

RELACIÓN ENTRE DENSIDAD POBLACIONAL Y TOPOLOGÍA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Cristina Moreno¹, 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: ac.morenob@uniandes.edu.co, d.rojas1887@uniandes.edu.co, jsaldarr@uniandes.edu.co

Introducción

Este estudio pretende analizar la correlación que existe entre la topología de una red de distribución de agua potable (RDAP) y el incremento en la densidad poblacional para diseño, al evaluar el comportamiento de cuatro casos de estudio de redes localizadas en Colombia, seleccionadas principalmente por su forma geométrica.

Metodología

Se proponen cuatro casos de estudio correspondientes a redes reales con diferentes geometrías en las regiones del Valle del Cauca y Cundinamarca en Colombia: i) Candelaria y ii) Bugalagrande localizadas en el departamento del Valle del Cauca; y iii) el Subsector 2 y iv) Subsector 4 pertenecientes al Sector 8 de la ciudad de Bogotá D.C.. La metodología que se plantea consta de tres pasos que se describen a continuación.

Análisis de las condiciones iniciales. Para cada uno de los casos de estudio, se identifican las características principales del sistema como el número de tuberías, nudos, tanques, geometría, área, longitud y población inicial de abastecimiento.

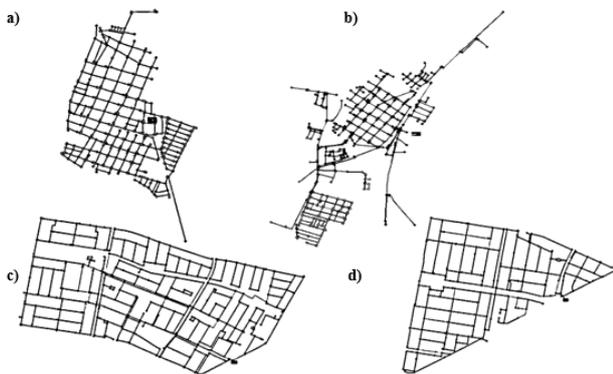


Figura 1.- Casos de estudio, a) Candelaria, b) Bugalagrande, c) Subsector 2, d) Subsector 4.

CANDELARIA UGALAGRANDE SUBSECTOR 2 SUBSECTOR 4								
Número de tuberías	567	656	688	432				
Número de Nudos	464	583	593	378				
Número de Tanques	2	1	1	1				
Longitud Total de Tuberías [m]	23.300	31.000	36.000	21.000				
Área de la Red [m ²]	1.100.000	2.550.000	1.726.858	1.097.071				
Caudal suministrado [LPS]	9,34	52,47	259,98	110,39				
CANDELARIA		BUGALAGRANDE		SUBSECTOR 2		SUBSECTOR 4		
Densidad [hab/ha]	Tasa de Flujo [Lps]	Densidad [hab/ha]	Tasa de Flujo [Lps]	Densidad [hab/ha]	Tasa de Flujo [Lps]	Densidad [hab/ha]	Tasa de Flujo [Lps]	
Diseño 1	425	99,34	97	52,47	708	259,98	473	110,39
Diseño 2	842	197,67	192	104,47	1,410	519,96	942	220,78
Diseño 3	1,260	296,02	287	156,63	2,114	779,94	1,413	331,18
Diseño 4	1,677	394,37	383	208,80	2,817	1,039,91	1,883	441,57
Diseño 5	3,345	787,79	765	417,45	5,625	2,079,83	3,760	883,14

Figura 2. - Características de los casos de estudio.

Diseño óptimo de las RDAP bajo diferentes incrementos en la densidad poblacional. Teniendo en cuenta las condiciones iniciales de población como los escenarios base de cada red, se plantean cuatro escenarios de densificación correspondientes a incrementos por factores de dos, tres, cuatro y ocho veces respecto a las densidades poblacionales. De esta forma,

implementando la metodología de Superficie de Uso Óptimo de Potencia (OPUS) (Saldarriaga et al., 2012) en el programa REDES (Saldarriaga et al., 2017) se ejecutan en total cinco diseños con diferente demanda para cada caso de estudio.

En esencia, esta metodología se encarga de eliminar redundancia de redes cerradas y las convierte en redes abiertas, para luego generar las superficies óptimas de gradiente hidráulico al asignar inicialmente a cada nodo de la red, una altura hidráulica de presión óptima que garantice la presión mínima en todos los nudos. Posteriormente, se asigna a cada tubería un caudal óptimo teniendo en cuenta el concepto de conservación de masa en cada nodo, de tal manera que se obtenga una configuración que asegure el diseño con mínimo costo. Una vez se conocen preliminarmente las pérdidas de energía de cada nodo y el caudal de diseño, se utilizan ecuaciones de fricción para calcular los diámetros de las tuberías. Por último, se ejecuta un paso adicional de optimización de los diámetros para verificar que todos los nudos cumplan con la presión mínima.

