

Dimensionado óptimo comparativo de red mallada de abasto usando herramientas ROKO y Lenhsnet

Carlos Martins Alves

Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Coro. Venezuela.

email: carlos.martins.a@gmail.com

RESUMEN

La optimización en el diseño de los sistemas de abastecimiento de agua potable ha avanzado a lo largo de los últimos años. Pese al avance mostrado, la complejidad de programación de estos algoritmos ha generado que estas técnicas no hayan permeado al campo práctico. Hasta la fecha el dimensionamiento de las redes de abastecimiento sigue siendo dependiente de la experiencia del proyectista. A nivel latinoamericano se han logrado identificar dos herramientas para el dimensionado óptimo, el ROKO elaborado por CIH de CUJAE en Cuba; y el Lenhsnet desarrollado por el Laboratorio de Eficiencia Energética de la UFPB de Brasil. El objetivo de esta investigación es realizar un análisis comparativo del dimensionado aportado por estas herramientas, con la finalidad de determinar cuál ofrece mejores resultados según los indicadores: costos de tuberías, costos energéticos y homogeneidad de la red.

Palabras clave: diseño óptimo, Lenhsnet, redes de abastecimiento, ROKO.

Optimal design comparison of a water supply looped network using ROKO and Lenhsnet

ABSTRACT

Optimizing the design of water supply networks systems has advanced over recent years. Despite this advance, the programming complexity of these algorithms has prevented these techniques from being settled in the practical field. To date, the design of supply networks remains dependent on the experience of the designer. Two tools have been identified in Latin America to find the optimal design: ROKO, elaborated by CIH of CUJAE in Cuba and Lenhsnet, developed by the Laboratory for Energy Efficiency of UFPB in Brazil. The objective of this research is a comparative analysis of the optimal design provided by these tools, in order to determine which one offers better results using several indicators: costs of pipelines, energy costs and homogeneity of the network.

Keywords: optimal design, Lenhsnet, water distribution networks, ROKO.

INTRODUCCIÓN

La optimización en el diseño de los sistemas de abastecimiento de agua potable ha avanzado a lo largo de los últimos cuarenta años. Hasta esa fecha el dimensionamiento de los diámetros a instalar era una cuestión de experiencia por parte del proyectista. Con el advenimiento de las técnicas de investigación de operaciones (IO) y la consolidación de los microprocesadores, surgen los primeros intentos por realizar el diseño óptimo (de más bajo costo) de sistemas de abastecimiento de agua.

El método de Programación Lineal del Gradiente (LPG) (Alperovits 1977) fue uno de los primeros en trascender, el cual fue corregido gracias a una propuesta de Quindry (1979). Esta metodología fue combinada posteriormente con otras técnicas como puede evidenciarse en los estudios de Kessler (1991) y Eiger (1994). Paralelamente a estos avances se dieron desarrollos aplicando otras técnicas de optimización como la Programación Dinámica (Soeiro 1984) y la Programación No Lineal (Mays 2000).

Recientemente los métodos estocásticos basados en algoritmos evolutivos han estado en la mira de los investigadores, los primeros trabajos los desarrolló Goldberg (1985), con la finalidad de optimizar el funcionamiento de varias estaciones de bombeo aplicando un algoritmo genético, pero es Dandy (1996) quien propone un algoritmo mejorado, que es aplicado al diseño óptimo de redes de distribución de agua potable.

A partir de esa fecha se da un avance acelerado en el desarrollo de nuevas técnicas con la presentación del algoritmo de Búsqueda Armónica (Geem 2002), la cual simula la armonía de las notas musicales en la música de Jazz; el algoritmo de optimización basado en Colonias de Hormigas y en la forma en que estas buscan alimento (Maier 2003), paralelamente también se desarrolla en esa misma época el algoritmo de Shuffled Frog Leaping (Eusuff 2003). Posteriormente se presenta el algoritmo de búsqueda Tabú (Sung 2007), agente swarm (Montalvo 2010) y evolución diferencial (Vasan 2010).

Pese a todo el avance mostrado, la complejidad de programación de estos algoritmos de forma que cubran una gran variedad de casos ha generado que estas técnicas no hayan permeado al campo práctico, resultando prácticamente nula la existencia de software que apoye el diseño óptimo de redes de abastecimiento.

