Modelación de Válvulas en el Método del Gradiente

Juan Saldarriaga
Ingeniero Civil, Máster en Ingeniería Hidráulica
Profesor Titular, Universidad de los Andes. Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: jsaldarr@uniandes.edu.co

Carolina Vega
Ingeniera Civil. Máster en Ingeniería de Sistemas y Computación.
Investigadora, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA). E-mail: m.vega222@egresados.uniandes.edu.co

XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Bogotá, D.C. 22, 23 y 24 de mayo de 2008

Resumen. El programa REDES permite simular el comportamiento hidráulico de una red de distribución de agua potable, a través de cálculos realizados con ecuaciones físicamente basadas y con el método del gradiente; sin embargo, la presencia de accesorios, tales como válvulas, hacen que dicho comportamiento cambie respecto a la red original. En el presente trabajo se investigó la forma de incluir la modelación de válvulas, modificando los valores de los coeficientes de la ecuación de pérdidas definida por el método del gradiente, de forma que el proceso de cálculo no se vea afectado y las iteraciones se mantengan en un rango similar.

Palabras Clave. Válvulas, método del gradiente, programa REDES.

1 Introducción

Actualmente, las redes de distribución de agua potable no están compuestas solamente por embalses, tubos y nodos; existe una gran variedad de accesorios que se utilizan para darle un mejor funcionamiento a la red. Con la propagación del uso de computadores como herramientas para la ingeniería, se hizo indispensable contar con software que facilitara el cálculo y control de redes de distribución; en este contexto nació el programa REDES, el cual permite simular el funcionamiento de estos sistemas. Hasta la fecha, este programa ofrece hacer cálculos hidráulicos, de calidad del agua y de diseño para redes de distribución de agua potable compuestos por uniones (embalses y nodos) y tuberías.

Este proyecto pretende incluir dentro del programa REDES, algunas de las válvulas que utilizan hoy las redes de distribución de agua potable, de manera que puedan modelarse para efectuar cálculos hidráulicos y de calidad del agua. Las válvulas que se modelan en este proyecto son: válvulas reguladoras de presión, válvulas reductoras de presión, válvulas de control de caudal, válvulas de propósito general, válvulas de regulación de cierre y válvulas de cheque.

La modelación de los accesorios mencionados se hace por medio del método del gradiente, modificando algunos coeficientes de la ecuación que usa este método para relacionar alturas piezométricas y caudales.

2 Método del gradiente para el cálculo de redes de distribución de agua potable

El método del gradiente realiza el análisis de redes de distribución de agua potable de forma eficiente, ya que en cada iteración corrige las alturas piezométricas de los nodos y los caudales de las tuberías simultáneamente.

Las pérdidas a lo largo de una tubería de la red son tratadas de forma genérica en el método del gradiente mediante la ecuación 1. El exponente n depende de la ecuación para calcular pérdidas por fricción que se utilice a lo largo del proceso (Hazen – Williams o Darcy – Wiesbach). Los coeficientes α, β y γ dependen de parámetros característicos del tubo y sus accesorios. En esta investigación se utiliza la ecuación de Darcy – Weissbach (ecuación 2), debido a que es físicamente basada y permite realizar los cálculos de manera precisa sin tener restricciones sobre las variables de entrada. Para este caso, el valor n en la ecuación genérica de pérdidas es 2.

$$H = \alpha Q_i^n + \beta Q + \gamma \qquad [1]$$

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \qquad [2]$$

El método está basado en el hecho que en la red tiene flujo permanente, lo que implica que existe conservación de masa y energía a lo largo de toda la misma. Definiendo una serie de variables y matrices que contienen las características de la red, y aplicando las leyes de conservación, se obtienen dos

ecuaciones con las que se puede realizar el cálculo hidráulico de la red de manera iterativa. Existen dos matrices que son afectadas por la ecuación genérica de pérdidas del método y que, por lo tanto, se verán afectadas al incluir la modelación de las válvulas. Estas matrices, son la matriz A11 y la matriz A11', las cuales son matrices cuadradas diagonales de tamaño NT X NT, (NT es el número de tubos), y cuyo valor en la diagonal se calcula con la ecuación 3 y la ecuación 4, respectivamente.

$$A11_{(i,i)} = \alpha Q_i^{n-1} + \beta + \frac{\gamma}{Q_i} \quad [3]$$

$$A11'_{(i,i)} = \alpha Q_i^{n-1} \quad [4]$$

Es posible observar que cambiando los valores de los coeficientes α, β y γ según los requerimientos de cada válvula, se modifica el cálculo hidráulico de la red de manera automáticamente, puesto que éstos están incluidos en las matrices utilizadas por el método del gradiente. Se puede encontrar mayor información sobre el método del gradiente en la primera referencia de la bibliografía.