Los diámetros obtenidos se agrupan por rangos para analizar su variación porcentual entre cada diseño, correspondiente a la relación entre el número de tuberías pertenecientes a cada grupo de diámetros y el número total de tuberías. Similarmente, con las superficies de gradiente hidráulico de cada diseño resultantes de los pasos anteriores, se evalúa la forma en cómo varían las presiones a medida que incrementan los diámetros y las tasas de flujo.

Análisis, ubicación y verificación de los índices de clasificación de las redes. La hidráulica de la red se verifica no sólo a través de las superficies de presión y diámetros obtenidos durante la fase anterior, sino también mediante el cálculo de los índices de confiabilidad y eficiencia energética los cuales buscan evaluar el impacto y la respuesta de cada RDAP ante daños hidráulicos y mecánicos. Dentro de los índices a analizar, se encuentra el Índice de Resiliencia (IR) (Todini, 2000), el Índice de Resiliencia Modificado (IRM) (Jayaram et al., 2008) el Índice de Resiliencia Centralizado (IMRC) (Páez et al., 2017) y el Índice de Potencia Específica (P_{PC}) (Saldarriaga, 2010).

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i (H_i - H_i^{(req)})}{\sum_{k=1}^{n_r} D_{out,k} H_k + \sum_{j=1}^{m_p} P_j / \gamma - \sum_{i=1}^{n_n} D_i H_i^{(req)}} \quad [1]$$

$$MRI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i (H_i - H_i^{(req)})}{\sum_{i=1}^{n_n} D_i H_i^{(req)}} \quad [2]$$

$$CMRI = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} D_i P_i}{\sum_{i=1}^{n_n} D_i p_{min}} - 1 \quad [3]$$

$$P_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} q_i (h_i - Z_{min})}{\sum_{i=1}^{n_e} Q_i (H_i - Z_{min})} * 100 \quad [4]$$

donde D_i es la demanda en el nodo i , H_i es altura de presión calculada en el nodo i , $H_i^{(req)}$ es la altura de presión objetivo en el nodo i , $D_{out,k}$ es el flujo de salida del reservorio k , H_k es la altura de presión del reservorio k , P_j es la potencia de la bomba j , γ es el peso específico del agua, n_n es el número de nudos de

demanda y n_R es el número de reservorios o fuentes de abastecimiento de agua.

De la misma forma, se crean cuatro índices que son introducidos como centroides geométricos, los cuales evalúan los parámetros de Volumen, Potencia Específica, Potencia y Diámetro para cada uno de los casos de estudio que se analizan, de acuerdo con las ecuaciones [5] a [9]. Como resultado se obtienen las coordenadas de los centroides calculados y su respectiva localización en los planos de cada red, por lo que es posible evaluar los cambios en términos de la distancia entre sí.

$$C_V = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} V_i * D_{ist\ i}}{V_T} \quad [5]$$

$$C_{P_s} = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} P_{Si} * D_{ist\ i}}{P_{ST}} \quad [6]$$

$$C_d = \frac{\sum_{i=1}^{n_t} d_i * D_{ist\ i}}{\sum_{i=1}^{n_t} d_i} \quad [7]$$

$$C_P = \frac{\sum_{i=1}^{n_n} Q_D * h_i * D_{ist\ i}}{\sum_{i=1}^{n_n} Q_D * h_i} \quad [8]$$

$$P_{Si} = q_i(h_{i,ini} - h_{i,fin}) \quad [9]$$

Donde V_i es el volumen de la tubería i , V_T es el volumen total, P_{Si} es la energía específica en la tubería i calculada con la ecuación [9] donde q_i es el caudal en la tubería i y $(h_{i,ini}, h_{i,fin})$ son las alturas piezométricas en los nudos inicial y final en la tubería i , respectivamente; P_{ST} es la energía específica, d_i es el diámetro de la tubería i ; Q_D el caudal demandado en el nodo i ; h_i es la altura piezométrica en el nodo i ; n_t es el número de tuberías y n_n es el número de nudos de demanda. Para las ecuaciones [5] a [8], se tiene que $D_{ist\ i}$ hace referencia al centroide de la tubería i para la coordenada $[X, Y]$, respectivamente.