A nivel latinoamericano y en función de la revisión hecha en esta materia, sólo se han logrado identificar dos herramientas, la primera es el ROKO, elaborado por el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la CUJAE en Cuba; y la segunda es el Lenhsnet, desarrollado por el Laboratorio de Eficiencia Energética e Hidráulica de la UFPB en Brasil.

El objetivo de esta investigación es realizar un análisis comparativo del dimensionado aportado por estas dos herramientas, con la finalidad de determinar cuál ofrece mejores resultados a partir de indicadores como: costos de tuberías, costos energéticos y homogeneidad de la red.

ROKO Y LENHSNET

Descripción General

ROKO es un sistema integrado de programas para el cálculo y diseño óptimo de redes hidráulicas urbanas, elaborado en el CIH del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE) de la Habana, Cuba (Chiong y Martínez 2000). Este software fue desarrollado en lenguaje Borland Pascal sobre DOS y está compuesto de dos módulos. El primero de ellos se llama ROCT, el cual calcula redes malladas de abastecimiento de agua formadas por tuberías circulares con flujo a presión, y que será evaluado en este trabajo. El segundo módulo llamado KOLEC calcula redes de alcantarillado sanitario y de drenaje pluvial formadas por tuberías circulares o rectangulares con flujo por gravedad con la limitante de ser redes abiertas.

Lenhsnet, por su parte, es una herramienta para el diseño óptimo que trabaja acoplada al software de modelación Epanet, fue desarrollada por el Dr. Heber Pimentel Gomes y otros colaboradores en el Laboratorio de Eficiencia Energética e Hidráulica de la Universidad Federal de Paraíba Joao Pessoa, en Paraíba, Brasil. Esta herramienta fue desarrollada en lenguaje Delphi 5, y trabaja con un algoritmo basado en un proceso de programación dinámica (Pimentel 2009).

Principios de Funcionamiento

El módulo ROCT calcula redes malladas de tuberías a presión cuando se conocen los diámetros y las demandas en los nodos. Además también optimiza redes malladas obteniendo los diámetros mínimos como resultado, en función de las restricciones de operación impuestas.

El procedimiento de optimización se da en dos pasos:

- En primer lugar se calcula la distribución de gastos con el criterio de minimizar $\sum (L * Q^2)$ en toda la red lo que genera un valor llamado Índice de Uniformidad de Gastos, que indica el grado homogeneidad en los gastos que circulan en todos los tramos de la red (Chiong y Martínez 2000). Se obtiene una distribución de gastos de mínima varianza, que es un criterio de máxima uniformidad (Martínez 2012).
- En segundo lugar se calculan los diámetros para conducir estos gastos de modo que se obtenga una red de costo mínimo total (inversión en tuberías y costos de energía); en este paso se emplea el método del cálculo diferencial con multiplicadores de Lagrange y el sistema resultante de ecuaciones (también no lineal) se resuelve igualmente por el método de Newton-Raphson. (Chiong y Martínez 2000).

Observado esto, ROCT no ofrece una red de costo mínimo matemático, ni una red con una distribución arbitraria de los gastos, sino que ofrece la red con la mejor distribución posible de los gastos que, además, para esos gastos, es de costo mínimo. (Chiong y Martínez 2000).

Lenhsnet ofrece 2 opciones de dimensionamiento: en la primera, la alimentación a la red es suministrada por un nivel piezométrico fijo. En este caso, el costo total del sistema corresponderá únicamente al costo de tuberías de red. En la segunda alternativa, el agua es directamente impulsada al sistema a un depósito elevado, a través de bombeo y el costo total del sistema se calcula a partir del coste total de la red de tuberías más el costo de energía requerido. En este

último caso, el nivel piezométrico de bombeo será una variable de decisión extra en el proceso de optimización.

La metodología de optimización en el diseño bajo la cual trabaja Lenhsnet incluye un proceso de iteración, basado en una solución inicial que tiene el costo mínimo de implementación de la red ya que se compone con diámetro mínimo en todas las tuberías (Pimentel 2009). Sin embargo, tal solución no es factible, ya que genera altas pérdidas de carga, que conducen a altos costos energéticos de bombeo.

