cada una de las tuberías, analizados en la hora de mayor demanda con simulaciones de periodo extendido a través del software EPANET. Para la rehabilitación de cada escenario, se realiza un proceso iterativo verificando que el sistema cumpla con la presión mínima requerida en el sistema según las condiciones hidráulicas definidas. Por consiguiente, en cada iteración, al identificar la tubería con peor desempeño hidráulico, según el criterio empleado, se reinstala la tubería con el diámetro siguiente en PVC, de acuerdo con los diámetros comerciales disponibles (ver Figura 2). En el caso de PE, la tubería con el peor desempeño hidráulico en aquella con mayor PE, mientras que, en el caso de PD, es aquella menor magnitud de PD.

Una vez se rehabilita la red, garantizando la presión mínima requerida, se calcula el costo y se evalúa el desempeño hidráulico de la configuración final, haciendo uso de la función de costo unitario para tuberías de PVC en RDAP en Colombia desarrollada por Peinado (2016). En cuanto a la evaluación del desempeño hidráulico se emplean los siguientes índices: el Índice de Resiliencia Hidráulico de Tuberías, Índice de Potencia Disponible (Liu et al., 2016), Índice de Resiliencia (Todini, 2000), ajustado por Creaco, Franchini and Todini (2016), y el Índice de Resiliencia Modificado (Jayaram and Srinivasan, 2008).

Con el propósito de verificar una posible similitud entre las topologías resultantes de las redes rehabilitadas y el diseño óptimo, se aplicó la metodología de Superficie de Uso Óptimo

de Potencia (OPUS) integrada en el software REDES (CIACUA, 2006) a los casos de estudio. No obstante, debido a algunas limitaciones del programa, sólo se diseñaron óptimamente las redes de Bugalagrande y Ginebra.

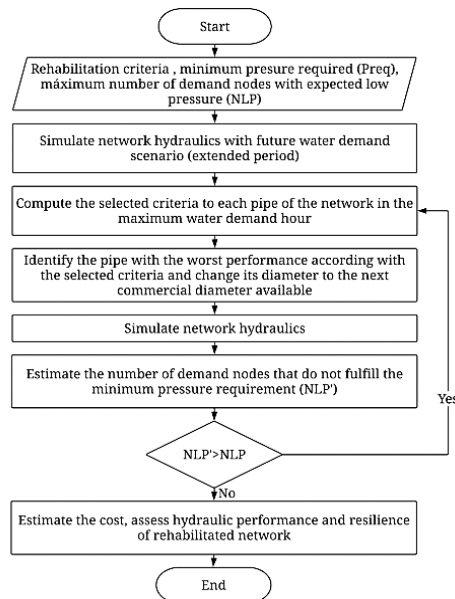


Figura 2. -Metodología de rehabilitación de topología de SDAP.

Finalmente, se consideraron tres marcos de comparación los índices de desempeño hidráulico y costos de rehabilitación resultantes: i) el diseño óptimo de la red, ii) el diseño existente de la red con las demandas futuras y iii) el diseño existente de la red con las demandas al inicio del período de estudio (2007). De manera complementaria, se incluye el análisis por gráficas de superficies de presión, la obtención de dos dimensiones fractales de parámetros hidráulicos – FD1 y FD2 –, y dos mediciones geométricas– Norma Manhattan o Taxicab y Norma Euclídea– del vector de diferencias entre los diámetros obtenidos en el diseño óptimo y en las redes rehabilitadas para cada caso de estudio.

Resultados

En primera instancia, tanto el costo total de la red, como el costo de rehabilitación de cada una de las redes, resultan ser similares para los dos periodos de rehabilitación seleccionados (30 años y cada 5 años). Sin embargo, el número de modificaciones realizadas tienden a incrementarse en las rehabilitaciones que se llevan a cabo gradualmente cada 5 años, por lo que se genera un mayor costo en los servicios de agua.

En cuanto al uso de los criterios, se evidencia que el criterio de Potencia Especifica produce más costos unitarios por rehabilitación y más costos totales en comparación con el criterio de Potencia Disponible, ya que, en este último, un menor número de modificaciones en las tuberías deben hacerse para garantizar la presión mínima requerida. Esta diferencia entre ambos criterios tiende a incrementarse a medida que la red se vuelve más compleja en cuanto su extensión, operatividad y topografía. En este mismo sentido, mejores resultados, en cuanto al desempeño hidráulico se obtienen al aplicar PE en aquellas redes de menor complejidad y PD en aquellas de mayor complejidad (ver Figura 3).

