

OPTIMIZACION OPERACIONAL DE REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE CON EL FIN DE MAXIMIZAR LA UNIFORMIDAD DE PRESIONES EN UNA RED DE AGUA POTABLE

Diego Alejandro Araque Fuentes.
Ingeniero Civil

Investigador Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA,
Universidad de los Andes, Cr. 1No. 18ª-10 Ing. Civil, Bogotá-Colombia.
email: d-araque@uniandes.edu.co

Juan Guillermo Saldarriaga
Ingeniero Civil, MSc Ingeniería Hidráulica

Profesor Titular Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA, Universidad de los Andes, Bogotá. email : jsaldarr@uniandes.edu.co.

Resumen: Al uniformizar el estado de presión en toda la red de distribución de agua potable, se está aumentando el grado de confiabilidad de la misma desde el punto de vista hidráulico, debido a que se maximiza la conservación de energía de entrada y disipada por el sistema. Lo anterior lleva a minimizar el nivel de fugas y a retardar los procesos de renovación de tuberías.

Las pérdidas internas de presión disminuyen la confiabilidad del sistema de distribución de agua potable. El incremento en las pérdidas durante las condiciones de falla puede ser conocido si la potencia por unidad de peso disponible para ser disipada por el sistema excede la que realmente disipa el mismo. Basado en esta premisa se define el Índice de Resiliencia de la red (Todini 2004). Este índice de comportamiento es una herramienta que prioriza el reemplazo de las tuberías en la red.

En el presente trabajo se mostrará que con el desarrollo de un algoritmo determinístico se logrará uniformizar el estado de presiones de servicio en una red de distribución. Al maximizar el Índice de Resiliencia se mejora la habilidad del sistema de distribución para enfrentar eventuales fallas en el mismo.

Palabras claves: Optimización, Resiliencia, Redes de Distribución.

1. Introducción

El mantenimiento de redes de distribución de agua potable consiste típicamente en la rehabilitación, reparación y renovación del sistema de tuberías que lo componen. La mayoría de las políticas de mantenimiento combinan el desarrollo de la técnica de

soporte de decisión a partir del reemplazo de líneas de tubería adecuadas basadas en el juicio técnico bajo el buen conocimiento hidráulico del sistema.

Para mejorar la confiabilidad del sistema, el problema se formula de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar } f(i) = 1 - \text{Beneficio}(i) = \text{Perjuicio}(i);$$

donde Beneficio (i) es el beneficio obtenido al implementar la metodología en la configuración i y f (i) es una función que depende de la configuración del sistema de distribución de agua potable. Al final, mediante ésta metodología se busca el punto óptimo de rehabilitación, el cual corresponde al momento a partir del cual al maximizar f (i) no se logra aumentar el beneficio de manera significativa.

El beneficio es una medida del mejoramiento del nivel de servicio experimentado por los consumidores, el cual es explicado también por el Índice de Resiliencia.

2. Indicadores de Comportamiento para la Optimización de Redes de Acueducto con el Fin de Uniformizar el Estado de Presiones.

El comportamiento de cualquier sistema en ingeniería en términos de sus cargas y la resistencia puede analizarse de la siguiente manera. Si $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ es el vector de las variables aleatorias que influyen la carga (L) y/o la resistencia (R) del sistema, la función de comportamiento, $G(X)$, es expresada como sigue, Ecuación 1:

$$G(X) = R - L \text{ Ecuación 1}$$

La superficie de falla (estado límite), donde $G = 0$, separa todas las combinaciones de X existentes en el dominio de falla de las presentes en el dominio de supervivencia.

El nivel de confiabilidad en el nodo i de la red de distribución de agua potable es evaluado de la siguiente manera, Ecuación 2 :

$$G_i(X) = H_i(X) - H_i^{\min} \text{ Ecuación 2}$$

donde $H_i(X)$ es la presión modelada en el nodo i como función del vector de la capacidad hidráulica en las tuberías, X, y H_i^{\min} es la presión mínima permitida en el nodo i. Por lo tanto para evaluar la confiabilidad en cada uno de los nodos de la red de distribución, se debe especificar la función de comportamiento, para cada nodo y mediante el seguimiento de una metodología, encontrar las combinaciones existentes en el dominio de supervivencia.

A partir de la definición de confiabilidad en el nodo i de la red de distribución, es necesario plantear una medida de confiabilidad para todo el sistema de distribución. Lo que se busca con la metodología de optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones es minimizar la función de comportamiento en cada nodo de la red de distribución, Ecuación 3:

$$G_i(X) = \min[H_i(X) - H_i^{\min}] \text{ Ecuación 3}$$

Lo anterior, como se verá más adelante, se logra al maximizar el Índice de Resiliencia (I_r) y el Coeficiente de Uniformidad (CU) al mismo tiempo que se minimiza la Desviación Estándar (DESV) del estado de presiones en los nodos de consumo.