Basándose en esa solución inicial, el proceso de cálculo se desarrolla iterativamente, en una forma en que cada solución consecuente dependa de la anterior. Las siguientes soluciones se obtendrán mediante el aumento, en cada iteración, del diámetro de una de las tuberías. El proceso iterativo finaliza cuando las configuraciones de los diámetros de la red cumplan con las restricciones impuestas por el proyectista, es decir, velocidades máximas y mínimas en las tuberías, presiones máximas y mínimas en los nodos (Pimentel 2009). El algoritmo de optimización se asocia con Epanet, para proporcionar en cada iteración, el cálculo hidráulico del sistema y de esta forma obtener los valores de gastos, velocidades, pérdidas de carga y presiones. Hallada la solución inicial y obtenidas las presiones, en todos los nodos, se detecta el nodo más desfavorable, y comienza el proceso de optimización (Pimentel 2009).

Para optimizar los diámetros de la red, se prueban varias configuraciones con distintos arreglos de diámetros. El cambio de diámetro para cada iteración estará definido por el costo más bajo de red adicional en relación con la disminución de la presión dada a la red y a esta relación de valores se le llama Gradiente del Costo. El cambio de diámetros en cada iteración será confirmado si el valor del Gradiente del Costo es menor que el valor del gradiente dado por la solución anterior.

En cada iteración habrá i gradientes de costos, lo que corresponde a las i configuraciones de los cambios de diámetro, en las i redes de tuberías, el valor óptimo del Gradiente del Costo será el valor más bajo entre todos los calculados (Pimentel 2009). Esta última configuración será la configuración de inicio de la iteración siguiente, el proceso de optimización sigue la metodología mencionada hasta que se obtiene la solución óptima.

RED DE PRUEBA

Datos iniciales

Para poner a prueba ambas herramientas se estableció una red típica para la cual se requerirá el optimizado de los diámetros en todos sus tramos. La red estará conformada por 12 tramos de tubería de 200 metros de longitud cada una, nueve nodos de extracción de gasto y será abastecida por un tanque elevado, el cual a su vez será alimentado por bombeo, según lo indicado en la Figura 1.

Para la estimación de las pérdidas de carga se seleccionó la ecuación de Williams y Hazen, y se tomó un coeficiente de rugosidad de C igual a 100. Para el optimizado de los diámetros se tomaron los costos y disponibilidad de tuberías indicados en la Tabla 1.

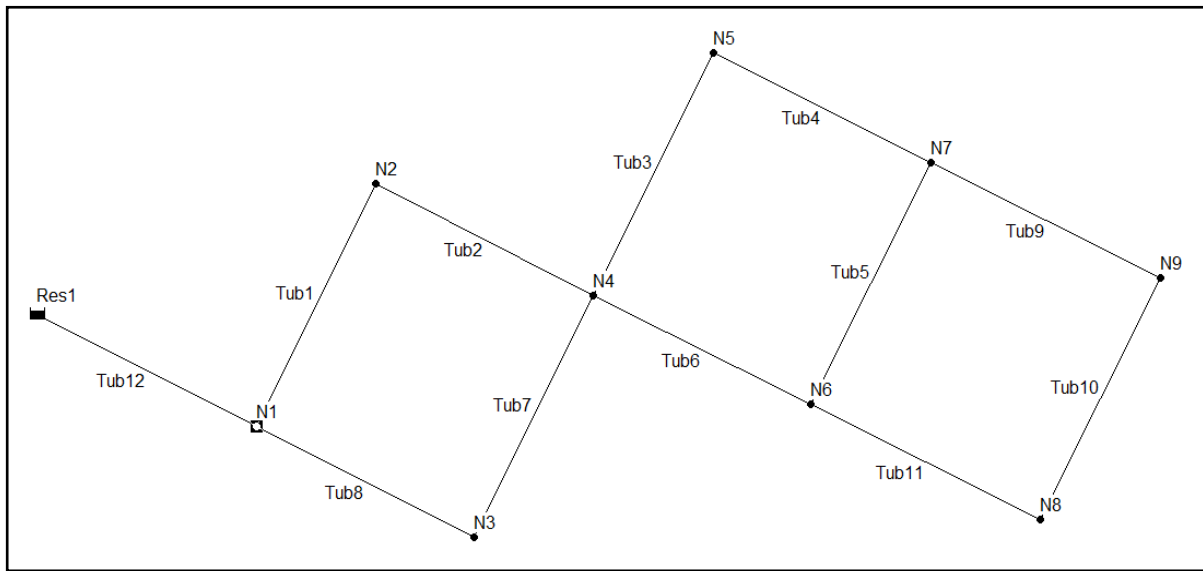


Figura 1. Red típica de prueba

Tabla 1. Surtido de diámetros (UM: unidades monetarias)

