

COMPARACIÓN ENTRE DISEÑOS OPTIMIZADOS Y DISEÑOS REALES EN RDAP. EFECTO DEL AUMENTO DE LA POBLACIÓN A LO LARGO DE LA VIDA ÚTIL DEL PROYECTO

Alejandra Posada¹ y Juan Saldarriaga²

¹ Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) Universidad de los Andes.

² Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes.

E-mail: va.posada10@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

El crecimiento poblacional genera un incremento en la demanda de agua potable a lo largo del tiempo, y alcanza valores superiores al rango considerado durante el diseño original de las redes. Como resultado, diversos problemas aparecen en las RDAP como condiciones de baja presión, capacidad hidráulica reducida, pérdidas de agua e interrupciones del servicio (Saldarriaga et al., 2010), lo cual genera una enorme presión sobre la infraestructura pública. En la mayoría de los casos, las presiones de los nudos y la capacidad hidráulica son aumentadas modificando la presión en la entrada, pero esto puede conducir a estallidos de tuberías, incremento en las pérdidas de agua e interrupciones del servicio.

Debido a lo anterior, resulta claro que los procesos de rehabilitación en RDAP son vitales para cumplir con las normativas y mantener la calidad del servicio de distribución. Sin embargo, este proceso debe realizarse gradualmente y no como un diseño inicial, de manera que sea semejante a los lineamientos seguidos en la realidad. En este sentido, se han desarrollado varios enfoques para mejorar la capacidad hidráulica de las RDAP, incrementando los diámetros de las tuberías utilizando metodologías basadas en indicadores hidráulicos que han mostrado una disminución en los costos finales de las redes y mejores indicadores de desempeño hidráulico (Saldarriaga, Bernal & Ochoa, 2008). Así, en este trabajo se propone una comparación entre los modelos hidráulicos que se obtienen de la rehabilitación gradual de diversas RDAP sometidas a incrementos en la demanda y los modelos hidráulicos diseñados óptimamente, con el fin de cuantificar las diferencias en términos de costos y parámetros hidráulicos.

Metodología

Durante la presente investigación se analizaron seis RDAP de Colombia con el objetivo de comparar, en términos de costos y criterios hidráulicos, una red rehabilitada gradualmente sometida a incremento de la demanda con el diseño óptimo de la misma red en condiciones de la demanda final. La metodología llevada a cabo se puede resumir en los siguientes pasos:

1. A partir del escenario de demanda base de las redes originales, se generaron incrementos en la demanda teniendo en cuenta el crecimiento esperado de la población para la ubicación geográfica respectiva.
2. Las redes se diseñaron óptimamente para el escenario inicial y final de la demanda, teniendo en cuenta un periodo de análisis de 30 años. Para esto, se implementó la metodología OPUS (Uso Óptimo de la Superficie de Potencia), la cual es comparable con otras metodologías como Algoritmos genéticos y Búsqueda de armonía (Saldarriaga, Paez, Cuero, & León, 2012). Para esto se utilizó el software REDES desarrollado en la Universidad de los Andes.
3. Se realizó el proceso de rehabilitación cada 5 años para un periodo final de 30 años, con una selección de tuberías con

base en dos criterios principales: Índice de resiliencia y Potencia específica. Se realizó esto en los casos en que se incumplió el criterio de presión mínima en uno o más nudos de cada una de las redes.

4. Se compararon los resultados de ambos criterios de rehabilitación con el diseño óptimo en términos de la resiliencia de la red y potencia disipada, costos, distribución de presión y número de cambios por criterio.