2.1. Índice de Resiliencia.

Las pérdidas internas de presión disminuyen la confiabilidad del sistema. El incremento en las pérdidas durante las condiciones de falla puede ser conocido si la potencia disponible para ser disipada por el sistema excede la que realmente disipa el mismo. Basado en esta premisa se define el índice de resiliencia. Todini (2000) propuso el siguiente índice de resiliencia, basado en el concepto que la potencia de entrada en una red es igual a la potencia perdida internamente por el sistema ocasionada por los efectos de la fricción más la potencia entregada en los nodos de demanda Ecuación 4.

$$P_{exp} = P_{int} + P_{out} \quad \text{Ecuación 4}$$

La potencia total de entrada incluye la potencia suministrada por una bomba más la suministrada por los embalses, Ecuación 5:

$$P_{inp} = \sum_{e=1}^{ne} Q_e H_e + \sum_{i=1}^{npu} P_i \quad \text{Ecuación 5}$$

donde Q_e y H_e son el caudal y la cabeza de entrada; ne : número de embalses; P_i : potencia por unidad de peso suministrada por la bomba i ; npu : número de bombas en la red. La potencia total de salida está dada por la Ecuación 6:

$$P_{out} = \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j \quad \text{Ecuación 6}$$

donde Q_j : demanda en el nodo j ; H_j : es la presión con la cual se satisface la demanda Q_j ; y nn : es el número de nodos de toda la red. Por lo tanto el índice de Resiliencia de la red se define en la Ecuación 7:

$$I_r = 1 - \frac{P_{int}}{P_{int}^{max}} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde P_{int} : es la potencia disipada por la red; y P_{int}^{max} : máxima potencia que puede ser disipada internamente por la red para garantizar la demanda Q y la presión mínima H^* requerida en cada uno de los nodos. Al sustituir los valores apropiados se encuentra Ecuación 8:

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{nn} Q_j (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{e=1}^{ne} Q_e H_e + \sum_{i=1}^{npu} P_i \right] - \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j^*} \quad \text{Ecuación 8}$$

2.2. Uniformidad de Presiones.

Al maximizar el Índice de Resiliencia, que representa la relación entre la energía disipada por el sistema actual con una configuración dada respecto a la energía óptima disipada, se logra uniformizar el estado de presiones. La definición de energía

óptima disipada hace parte del problema y busca la definición de que tanta energía se espera que el sistema de distribución de agua potable disipe en cada uno de los tubos que la conforman.

El índice utilizado para analizar el grado de uniformidad del estado de presiones en la red es el coeficiente de uniformidad, CU, Ecuación 9, el cual relaciona la presión sobre todos los nodos con la máxima presión de entrega encontrada.

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{nn} P_j}{nn * \max\{P_j\}} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde P_j es la presión de servicio en el nodo j .

2.3. Desviación Estándar.

La desviación es una medida estadística de las diferencias entre un conjunto de valores con el promedio del mismo. Estas diferencias pueden ser positivas, cuando el valor se encuentra por encima del promedio, y negativas, cuando el valor se encuentra por debajo del promedio. Por lo tanto, para efectos del proyecto, Ecuación 10, el procedimiento a desarrollar debe garantizar que en ningún momento se encuentren valores por debajo de la presión mínima de entrega permitida, en este caso H^* .

$$DESV = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{nn} (P_j - \bar{P})^2}{nn-1}} \quad \text{Ecuación 10}$$

2.4. Perjuicio hidráulico.

El perjuicio hidráulico es una medida relativa del Índice de Resiliencia para cada una de las configuraciones encontradas, el cual indica que la optimización del proceso de una a otra configuración va siendo cada vez menor a medida que se maximiza la conservación de energía. El perjuicio hidráulico se calcula a partir de la Ecuación 11.

$$\text{Perjuicio}(k) = PH(k) = 1 - \text{Beneficio}(k) = 1 - [I_r(k) - I_r(1)] \quad \text{Ecuación 11}$$

donde k representa el número de cambios realizados durante el proceso.

3. Soporte de Decisión para la Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones.

3.1. Algoritmo Determinístico.

Para resolver el problema, se tiene un conjunto de candidatos que constituyen el espacio solución, entre los cuales se encuentran aquellos que optimizan el proceso (minimizan ó maximiza si es el caso). El algoritmo determinístico se desarrolla paso a paso. Al inicio se tienen dos conjuntos, uno de candidatos considerados escogidos y el de candidatos considerados no escogidos, los cuales se encuentran vacíos. En cada paso se adiciona el mejor de los candidatos al primer conjunto y se van encontrando

aquellos que no solucionan de manera óptima el problema, los cuales pasan al segundo conjunto.