Diámetro (mm)	Rugosidad (C de Williams-Hazen)	Costo unitario (UM/m)
50	100	8,70
75	100	14,60
100	100	21,70
150	100	38,70
200	100	58,70
250	100	81,50
300	100	106,60
350	100	134,00
400	100	163,40
450	100	194,70
500	100	227,80

En los nodos de la red se fijó una demanda de 10 litros/seg, y se ubicaron todos sobre el mismo plano de elevación. Se estableció un periodo de bombeo de 24 horas diarias y se fijó un costo de 0,15 UM para el kW-h. Como limitante en el diseño, las presiones mínimas en los nodos no podrán ser inferiores a 30 metros de columna de agua.

Así mismo se estableció un factor de conversión de inversión total a costo anualizado total de 0,10. Esto representa aproximadamente una obra con una vida útil de 30 años con una tasa de interés anual de amortización de 10%.

Resultados de ROKO

En el sistema ROKO una vez incorporados todos los datos solicitados, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Diámetros propuestos por ROKO

Tubería	Nodo 1	Nodo 2	D (mm)	Q (l/s)	V (m/s)	hf (m)
1	1	2	250	40,00	0,82	0,93
2	2	4	250	30,00	0,61	0,55
3	4	5	200	20,47	0,65	0,80
4	5	7	200	10,47	0,33	0,23
5	6	7	150	7,45	0,42	0,50
6	4	6	250	29,53	0,60	0,53
7	3	4	250	30,00	0,61	0,55
8	1	3	250	40,00	0,82	0,93
9	7	9	200	7,93	0,25	0,14
10	8	9	100	2,07	0,26	0,34
11	6	8	200	12,07	0,38	0,30
12	Res 1	1	350	90,00	0,94	0,81

Tabla 3. Presiones de servicio en los nodos

Nodo	Q (l/s)	Cota (m)	Cota Piezom. (m)
1	10	0	32,64
2	10	0	31,71
3	10	0	31,71
4	10	0	31,17
5	10	0	30,37
6	10	0	30,64
7	10	0	30,14
8	10	0	30,34
9	10	0	30,00
Res 1	-90	0	33,46

Tabla 4. Cuadro resumen de diámetros propuestos por ROKO

Diámetro (mm)	Long. (m)	Costo (UM)
100	200	4340
150	200	7740
200	800	46960
250	1000	81500
350	200	26800

Para el arreglo de diámetros antes mencionado se obtiene que el costo total de inversión en tuberías es de 167 340 UM y el costo de inversión anualizado es de 16 734 UM/año, así mismo el costo por consumo anual de energía es de 38 818 UM/año, generando esta propuesta un Costo Anualizado Total de 55 552 UM/año.

Resultados de Lenhsnet

El sistema Lenhsnet propone un arreglo de diámetros diferente, según puede evidenciarse en las tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5. Diámetros propuestos por Lenhsnet

Tubería	Nodo 1	Nodo 2	D (mm)	Q (l/s)	V (m/s)	hf (m)
1	1	2	350	69,84	0,73	0,51
2	2	4	350	59,84	0,62	0,38
3	4	5	150	9,42	0,53	0,77
4	5	7	75	0,58	0,13	0,13
5	6	7	200	10,84	0,35	0,25
6	4	6	300	40,58	0,57	0,39
7	3	4	100	0,16	0,02	0,01
8	1	3	150	10,16	0,57	0,89
9	7	9	50	0,26	0,13	0,21
10	8	9	200	9,74	0,31	0,20
11	6	8	250	19,74	0,40	0,25
12	Res 1	1	400	90,00	0,72	0,42

Tabla 6. Presiones de servicio en los nodos

Nodo	Q (l/s)	Cota (m)	Cota Piezom. (m)
1	10	0	31,74
2	10	0	31,23
3	10	0	30,85
4	10	0	30,85
5	10	0	30,08
6	10	0	30,46
7	10	0	30,21
8	10	0	30,20
9	10	0	30,00
Tan	-90	0	32,16

La solución propuesta por Lenhsnet tiene un costo total de inversión en tuberías de 171 860 UM, con un costo de inversión anualizado de 17 186 UM/año. El costo de consumo de energía anual será de 37 310 UM/año (sin tomar en cuenta la eficiencia del equipo de bombeo y

manteniendo fija en el tiempo la tarifa de energía eléctrica, al igual que en ROKO), teniendo esta propuesta un Costo Anualizado Total de 54 496 UM/año.