3 Modelación de válvulas

Las válvulas de una red de distribución de agua potable tienen como objetivo modificar el comportamiento hidráulico de la red, ya sea para controlar la presión, el caudal o la dirección de flujo. Existen tipos de válvulas cuyo uso es más extendido que el de otras, como las de cheque y las reguladoras de presión. En este trabajo, además de modelar éstas válvulas, se modelan otras 4 válvulas ampliamente utilizadas.

3.1 Válvula reguladora de presión

El propósito de una válvula reguladora de presión (VRP) es entregar una presión especificada aguas abajo de sí misma. Esto es posible únicamente si la presión a la entrada de la válvula es mayor o igual a dicha presión objetivo. Teniendo en cuenta esta condición, este tipo de válvula puede funcionar en tres estados diferentes: totalmente cerrada, totalmente abierta o parcialmente abierta. El estado depende de las condiciones de flujo en la válvula (presiones en los nodos que conecta y el sentido del flujo), y la presión y la dirección de flujo deseados para la misma.

Si el sentido del flujo es contrario al deseado, la válvula se cierra y no permite que circule caudal (Figura 1). Si, por el contrario, el sentido de flujo es el deseado y la presión aguas arriba de la válvula es mayor a la presión objetivo, la válvula produce unas pérdidas tales que aguas abajo la presión alcanza el valor objetivo (Figura 2). Por último, si la presión aguas arriba de la válvula es menor a la presión objetivo, la válvula se abre y no produce pérdidas de manera que, en la salida de la válvula, la presión será la misma que en la entrada (Figura 3).

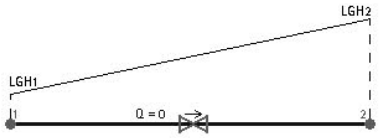

Figura 1. La VRP se cierra y no permite ningún tipo de flujo.

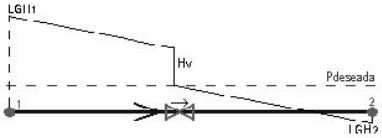

Figura 2. La VRP produce pérdidas para alcanzar la presión objetivo.

Figura 3. La VRP se abre completamente y no produce pérdidas.

En el caso de una tubería simple con una válvula reguladora de presión, se conoce la longitud del tubo (L), el diámetro (d) y el área transversal (A), la posición de la válvula respecto al nodo aguas arriba (X_v), su elevación (Z_v), la presión objetivo de la válvula ($P_{objetivo}$), la aceleración por la gravedad (g), las pérdidas por fricción en el tubo (H_f) y las pérdidas menores en el tubo (H_m). Después de una iteración con el método del gradiente, también se conocen las líneas de gradiente hidráulico de los nodos inicial (LGH_1) y final (LGH_2).

Si la línea de gradiente hidráulico del nodo inicial es menor a la del nodo final, el sentido del flujo es contrario al especificado, por lo que la válvula debe cerrarse. En caso contrario, la válvula debe estar abierta.

Puesto que la presión objetivo de la válvula se conoce (es un parámetro de diseño), se puede conocer también la línea de gradiente hidráulico objetivo de la válvula (ecuación 5) y utilizarla para calcular el valor de las pérdidas que debe producir la válvula (H_v). Esto es la diferencia entre el valor de la línea de gradiente hidráulico que tiene la válvula y la línea de gradiente hidráulico objetivo (ecuación 6).

$$LGH_{objetivo} = P_{objetivo} + Z_v \qquad [5]$$

$$H_v = LGH_{válvula} - LGH_{objetivo} \qquad [6]$$

Es importante señalar que, debido a que las líneas de gradiente hidráulico de los nodos no son conocidas a priori, sino que se van ajustando a lo largo de las diferentes iteraciones del cálculo hidráulico, es necesario calcular la pérdida de la válvula en cada iteración y corregirla hasta que el método converja.