$$Dist_{(x_i)} = \frac{|C_{x_{ini}} - C_{x_{fin}}|}{2} + \min(C_{x_{ini}}, C_{x_{fin}}) \quad [10]$$

$$Dist_{(y_i)} = \frac{|C_{y_{ini}} - C_{y_{fin}}|}{2} + \min(C_{y_{ini}}, C_{y_{fin}}) \quad [11]$$

Por otro lado, utilizando el programa REDES, se propone un análisis tanto en la concentración de cloro inicial en los tanques de abastecimiento, como la edad del agua en la red, con el propósito de determinar los efectos que sufre la calidad del agua cauda del crecimiento poblacional. Adicionalmente se establecen los efectos sobre el costo de transportar un metro cúbico por cada caso de estudio, cuyo cálculo se realiza mediante la adaptación de la función de costos para sistemas de distribución de agua potable en Colombia propuesta por Peinado et al. (2016).

Por último, siguiendo la metodología expuesta por Diao et al. (2017), se formulan dos dimensiones fractales (Fractalidad 1 – F_1 – y Fractalidad 2 – F_2 –) en cada uno de los escenarios de los casos de estudio para estudiar la variación porcentual en la fractalidad entre la dimensión mayor y menor obtenidas de los diseños de una misma red, que están relacionados con el incremento en su masa dados los cambios en la densidad poblacional.

Resultados

Los resultados obtenidos muestran que los incrementos en la densidad poblacional no necesariamente conllevan a variaciones significativas en los parámetros geométricos de estudio; que los

indicadores de confiabilidad y eficiencia de energía permanecen, prácticamente, constantes y que la variación en los diámetros no es uniforme para todas las secciones de las tuberías del sistema. Adicionalmente, se evidencia un aumento en la concentración inicial de cloro requerida en el tanque de almacenamiento y una disminución tanto en la edad del agua, como en el costo por metro cúbico movido, lo que significa que resulta más barato mover más volumen de agua en redes más densas que menos volumen de agua en redes largas. Finalmente, la fractalidad de las redes no se ve afectada por el incremento en la densidad poblacional.

Conclusiones

La metodología de análisis empleada indica una relación de independencia entre los cambios topológicos de las RDAP y la densidad poblacional, al momento de evaluar la localización de los centroides geométricos a lo largo del plano de cada red. Ante los incrementos dados en la densificación poblacional, se evidencian pocas variaciones tanto en los índices de confiabilidad y eficiencia energética, como en la energía disponible que garantiza el suministro del servicio de agua, debido a la metodología de diseño utilizada. No obstante, parámetros como el diámetro de las tuberías de la red matriz, la presión en los nudos cerca al tanque de abastecimiento, la concentración inicial de cloro en el tanque y la edad del agua en la red, sí muestran cierta dependencia ante los cambios propuestos.

Referencias

- CIACUA. (2006). "REDES software". Bogotá D.C., Colombia: Universidad de los Andes.
- Diao, K., Butler, D., & Ulanicki, B. (2017). "Fractality in water distribution networks". *Computing and Control for the Water Industry*, Sheffield, September. Web URL: <http://doi.org/https://doi.org/10.15131/shef.data.5364151.v1>
- Jayaram, N., & Srinivasan, K. (2008). "Performance-based optimal design and rehabilitation of water distribution networks using life cycle costing". *Water Resources Research*, 44(1), 1–15. Web URL: <http://doi.org/10.1029/2006WR005316>
- Juan, S., Susana, O., Mario, M., Natalia, R., & Óscar, C. (2010). "Prioritized Renewal of Water Distribution Networks Using Unitary Power Concept". *Revista de Ingeniería*, (31), 7. Web URL: <https://login.ezproxy.net.ucf.edu/login?auth=shibb&url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S0121.49932010000100002&site=eds-live&scope=site>
- Paez, D., & Filion, Y. (2017). "Generation and Validation of Synthetic WDS Case Studies Using Graph Theory and Reliability Indexes". *Procedia Engineering*, 186, 143–151. Web URL: <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.220>
- Peinado, C. D., & Saldarriaga, J. (2016). "Ecuaciones de costo para el diseño optimizado de redes de agua potable y alcantarillado" (Tesis de maestría no publicada). Universidad de los Andes. Bogotá.
- Saldarriaga, J., Lopez, L., Paez, D., Luna, D., & González, S. (2017). "Optimized Design of Water Distribution Networks (Software REDES)". *XV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua Y Drenaje, SEREA2017*.
- Saldarriaga, J., Páez, D., León, N., & Cuero, P. (2012). "Optimal power use surface for design of water distribution systems". *14th Water Distribution Systems Analysis Conference*, 468–480, Adelaide.
- Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach". *Urban Water*, 2(2), 115–122. Web URL: [http://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00049-2](http://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00049-2)