Tabla 7. Cuadro resumen de diámetros propuestos por Lenhsnet

Diámetro (mm)	Longitud (m)	Costo (UM)
50	200	1740
75	200	2920
100	200	4340
150	400	15480
200	400	23480
250	200	16300
300	200	21320
350	400	53600
400	200	32680

Discusión de Resultados

Desde el punto de vista de implantación de tuberías el ROKO ofrece una alternativa más económica en un 2,63%, pero cuando se incorporan los gastos energéticos al costo total de la solución para llenar el tanque de almacenamiento a la altura requerida para cumplir con las presiones mínimas en la red, se puede apreciar que la alternativa propuesta por el Lenhsnet pasa a ser más económica en un 1,91%. Sin embargo se puede constatar que ROKO plantea una red más uniforme empleando únicamente 5 diámetros, mientras que Lenhsnet emplea 9 diámetros.

La uniformidad anteriormente planteada también tiene incidencia en el comportamiento de la red ante las roturas que se puedan presentar y cómo pueden afectar el funcionamiento. Para ello, se modelaron nuevamente las redes en Epanet cerrando un tramo a la vez, de manera de simular una falla en dicha tubería con la finalidad de verificar cómo se alteraban las presiones de servicio en cada uno de los nodos, obteniéndose lo siguiente:

Si se da una rotura en la tubería 1, la red propuesta por Lenhsnet no puede suplir las demandas requeridas en los nodos, tal como se evidencia a través de los valores de presión residual resultante en dichos nodos, de acuerdo con lo mostrado en la figura 2; mientras que si la interrupción se presenta por una rotura en la tubería 8, se garantiza el gasto en los restantes nodos de la red, con una presión mínima de servicio en el nodo más desfavorable de 24,38 metros de columna de agua (ver figura 3).

También se pudo constatar que si se dan interrupciones por roturas (cada una por separado) en las tuberías 2, 6, 10 y 11, tampoco se podrán suplir las demandas en algunos de los nodos de la red.

