

Herramienta informática para diseño de redes hidráulicas presurizadas

A computational tool to pipe network design

Antonio Barrón Corvera¹, Pedro Alvarado Medellín¹, Carlos Bautista Capetillo^{2*}, Hiram Badillo-Almaraz¹

¹Programa de Ingeniería Civil, Unidad Académica de Ingeniería I, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas". Avenida Ramón López Velarde 801, Zacatecas, Zacatecas, 98000 (<https://orcid.org/0000-0003-0567-885X>, <https://orcid.org/0000-0002-3484-2623>, <https://orcid.org/0000-0002-3771-4475>).

^{2*}Programa de Ciencia y Tecnología del Agua, Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia, Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas". Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 6, La Escondida, Zacatecas, Zacatecas, México. 98160. Correo: baucap@uaz.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0003-2100-7415>).

*Autor de correspondencia

Resumen

La creciente exigencia de agua por parte de los distintos usuarios supone aprovechar mejor el recurso disponible. Por ello, constantemente se desarrollan tecnologías para incrementar la eficiencia en su uso, sobre todo en los sistemas de conducción y distribución. En este trabajo se presenta una herramienta computacional desarrollada en lenguaje Visual C# para diseñar redes presurizadas (*RedesUAZ*), fundamentada en el análisis matricial de estructuras utilizando el método de rigideces. Aunque surge de la necesidad de tener universidades públicas que cuenten con recursos didácticos propios de libre acceso para la formación de los estudiantes, dicha herramienta es de utilidad para diseñar, en la práctica, redes presurizadas pequeñas. Para evaluar su rendimiento, se comparó con dos alternativas implementadas para el mismo fin (A1: Huddleston *et al.* [2004] / *RedesUAZ*; A2: EPANET / *RedesUAZ*), siendo los resultados hidráulicos equiparables entre sí. El análisis de las tres propuestas muestra diferencias relativas en caudales (A1: 6.01%, A2: 10.83%), velocidades (A2: 21.31%) y presiones (A2: 1.12%), por lo que el programa de cómputo propuesto resulta ser una alternativa viable en el dimensionamiento de sistemas hidráulicos que conducen agua a presión.

Palabras clave: Método matricial de rigideces; diseño hidráulico de redes; visual C#.

Abstract

The growing water demand represents a major worldwide problem; consequently, there exists an upward understanding regarding the efficient use of water. Thus, new techniques, methodologies, and computational algorithms are developed to increase the efficiency of water use. This paper presents a new computational model developed in the programming language Visual C# to design water supply pipe networks (*RedesUAZ*) based on the matrix analysis of structures using the stiffness method. Although it arose from the need for public universities with free access to didactic resources for student training, this tool is useful to design small, pressurized networks in practice. To assess its performance, the proposed model was compared with two well-known models with the same purpose (A1: Huddleston *et al.* [2004] / *RedesUAZ*; A2: EPANET / *RedesUAZ*). It can be said that hydraulic results are comparable to each other. The results of the analysis of the three proposals show small relative differences in flows (A1: 6.01%, A2: 10.83%), velocities (A2: 21.31%), and pressures (A2: 1.12%). It is concluded that the proposed model is an acceptable alternative for the analysis and design of hydraulic systems that conduct pressurized water.

Keywords: Matrix stiffness method; pressure networks design; visual C#.

Recibido: 14 de diciembre de 2020

Aceptado: 08 de junio de 2021

Publicado: 22 de septiembre de 2021

Como citar: Barrón Corvera, A., Alvarado Medellín, P., Bautista Capetillo, C., & Badillo-Almaraz, H. (2021). Herramienta informática para diseño de redes hidráulicas presurizadas. *Acta Universitaria* 31, e3093. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2021.3093>

Introducción

La creciente exigencia de agua por parte de los distintos usuarios supone aprovechar mejor el recurso disponible. La eficiencia en su uso es una de las líneas de investigación desde la década de 1940; para su análisis se opta por distinguir entre eficiencia en la conducción–distribución y eficiencia en la aplicación (Christiansen, 1942; Howell, 2001; Merriam & Keller, 1978). Con respecto a la primera, estudios realizados en zonas de riego (Bautista-Capetillo *et al.*, 2013; Cao *et al.*, 2015; Korkmaz *et al.*, 2009; Rendón *et al.*, 2007) reportan valores alrededor de 65%, sobre todo en aquellas donde circula el caudal a través de canales. Esta condición ha motivado la cada vez mayor aceptación para construir redes presurizadas más allá del costo que representan y del menoscabo en los procesos bióticos que se desarrollan junto a dichas estructuras. Por otra parte, el incremento en la población, en particular en zonas urbanas, conlleva la permanente construcción de sistemas hidráulicos a presión a fin de satisfacer el servicio de agua potable. Esas obras implican, entre otras cosas, transitar por una etapa de diseño que permita decidir la alternativa de mayor viabilidad técnica y económica.