El proceso de identificación del candidato que debe considerarse y escogerse involucra la implementación de tres funciones. La primera, función de selección no objetiva, la segunda, función de factibilidad, y la tercera es una función de selección objetiva, la cual indica si el candidato que se está analizando, a partir del conjunto de candidatos restantes no considerados, optimiza el proceso de solución.

Al final se tiene un conjunto de candidatos que conforman la solución del problema y otro conjunto de candidatos no solución, entre los cuales se encuentra los que han sido considerados, pero no optimizan el proceso, y los que nunca han sido considerados.

3.2. Función de Selección no Objetiva.

La función de selección no objetiva, como su nombre lo indica, escoge dentro del conjunto de candidatos considerados, aquellos que han cumplido con la optimización del proceso y aquellos que no han sido considerados con anterioridad, a la tubería que maximice el Índice de Resiliencia de una configuración de sistema a otra, es decir a la tubería que al aumentar su diámetro al siguiente comercial genere el mayor I_r de todas las modificaciones. Esto no tiene en cuenta el nivel de uniformidad de presiones y el rango de presiones encontrado con la modificación considerada.

3.3. Función de Factibilidad.

Por razones técnicas y normativas, se han establecido reglas para el diseño de redes de distribución. La función de factibilidad es una función de castigo, la cual verifica que el aumento del diámetro en la tubería escogida en cada una de las configuraciones encontradas no supere el diámetro máximo establecido por la norma técnica de diseño. Sin embargo esta función no tiene en cuenta la optimización del proceso.

3.4 Función de Selección Objetiva.

El objetivo que se busca con el procedimiento es el de uniformizar el estado de presiones en toda la red de distribución, Esto se logra maximizando el Índice de Resiliencia, es decir al buscar que la energía disipada por el sistema sea igual a la energía disponible para disipar.

Las tuberías escogidas deben garantizar lo siguiente en cada una de las configuraciones encontradas:

1. $I_{r(k+1)} - I_{r(k)} > 0;$
2. $CU_{(k+1)} - CU_{(k)} > 0;$
3. $DESV_{(k)} - DESV_{(k+1)} > 0;$

Representando los subíndices k y $k+1$, las configuraciones anterior y siguiente respectivamente, encontradas durante el desarrollo del proceso.

4. Desarrollo del Algoritmo.

La red existente analizada en este proyecto corresponde al Sector 35 del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Bogotá D.C.; el cual se encuentra limitado al norte por la Calle 200, al sur por la Calle 170, al oriente por la Avenida 9 y al occidente por la Autopista Norte. La localización del Sector 35 se aprecia en la Figura 2 y la configuración de tuberías en la Figura 3.



Figura 1. Ubicación del Sector 35 en la Red Matriz de Bogotá D.C.

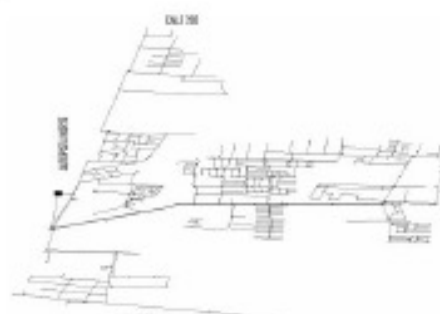


Figura 3. Distribución de tuberías de la red del Sector 35.

Los indicadores de comportamiento iniciales y en el punto óptimo de rehabilitación se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Indicadores de Comportamiento Iniciales para la red del Sector 35.

# CAMBIOS	I_p	CU	DESV (m)
0	0.919500143	0.97094772	2.054

Tabla 2. Indicadores de Comportamiento en el punto óptimo de rehabilitación.

# CAMBIOS	I_p	CU	DESV (m)
11	0.97777	0.98519	0.31789

El Plano Inicial de presiones y el Plano en el punto óptimo de rehabilitación, luego de aplicar la metodología, se muestran en las Figuras 3 y 4 respectivamente.

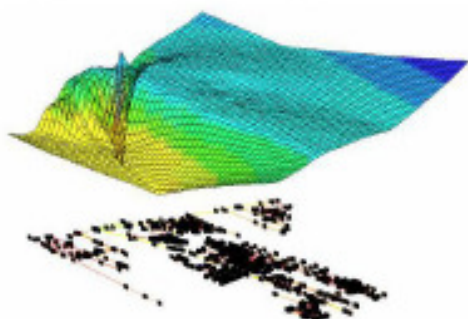


Figura 4. Plano óptimo de presiones inicial de la red del Sector 35.