Puesto que las pérdidas producidas por la válvula son independientes del caudal, éstas deben incluirse en el coeficiente γ de la ecuación genérica que relaciona altura piezométrica y caudal en el método del gradiente (1). Debido a que no hay más valores que afecten este término, se puede deducir que $\gamma = H_v$, llegando a la ecuación 7.

$$H = H_f + H_m + H_v = \left[\frac{Q^2}{A^2 2g}\left(\frac{fL}{d} + \sum k_m\right)\right] + H_v = \alpha Q^2 + H_v \qquad [7]$$

En conclusión, se debe hacer solo un paso adicional en cada iteración: calcular las pérdidas de la válvula a partir de las alturas piezométricas obtenidas e incluirlas en la ecuación 3. Con esto se determina el valor del elemento respectivo de la matriz A11. En la ecuación 8 se muestra cómo quedaría el i-ésimo elemento de la matriz A11 en una iteración determinada, sí se ubica una VRP en el tubo i.

$$\alpha Q_i^{n-1} + \beta + \frac{LGH_{\text{válvula}} - LGH_{\text{objetivo}}}{Q_i} \qquad [8]$$

3.2 Válvula reductora de presión

A diferencia de la reguladora de presión, esta válvula (VBP) siempre produce unas pérdidas fijas que son establecidas por quien opera la red sin importar la dirección ni las condiciones de flujo aguas arriba o aguas abajo de su ubicación. Por definición, esto quiere decir que las pérdidas de válvula (H_v) son iguales al valor que se fija para la válvula cuando ésta se va a operar, lo que implica que el valor de H_v permanece constante a lo largo del cálculo y no varía de iteración a iteración, como lo hace en el caso de una VRP.

Es notorio que el valor de las pérdidas producidas por la válvula no depende del caudal de la tubería en la cual se encuentra, por lo que éste debe incluirse, nuevamente, en el coeficiente γ de la ecuación que relaciona alturas piezométricas con caudales en el método del gradiente (1).

La modificación que se hace en el método del gradiente consiste en reemplazar γ por el valor H_v fijado para la válvula reductora de presión en el i-ésimo elemento de la matriz A11, dado que la válvula se encuentra en el tubo i (ecuación 9).

$$\alpha Q_i^{n-1} + \beta + \frac{H_v}{Q_i} \qquad [9]$$

3.3 Válvula de control de caudal

El propósito de una válvula de control de caudal (VCC) es entregar un caudal específico aguas abajo de sí misma. La válvula puede producir pérdidas con el fin de disminuir el caudal de salida hasta un valor objetivo, pero no puede aumentar el caudal, puesto que no es un elemento generador de energía. Teniendo en cuenta esta condición, la válvula solo opera cuando el caudal de llegada es superior al caudal objetivo, pero es incapaz de modificar la presión cuando el caudal de entrada es inferior a este. En este último caso, la válvula operará completamente abierta.

El nodo que se encuentre aguas abajo de una válvula de control de caudal debe tener otros tubos conectados que permitan tener una fuente de alimentación alterna, puesto que si no lo hace, se puede violar la ley de continuidad en este nodo al forzar un caudal deseado de entrada que no compense el consumo.

Para esta válvula, es claro que las pérdidas que ella produce están ligadas al caudal que pasa por la tubería que, a la postre, debe ser el mismo caudal objetivo. Por lo tanto, el término de la ecuación que relaciona altura piezométrica con caudal (1), que se ve afectado por la presencia de una VCC, es el coeficiente α.

Para encontrar el valor de α que representa las pérdidas de la válvula conjuntamente con las del tubo (fricción y menores), se tiene en cuenta que el caudal que se va a tener a lo largo de la tubería es el caudal objetivo de la VCC. Esto permite llegar a la ecuación 10.

$$\alpha = \frac{H}{Q^2_{objetivo}} = \frac{H_f + H_m + H_v}{Q^2_{objetivo}} \quad [10]$$

En este caso, se afectan dos matrices del cálculo con el método del gradiente: A11 y A11', debido a que para calcular los términos que no son cero (de la diagonal) se utiliza el coeficiente α.