A continuación, se presenta una breve descripción de los indicadores hidráulicos utilizados:

El índice de resiliencia es un indicador de la vulnerabilidad de una red a la falla y se calcula mediante la siguiente ecuación (Todini, 2000):

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} Q_i (H_i - H_i^*)}{[\sum_{i=1}^{n_r} Q_i H_i + \sum_{i=1}^{n_p} P_{pi}] - \sum_{i=1}^{n_n} q_i H_i} \quad [1]$$

La Potencia específica es un concepto desarrollado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes y está definido por la ecuación:

$$P_{UT} = Q_i (H_a - H_b) \quad [2]$$

La expresión de potencia disipada (P_{dis}) utilizada en este trabajo corresponde a la fracción de la potencia total de entrada en una red que se disipa en la distribución del agua (pérdidas menores y pérdidas por fricción) (Todini, 2000). Entonces, partiendo de la potencia total en una red, se determina la expresión:

$$P_{tot} = P_{int} + P_{ext} \quad [3]$$

$$P_{int} = \gamma \sum_{k=1}^{n_k} Q_k H_k - \gamma \sum_{i=1}^{n_n} q_i H_i \quad [4]$$

$$P_{dis} = \frac{P_{int}}{P_{tot}} \quad [5]$$

Casos de estudio

Las redes utilizadas son de varios departamentos de Colombia y difieren entre sí en diferentes aspectos como la topografía, la demanda y el tamaño (número de nudos). Se presentan dos casos de la ciudad de Bogotá, dos casos del departamento Valle del Cauca y dos casos de la ciudad de Manizales. Las características hidráulicas de cada RDAP se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1.- Características de los casos de estudio.

RDAP	Número de nudos	Número de tuberías	Longitud de tuberías (km)
Cazucá	145	150	13.64
Sector 35	1190	1289	39.47
Candelaria	463	567	23.31
Bolívar	285	333	29.46
Circuito 51	127	134	4.38
T23 Alta	110	122	4.81

Para cada una de las redes se determinó la tasa de crecimiento anual de la población dependiendo de la ubicación geográfica de la misma. Lo anterior se realizó a partir de registros históricos con los cuales se ajustó un modelo lineal de crecimiento. Como resultado, durante el periodo de estudio las demandas base de las redes se incrementaron entre valores de 0.62% hasta 1.43%. En el caso de la ciudad de Bogotá, las tasas de crecimiento se encontraron entre 1% y 1.43%. Los modelos hidráulicos de Bogotá se presentan en la **Figura 1**.

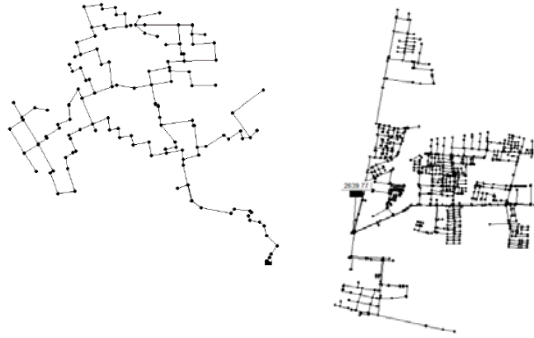


Figura 1.- Red Cazucá (izquierda) y Red Sector 35 (derecha) de la ciudad de Bogotá.

Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la implementación de las metodologías de rehabilitación fueron analizados en términos del Índice de resiliencia, Potencia disipada, costos, número de cambios y distribución de presiones. A continuación, se presentan las comparaciones porcentuales, contra el diseño con la metodología OPUS, para los seis casos de estudio en términos de los costos y los indicadores de desempeño hidráulico.

Tabla 2.- Comparación porcentual de los costos para los criterios de rehabilitación y el diseño mediante la metodología OPUS.

Costos ($CU = 80.825D^{1.385}$)			
Red	Diseño óptimo	Rehabilitadas con I_r	Rehabilitadas con P_{UT}
Cazucá	100%	113%	145%
Sector 35	100%	102%	110%
Candelari	100%	107%	107%
Bolívar	100%	95%	96%
Circuito	100%	96%	96%
T23	100%	100%	101%

Tabla 3.- Comparación porcentual de la potencia disipada entre RDAP rehabilitadas y diseñadas con la metodología OPUS.