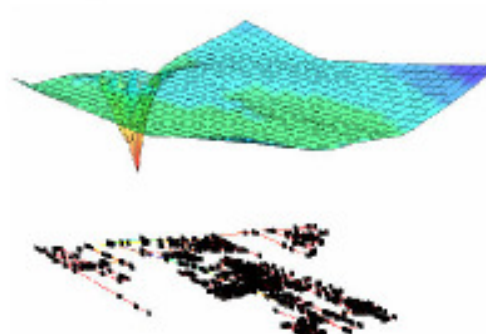


Figura 5. Plano óptimo de presiones de la red del Sector 35.

En la Figura 3 se observa una inclinación más pronunciada de este plano inicial de presiones, mientras que la Figura 5, correspondiente al punto óptimo de rehabilitación, el plano de presiones es más uniforme. Para el punto óptimo de rehabilitación la Desviación Estándar del estado de presiones disminuyó un 84.52%, el Coeficiente de Uniformidad aumento un 1.57% y se logró aumentar un 6.337% la conservación de la energía en la red del ejemplo de aplicación luego de aplicar la metodología.

La evolución de los índices se presenta en la Tabla 3 y el proceso de maximización del Índice de Resiliencia y el efecto sobre el Coeficiente de Uniformidad se puede observar en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

El Índice de Resiliencia tiene un comportamiento asintótico respecto a la rehabilitación de la red de distribución en el ejemplo de aplicación. El valor teórico del Índice de Resiliencia puede variar entre 0 y 1. Sin embargo, para sistemas reales de distribución, este valor nunca llega a ser 1.

Tabla 3. Evolución de la aplicación de la metodología a la red del Sector 35.

# CAMBIOS	%LONGITUD REHABILITADA	h	CU	DES _V (m)
0	0	0.9195	0.9709	2.0540
1	0.67688	0.9565	0.9768	0.7474
2	0.67688	0.9611	0.9797	0.6070
3	1.23248	0.9648	0.9806	0.5033
4	1.28054	0.9678	0.9812	0.4379
5	1.88862	0.9703	0.9829	0.4113
6	1.91936	0.9721	0.9833	0.3760
7	2.22158	0.9735	0.9842	0.3628
8	2.22158	0.9749	0.9851	0.3487
9	2.22158	0.9760	0.9854	0.3326
10	3.17594	0.9769	0.9860	0.3267
11	3.17594	0.9778	0.9862	0.3179
12	3.77173	0.9785	0.9864	0.3071
13	3.77173	0.9793	0.9869	0.2988
14	3.77173	0.9801	0.9874	0.2904
15	3.77173	0.9808	0.9879	0.2877
16	4.03654	0.9813	0.9883	0.2790
17	4.03654	0.9818	0.9886	0.2756
18	4.03654	0.9822	0.9889	0.2722
19	4.42804	0.9826	0.9892	0.2638
20	4.42804	0.9830	0.9893	0.2591
21	4.42804	0.9833	0.9894	0.2565
22	4.42804	0.9837	0.9894	0.2548
23	4.86084	0.9839	0.9896	0.2533
24	4.95495	0.9842	0.9898	0.2404
25	5.04694	0.9845	0.9900	0.2382
26	5.08934	0.9847	0.9902	0.2253
27	5.21031	0.9850	0.9904	0.2200
28	5.21031	0.9853	0.9904	0.2188
29	5.57704	0.9855	0.9905	0.2170
30	5.67971	0.9858	0.9907	0.2088
31	5.67971	0.9860	0.9909	0.2017
32	5.67971	0.9862	0.9910	0.2009
33	5.86657	0.9864	0.9911	0.1956
34	5.86657	0.9866	0.9913	0.1906
35	6.11368	0.9868	0.9914	0.1891
36	6.33783	0.9870	0.9915	0.1875
37	6.41504	0.9872	0.9916	0.1841
38	6.54716	0.9873	0.9917	0.1802
39	6.70058	0.9875	0.9918	0.1791