3.4 Válvula de propósito general

La modelación de la válvula de propósito general (VPG) se realizó con el fin de poder simular otros tipos de válvulas, con usos menos extendidos, que afectan el comportamiento hidráulico de la red a través de una relación determinada entre la altura piezométrica y el cauda. En general, las VPG describen dicha relación a través de una ecuación polinómica cuya forma es la indicada en la ecuación 11.

$$H = \alpha Q^2 + \beta Q + \gamma \quad [11]$$

Al comparar la ecuación 11 para VPG y la ecuación 1 para pérdidas en el método del gradiente, salta a la vista que las ecuaciones tienen la misma forma si se usa la ecuación de Darcy-Weisbach. Como es el caso en esta investigación, es fácil concluir que los coeficientes α, β y γ de las dos ecuaciones tendrán el mismo valor.

Al modificar el valor de los tres coeficientes, se ven afectadas las matrices A11 y A11' del cálculo del gradiente, que son las que se calculan a partir de la ecuación de pérdidas.

3.5 Válvula de regulación de cierre

Las válvulas de regulación de cierre (VRC) producen unas pérdidas menores diferentes dependiendo de su porcentaje de apertura (o cierre) siguiendo una relación que, por lo general, es especificada por el fabricante de la válvula.

Lo usual es que entre mayor porcentaje de apertura se tenga, el coeficiente de pérdidas menores disminuya hasta un valor mínimo que corresponde a las pérdidas producidas por tener la válvula completamente abierta en la tubería. Así mismo, al cerrar la válvula, el coeficiente de pérdidas menores aumenta tendiendo a infinito cuando ésta se cierra totalmente.

Cada porcentaje de apertura de la válvula está asociado a un coeficiente de pérdidas menores, con lo cual se define el comportamiento de la válvula en función de su porcentaje de apertura (ecuación 12).

$$K_{mv} = f(\%\text{apertura}) \quad [12]$$

Para calcular las pérdidas menores se utiliza la ecuación 13, donde la sumatoria de los coeficientes de pérdidas menores debe tener en cuenta el término de k_m producido por la válvula, además de los producidos por los otros accesorios que tenga la tubería (ecuación 14).

$$h_m = \sum \left(K_m\right) \cdot \frac{v2}{2g} \qquad [13]$$

$$\sum \left(K_m\right)_{total} = K_{mv} + \sum \left(K_m\right)_{parcial} \qquad [14]$$

El coeficiente de la ecuación de pérdidas que incluye las pérdidas menores es α (10), de manera que las matrices A11 y A11' quedan afectadas por la presencia de esta válvula.

3.6 Válvula de cheque

Las válvulas de cheque tienen como propósito impedir que exista flujo reverso en una tubería. Cuando el caudal pasa en dirección opuesta a la requerida, la válvula cierra el tubo, impidiendo que exista flujo.

Esta válvula opera solo en dos estados: totalmente abierta o totalmente cerrada. Totalmente abierta si la dirección del caudal es la requerida. La válvula se abre completamente permitiendo el normal funcionamiento de la tubería. Totalmente cerrada si la dirección del caudal es contraria a la requerida. La válvula se cierra impidiendo que haya caudal a través de la tubería.

Lo que hace una válvula de cheque es condicionar la existencia de caudal en el tubo, por lo que hace que la función tenga que definirse a tramos (ecuación 15).

$$Q_v = \begin{cases} 0 \text{ para } (\infty, 0] \\ Q_t \text{ para } [0, \infty) \end{cases} \qquad [15]$$

Esta es la única válvula que no se modela utilizando la ecuación genérica del método del gradiente. La forma de modelarla consiste en revisar la dirección de flujo de la válvula una vez se ha terminado el cálculo hidráulico de la red. Si esta es inversa a la especificada, se cierra la válvula y se vuelve a realizar el cálculo. Esta metodología tiene el problema de que cerrar una válvula (una tubería) equivale a eliminar del modelo dicha tubería. Esto implica un cambio en la dimensión de las matrices del método del gradiente. Por lo tanto, la solución consiste en evaluar la dirección de flujo al final de todos los ciclos de cálculo. Si el flujo es reverso, se vuelve a realizar todo el cálculo.