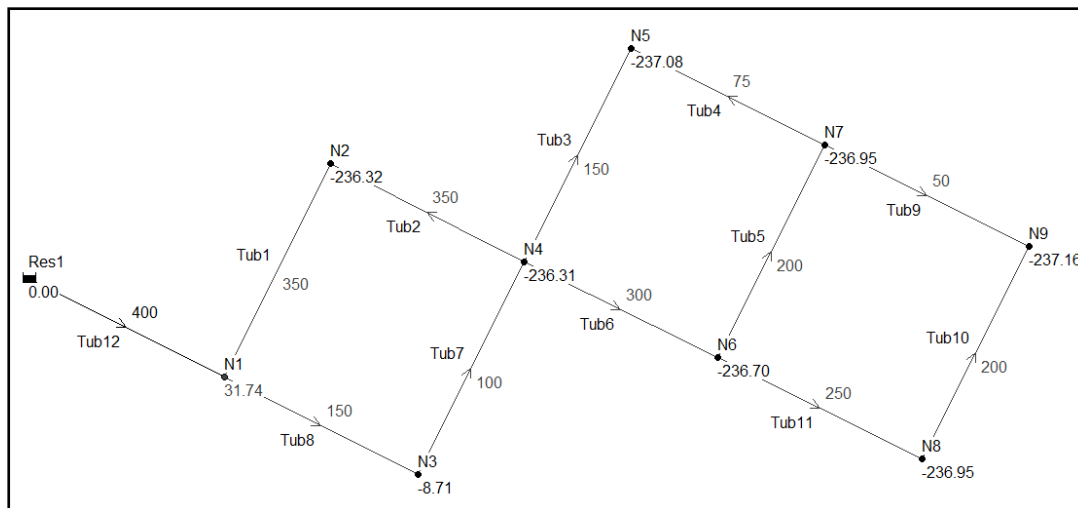


Figura 2. Red propuesta por Lenhsnet con Tubería 1 fuera de servicio

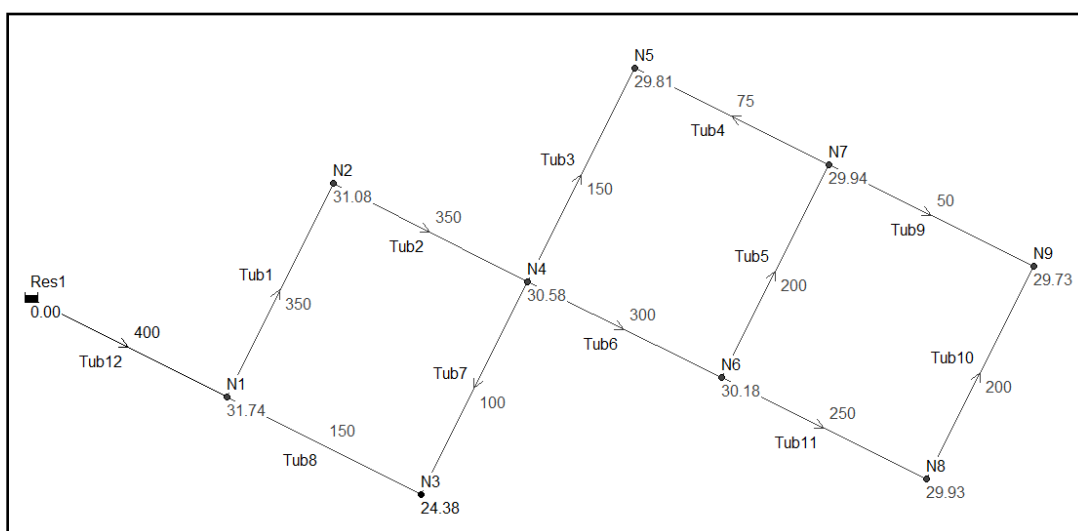


Figura 3. Red propuesta por Lenhsnet con Tubería 8 fuera de servicio

En cuanto a la red propuesta por ROKO, una vez modelada en Epanet, simulando roturas en cada uno de sus tramos por vez se pudo obtener que para una interrupción dada por rotura en la tubería 1 o en la 8, la red propuesta puede suplir las demandas con una presión mínima de servicio en el nodo más desfavorable de 25,50 metros de columna de agua (ver figura 4), la cual es mayor que la presión de servicio dada en la misma situación en la red propuesta por Lenhsnet.

Simulando interrupciones en cada uno de los restantes tramos en la red propuesta por ROKO, se pudo constatar que siempre se garantiza satisfacer las demandas en todos los nodos y solo es en el caso de una falla en la tubería 6 donde se presenta la presión más baja de servicio en el nodo más desfavorable, alcanzando esta un valor de 22,29 metros de columna de agua.