Potencia disipada			
Red	Diseño óptimo	Rehabilitadas con I_r	Rehabilitadas con P_{UT}
Cazucá	100.0%	81.0%	90.5%
Sector 35	100.0%	100.0%	87.5%
Candelaria	100.0%	57.1%	57.1%
Bolívar	100.0%	91.7%	83.3%
Circuito La	100.0%	100.0%	100.0%
T23	100.0%	100.0%	100.0%

Tabla 4.- Comparación porcentual del Índice de resiliencia entre RDAP rehabilitadas y diseñadas con la metodología OPUS.

Índice de resiliencia			
Red	Diseño óptimo	Rehabilitadas con I_r	Rehabilitadas con P_{UT}
Cazucá	100%	128%	114%
Sector 35	100%	119%	132%

Candelari	100%	179%	185%
Bolívar	100%	97%	97%
Circuito	100%	99%	99%
T23	100%	101%	107%

Uno de los principales resultados obtenidos fue que el criterio de P_{UT} requirió un mayor número de cambios de tuberías para alcanzar valores del I_r similares a los obtenidos con el criterio de resiliencia. En particular, se observó en el caso de la red Cazucá, que el criterio seleccionaba cambiar tuberías que a pesar de llevar grandes caudales, no tenían un impacto significativo en la modificación de la presión mínima en los nudos de la red.

En general, se observó que los diseños obtenidos a partir de la metodología OPUS tienen bajos índices de resiliencia y que en las redes rehabilitadas (con ambos criterios) es posible obtener valores significativamente más altos (entre 7% y 85%) por incrementos porcentuales de costo bajos (1%-13%). De igual manera, se obtuvo un resultado consistente en el indicador Potencia disipada, pues para todos los casos se obtuvieron valores inferiores o iguales de la potencia disipada en la red, lo cual indica una mayor eficiencia en el transporte del agua y una mayor disponibilidad de energía para la respuesta ante una falla.

Finalmente, se observó una mejora significativa sobre la distribución de presiones de cada uno de los casos de estudio a lo largo del periodo de 30 años. Las modificaciones realizadas por ambos criterios evidenciaron su capacidad para incrementar las presiones de las redes, obteniendo así, una superficie de gradiente hidráulica más homogénea.

Conclusiones

El presente trabajo propuso aplicar las tasas de aumento poblacional en Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP) con el fin de comparar el diseño óptimo con dos metodologías de rehabilitación basadas en dos criterios hidráulicos. Los parámetros utilizados para la rehabilitación fueron Índice de Resiliencia y Potencia específica. Con base en las dos metodologías, se analizaron las redes resultantes para 6 periodos de análisis en términos de costos, número de cambios, distribución de presiones e índices. El primero criterio demostró que las redes rehabilitadas tenían costos cercanos al de la red resultante del diseño óptimo con un número de cambios limitados. Por el contrario, el segundo criterio requirió más cambios, generando redes más costosas, pero sin un impacto importante sobre la vulnerabilidad de la red. Por último, con ambos criterios se observó una homogenización de la superficie de presiones de las redes, lo cual no solo garantiza el cumplimiento de las restricciones de presión mínima, sino que permite asegurar un mismo nivel de servicio de suministro de agua para los clientes.

Referencias

- Saldarriaga, J., Bernal, A., & Ochoa, S. (2008). Optimized design of water distribution network enlargements using resilience and dissipated power concepts. *WDSA 2008:12th Water Distribution System Analysis Conference*, 298-312.
- Saldarriaga, J., Ochoa, S., Moreno, M., Cortés, O., & Romero, N. (2010). Prioritised rehabilitation of water distribution networks using dissipated power concept to reduce non-revenue water. *Urban Water Journal* vol. 7, 121-140.
- Saldarriaga, J., Paez, D., Cuero, P., & León, N. (2012). Optimal power use surface for design of water distribution systems. *WDSA 2012: 14th Water Distribution System Analysis Conference*, 24-27.
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks using a resilience index based heuristic approach. *Urban Water*, 115-122.