4 Modelación en el programa REDES

El programa REDES es una herramienta de simulación hidráulica estática y en tiempo extendido, y de calidad de agua para sistemas de tuberías bajo flujo presurizado.

Los elementos que conforman una red dentro del programa son las fuentes (embalses y tanques), los nodos de consumo y los tubos que transportan el agua de un lugar a otro. Las válvulas se modelan en el programa como tubos, de manera que se puedan incluir las modificaciones dentro de la ecuación genérica del método del gradiente (ecuación 1).

En la Figura 4, se puede ver un esquema simplificado de la forma como se realiza el cálculo en el método del gradiente, utilizando las ecuaciones físicamente basadas, a través de un módulo de solución de matrices dispersas.

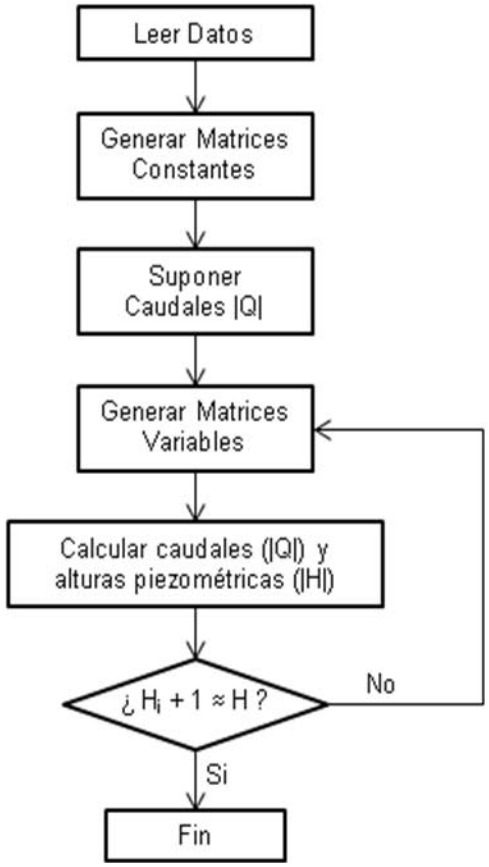

Figura 4. Diagrama de flujo simplificado del cálculo con el método del gradiente.

En cada iteración, se calculan las "matrices variables" A11 y A11' a partir de los caudales obtenidos en el paso anterior. En este punto, se rastrea la existencia de válvulas y, según el tipo, se hacen las modificaciones pertinentes. Una vez se modifican las matrices A11 y/o A11', el cálculo se desarrolla normalmente durante el resto del ciclo.

5 Resultados

Se utilizaron dos redes teóricas de prueba para comprobar el correcto funcionamiento del programa REDES con las modificaciones realizadas. La primera red se muestra en la Figura 5. Tiene los datos mostrados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**1 y las válvulas se ubican en la tubería 4. La segunda red es una modificación de la primera, la cual fue necesaria para probar la válvula de control de caudal y la válvula de cheque, puesto que, para la primera se necesita alimentación alterna para el nodo final y, para la segunda, alimentación alterna al sector aislado en caso de flujo reverso. Para hacer la segunda red, se toma la primera y se añade un tubo del nodo 2 al 6 con un diámetro de 250 milímetros, una longitud de 400 metros, una rugosidad de $1{,}5 \times 10^{-6}$ metros y un coeficiente de pérdidas menores de 0.

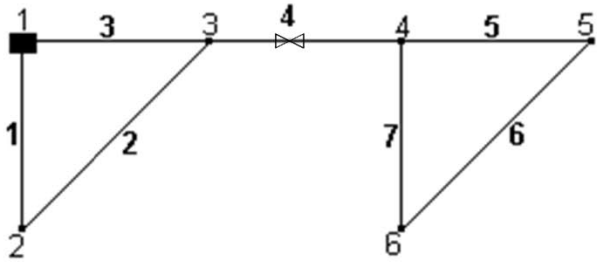

Figura 5. Esquema de la red 1.