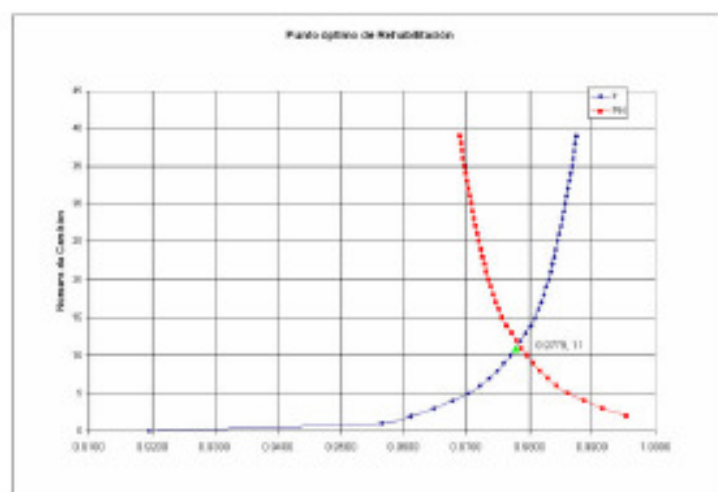


Figura 6. Evolución del Índice de Resiliencia y ubicación del punto óptimo de rehabilitación.

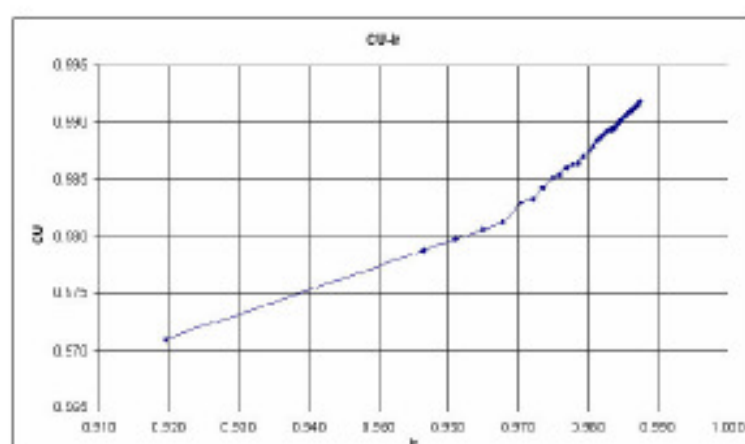


Figura 7. Relación entre la Uniformidad de Presiones y el Índice de Resiliencia.

5. Conclusiones

- La principal conclusión es la relación existente entre la conservación de la energía en toda la red y los indicadores de comportamiento enunciados. Es claro que al buscar que la energía disipada por el sistema, entendiéndola como el numerador de la Ecuación 8, sea igual a la energía disponible por disipar, denominador de la misma ecuación, se logra mejorar definitivamente el grado

de confiabilidad de la red para transportar el recurso bajo condiciones mínimas de presión, en los casos estudiados ésta cabeza de presión es de 15 M.C.A., y caudal de demanda.

- Se debe entender a la red de distribución de agua potable como un sistema al cual es entregado cierta cantidad de energía, en forma de caudal y presión de entrada. Esta energía debe ser igual a la entregada en cada uno de los nodos más la consumida por el sistema, siendo ésta última la que utiliza para lograr su funcionamiento. Esto debe lograrse de la forma más óptima, afectando la energía que consume el sistema durante el proceso, es decir la disipada por las tuberías en forma de fricción.
- El Índice Resiliencia es una medida combinada del efecto de la diferencia de potencias, disipada real y máxima disipada, con la uniformidad nodal del sistema.
- Al maximizar el Índice de Resiliencia del sistema de distribución de agua potable, se mejora la habilidad del sistema para enfrentar eventuales fallas en el mismo.
- Debido al sobre-diseño de las redes existentes de distribución, es necesario el desarrollo de un marco de referencia que pueda servir de guía para la rehabilitación de las mismas. En este proyecto se desarrolló un esquema de soporte de decisión para optimizar el nivel de uniformidad del estado de presiones en los nodos de consumo.
- El estado de presiones en los nodos de consumo afecta directamente la entrega del servicio, ya que al obtener presiones altas se está forzando al sistema, y por lo tanto a las tuberías, a trabajar bajo condiciones críticas desde el punto de vista mecánico, ocasionando la presencia de fugas y el desgaste del sistema en general.
- Al disminuir el nivel de energía de trabajo del sistema se logra mejorar la calidad del servicio y evitar la presencia de futuras fallas en el sistema.

6. Referencias Bibliográficas

- [i] *HIDRAULICA DE TUBERIAS* (1998), 1ª edn. Juan G. Saldarriaga. Primera Edición. Editorial Mc Graw Hill.
- [ii] Todini E. (2004). Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water resources Planning and Management*, vol, 130 No.1. ASCE, pp 73-82.
- [iii] *FUNDAMENTALS OF ALGORITHMICS*, 1ª edn. Gilles Brassard, Paul Bratley. Second Edition. Prentice-Hall, 1998.