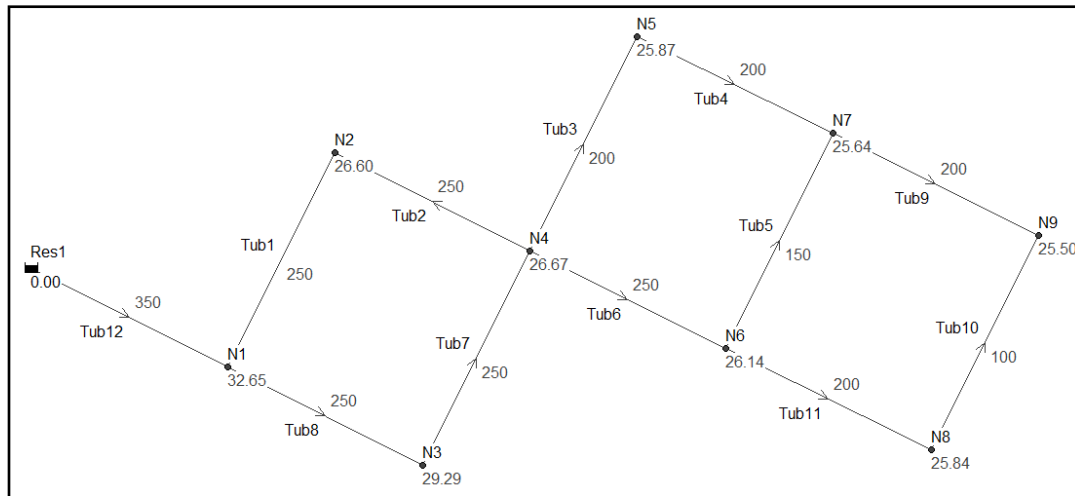


Figura 4. Red propuesta por ROKO con Tubería 1 fuera de servicio

CONCLUSIONES

Puede apreciarse que ante la red de prueba los resultados presentados por ambas herramientas fueron diferentes. Si bien es cierto que la alternativa propuesta por Lenhsnet resulta ser la más económica desde el punto estrictamente matemático, también se debe reconocer que la diferencia a nivel de costos con la propuesta con el ROKO es de apenas un 1,91%, lo cual es prácticamente despreciable.

Por otro lado, la red propuesta por ROKO parte del principio de la homogeneidad, lo cual hace que la distribución de los gastos que circulan en los tramos tengan la varianza más baja posible, generando esto que la red sea más fiable en su comportamiento ante la ocurrencia de roturas.

En el proceso de optimización de redes debe hallarse la solución más económica, pero esta también deberá ser la más adecuada desde el punto de vista operativo, constructivo y que aporte mayor fiabilidad bajo diversas condiciones de funcionamiento.

REFERENCIAS

- Alperovits E., and Shamir U.** (1977). "Design of optimal water distribution systems." *Water Resources Research*, 13-6: 885-900.
- Chiong C. y Martinez, J.B.** (2000). "Manual de usuario del sistema ROKO". CIH, ISPJAE, Habana, Cuba.
- Dandy G., Simpson A., and Murphy L.** (1996). "An improved genetic algorithm for pipe network optimization". *Water Resources Research*, 32-2: 449-458.
- Eiger G., Shamir U., and Ben-Tal A.** (1994). "Optimal design of water distribution networks". *Water Resources Research*, 30-9: 2637-2646.

- Eusuff M., and Lansey K.** (2003). "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm". *J. Water Resources Plng. and Mgmt.*, 129-3: 210-225.
- Geem Z., Kim J., and Loganathan G.** (2002). "Application of harmony search algorithm to water resources problems". Conference of the Environmental and Water Resources Institute of ASCE, ASCE, Roanoke, USA.
- Goldberg D., and Chie H.** (1985). "Genetic algorithms in pipeline optimization". Pipeline simulation interest group (PSIG) annual meeting, Albuquerque, New Mexico: 1-17.
- Kessler A., and Shamir U.** (1991). "Decomposition technique for optimal design of water supply networks". *Engineering Optimization*, vol. 17: 1-19.
- Maier H., Simpson A., Zecchin A., Foong W., Phang K., Seah H., and Tan C.** (2003). "Ant colony optimization for design of water distribution systems". *J. Water Resources Plng. and Mgmt.*, 129-3: 200-209.
- Martínez J.B.** (2012). "La economía de las redes cerradas de abasto (1ª parte)". *Ing. Hidráulica y Ambiental*, 33-1: 37-55, CIH, CUJAE, Cuba.
- Mays L.** (2000). "Manual de Sistemas de Distribucion de Agua". McGraw-Hill, Madrid, España.
- Montalvo I., Izquierdo J., Schwarze S., and Perez-Garcia R.** (2010). Agent swarm optimization: a paradigm to tackle complex problems. Application to water distribution system design. International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake, Fifth Biennial Meeting. Ottawa, Canada. International Environmental Modelling and Software Society.
- Pimentel H., Marques S., Oliveira P., and Menezes M.** (2009). "Optimal dimensioning model of water distribution systems". *Water SA*, 35-4: 421-431.
- Quindry G., Brill Jr., Liebman J., and Robinson A.** (1979). "Comment on design of optimal water distribution systems, by E. Alperovits and U. Shamir". *Water Resources Research*, 15-6: 1651-1654.
- Soeiro J., and Valqui R.** (1984). "Optimization of a pump-pipe system by dynamic programming". *Engineering Optimization*, vol. 7: 241-251.
- Sung Y., Lin M., Lin Y., and Liu Y.** (2007). "Tabu search solution of water distribution network optimization." *J. Environ. Eng. Manage*, 17-3: 177-187.
- Vasan A., and Simonovic S.** (2010). "Optimization of water distribution network design using differential evolution". *J. Water Resources Plng. and Mgmt.*, 136-2: 279-287.