Tabla 1: Datos de la red 1

NODOS				
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	Caudal consumo (m^3/s)
2	0	0	0	0,03
3	200	200	0	0,02
4	400	200	0	0,03
5	600	200	0	0,04
6	400	0	0	0,03

EMBALSE				
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	LGH (m)
1	0	200	0	50

TUBOS		
ID	Diámetro (m)	Longitud (m)
1	0,2032	200
2	0,1524	300
3	0,2032	200
4	0,2032	200
5	0,1524	200
6	0,1524	300
7	0,1524	200
Rugosidad: 1,5 x 10^{-6} metros		
Coeficiente de pérdidas menores: 0		

Al utilizar una válvula reguladora de presión en la segunda red, el programa no llegó a una solución. Al mirar detenidamente, se pudo observar que las pérdidas producidas por la válvula causan una oscilación en la presión del nodo aguas abajo de la válvula para cada ciclo, debido a que cuando hay pérdidas, el caudal tiende a irse por la tubería 8, a lo que la válvula responde con una reducción de las pérdidas y, acto seguido, el caudal vuelve a ir por la tubería 4, incrementando de nuevo las pérdidas.

Se realizaron los cálculos hidráulicos de las redes 1 y 2 con los 6 tipos de válvulas y se confrontaron las presiones de todos los nodos y los caudales de todos los tubos con aquellos obtenidos en el programa EPANET para las mismas redes. De cada una de las válvulas se escogió el nodo y el tubo que presentaba el mayor error y se incluyó en la Tabla 2. En todos los casos la diferencia máxima no superó el 1 %, ni para las presiones, ni para los caudales.

Tabla 2. Resultados de la comparación con EPANET.

Tipo de Válvula	Diferencia Máxima - EPANET	
	Caudal	Presión
VRP	0,13 %	0,2 %
VBP	0,32 %	0,14 %
VCC	0,81 %	0,16 %
VPG	0,13 %	0,17 %
VRC	0 %	0 %

6 Conclusiones

El método del gradiente ofrece, mediante la ecuación genérica que relaciona alturas piezométricas y caudales, una forma eficiente y robusta de modelar accesorios de redes de distribución de agua potable.

La válvula reguladora de presión, cuyo nodo aguas abajo tenga una importante fuente alterna de alimentación, puede generar oscilaciones de presión en dicho nodo. Las oscilaciones se producen debido a que las pérdidas producidas por la válvula pueden hacer que el caudal transite por una tubería diferente, lo que a su vez disminuye el caudal en la tubería donde se encuentra la válvula disminuyendo también sus pérdidas y haciendo, nuevamente, que transite caudal por esta tubería, empezando el ciclo otra vez.

Una válvula de control de caudal no puede ponerse en una tubería cuyo nodo final no tenga otra fuente alterna de alimentación, debido a que podría dejar de suministrarse la demanda de este nodo si el caudal que permite la válvula es inferior al caudal de consumo.

Los modelos de válvulas reguladoras de presión y de control de caudal deben tener en cuenta que, cuando requieren energía para encontrar la presión o caudal deseado, no pueden funcionar debido a que las válvulas no son productoras de energía.

Las válvulas de propósito general con ecuación altura – caudal de segundo grado pueden ser modeladas solamente con la ecuación físicamente basada para las pérdidas por fricción de Darcy – Weisbach, pues solo en este caso el exponente del caudal es 2, al igual que en la ecuación de la válvula.

Aunque las válvulas de cheque podrían ser modeladas en un solo cálculo hidráulico estático, el cambio en las dimensiones de las matrices "fijas" tras iteraciones sucesivas sería poco eficiente en lo que a memoria computacional se refiere.

Se logró modelar 5 tipos de válvulas diferentes modificando los coeficientes α, β y γ de la ecuación altura-caudal del método del gradiente.

7 Bibliografía

Saldarriaga Valderrama, Juan Guillermo (2007). "Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos", Editorial Alfaomega, Ediciones Uniandes.

Streeter, Victor L; Wylie, E. Bengamin; Bedford, Keith W. (2000). "Mecánica de Fluidos", Editorial McGraw-Hill.

Centro Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, CIACUA (2004). "Programa REDES. Manual del Usuario".

Salgado, R.; Todini, E.; O'Conell P.E. (1988). "Extending the Gradient Method To Include Pressure Regulating Valves in Pipe Networks". Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems, University of Kentucky.

López Giraldo, Carlos Santiago (2003). "Diseño de redes de distribución de agua potable de mínimo costo con algoritmos genéticos". Universidad de los Andes.