Para ambas redes diseñadas óptimamente, la rehabilitación con PE presenta un rendimiento hidráulico mayor que el diseño óptimo, mientras que la rehabilitación por PD muestra resultados de desempeño similares o menores al óptimo en las redes de mayor complejidad.

WDS	Existent topology	Opt. design	Specific Power		Available Power	
			30 years	every 5 years	30 years	every 5 years
Ginebra	\$137,967	\$89,957	\$84,863 46 \$ 157,156	\$84,863 46 \$ 153,179	\$100,846 58 \$ 161,371	\$103,232 60 \$ 161,729
Bugalag.	\$269,455	\$142,99	\$166,032 43 \$ 306,502	\$218,907 53 \$ 316,696	\$139,461 43 \$ 300,040	\$159,063 53 \$ 303,909
Sector 35	\$539,090	-	\$1,049,495 109 \$ 768,143	\$979,368 112 \$ 757,076	\$291,652 83 \$ 598,274	\$332,872 111 \$ 608,214
NND	\$587,065	-	\$514,986 88 \$ 683,138	\$1,027,619 200 \$ 784,783	\$134,288 47 \$ 609,056	\$143,356 58 \$ 610,425
Simón Bolívar	\$8,622,283	-	\$18,251,426 53 \$ 13,919,991	\$18,520,700 71 \$ 13,966,243	\$17,508 6 \$ 8,625,983	\$20,585 10 \$ 8,626,295

Figura 3. - Costos del diseño óptimo y los casos de estudio de rehabilitación.

Por otro lado, al haber cambios más drásticos en diámetros con el criterio de PE, los diámetros obtenidos con el criterio PD conservaron una mayor semejanza con aquellos asociados al diseño óptimo, en comparación con PE. No obstante, ambos tienden a alejarse de la topología del diseño óptimo, pues ambas mediciones geométricas demostraron mayor similitud de diámetros entre la red existente y el diseño óptimo. Esto se evidencia en las superficies de presión generadas por el programa REDES, que confirman la alta tendencia del criterio de PE a modificar las tuberías de mayor diámetro y elevar globalmente el plano de presiones; en tanto que el criterio de PD tiende a homogeneizar el plano de presiones y reducirlo ligeramente en comparación con el diseño óptimo.

Conclusiones

Ambos criterios evaluados para la metodología de rehabilitación de RDAP, bajo diferentes escenarios de demanda, se consideran buenas aproximaciones para el estudio del rendimiento hidráulico, pues prueban haber mejorado la confiabilidad hidráulica y el desempeño de todos los sistemas de los casos de estudio analizados. En comparación con el criterio de PE, el criterio de PD prueba tener resultados un poco bajos o similares en costo y desempeño en la rehabilitación de redes simples; no obstante, demostró mejoras significativas en la rápida identificación de tuberías a modificar y una alta confiabilidad resultante en redes de mayor complejidad y extensión.

Referencias

- CIACUA. (2006). "REDES software". Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes.
- Creaco, E., Franchini, M., Todini, & E. (2016). "Generalized Resilience and Failure Indices for Use with Pressure-Driven Modeling and Leakage". *Journal of Water Resources Planning and Management*. Doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000656
- Jayaram, N., & Srinivasan, K. (2008). "Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks". *Water Resources Research*, 44. Doi: 10.1029/2006WR005316, 2008
- Liu, H., Savic, D., Kapelan, Z., Creaco, E., & Yuan, Y. (2017). "Reliability Surrogate Measures for Water Distribution System Design: Comparative Analysis". *Journal of Water Resources Planning and Management*. Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000728
- Peinado, C. D., & Saldarriaga, J. (2016). "Ecuaciones de costo para el diseño optimizado de redes de agua potable y alcantarillado" (Not published master's thesis). Universidad de los Andes. Bogotá.
- Saldarriaga, J., Ochoa, S., Moreno, M., Romero, N., & Cortés, O. (2010). "Prioritized rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water". *Urban Water Journal*, 7(2), 121-140.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 2(2), 115–122. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2)