El grado de complejidad que representa el diseño de este tipo de redes ha propiciado la generación de herramientas informáticas con las que se optimiza el tiempo de cálculo. Dentro de las más generalizadas se encuentra EPANET (Rossman, 1994); sin embargo, existen otras alternativas útiles como WASDIM (Henshaw & Nwaogazie, 2015), GESTAR (Estrada *et al.*, 2009), WaterCAD y WaterGEMS (Sonaje & Joshi, 2015). La solución a flujos presurizados en redes de distribución de agua asienta sus mayores logros metodológicos a partir de los trabajos publicados por Hardy Cross, fundados en el método de distribución de momentos (Cross, 1930; Cross, 1936). La técnica iterativa propuesta originalmente para análisis de marcos estructurales (Volokh, 2002) fue adoptada con la intención de balancear caudales o presiones hidráulicas en redes de conducción y distribución de agua (Jeppson, 1974; Moosavian & Jaefarzadeh, 2014; Saldarriaga, 2007; Swamee & Sharma, 2008). Posteriormente se publicaron diversos trabajos sobre la aplicación del método (Bonansinga, 1975; Chenoweth & Crawford, 1974); no obstante, algunos resultados reportan problemas para su convergencia, dado que los ajustes se calculan de manera independiente (Henshaw & Nwaogazie, 2015). Una forma de subsanar dicho inconveniente es mediante metodologías alternas que han emergido gracias al desarrollo de la programación lineal, la programación no lineal, la programación dinámica y los algoritmos genéticos (Dawidowicz, 2018; Duan *et al.*, 1990; Fujiwara *et al.*, 1987; Hajibabaei *et al.*, 2019; Qi & ZiFang, 1996; Simpson *et al.*, 1994; Su *et al.*, 1987). Además, el método del gradiente hidráulico (Ormsbee, 2006), utilizado en EPANET, destaca entre los de mayor aplicación en el estudio de tuberías que trabajan a presión (Marchi & Simpson, 2013; Ramesh *et al.*, 2012; Villalba & Saldarriaga, 2005). En los últimos años se han desarrollado distintos métodos y herramientas computacionales para el diseño de redes hidráulicas presurizadas basadas en diferentes técnicas, como pueden ser: el cálculo del balance energético de la red (Pardo *et al.*, 2019); el método de partición geométrica basado en bisección recursiva de coordenadas (Chatzivasilis *et al.*, 2019); la aplicación del método de optimización estocástico de enjambre de partículas (Jahandideh-Tehrani *et al.*, 2020; Novarini *et al.*, 2019); y el uso de algoritmos integrados orientados a objetos para un análisis de flujo eficiente de la red (Jha & Mishra, 2020), entre otros.

Así, los métodos matriciales formulan, desde el contexto estático, un problema estructural por medio de una matriz de rigideces (desplazamientos), o bien, de una matriz de flexibilidades (fuerzas). En el método de las rigideces se estiman los componentes de las relaciones de rigidez para obtener los desplazamientos de los nudos (traslaciones y rotaciones), estos a su vez se emplean con el propósito de determinar las fuerzas internas de las barras, así como las reacciones en los apoyos. Por su parte, el método de las flexibilidades se enfoca en obtener los momentos que se generan a partir de las fuerzas y sus respectivos desplazamientos con base en las ecuaciones de compatibilidad de deformaciones (Hibbeler, 2012; McCormac, 2010). Debido a la similitud entre el análisis mecánico estructural y el análisis hidráulico de tuberías –ambos conllevan

los principios de conservación de la masa y la energía—, es posible establecer una equivalencia y por ello aplicar los métodos matriciales al diseño de redes presurizadas.

Si bien la principal ventaja de las aludidas metodologías estriba en su capacidad para estructurar la matriz solución que se genera con el objetivo de satisfacer caudales y presiones al interior de la red de distribución, en la mayoría de los casos se debe resolver de modo simultáneo un sistema de múltiples ecuaciones no lineales. Tal condición limitó su uso, y fue hasta con el avance tecnológico que los modelos informáticos basados en métodos matriciales irrumpieron con gran aceptación (Nielsen, 1989; Ormsbee, 2006; Walski, 2006). En ese sentido, el objetivo de la presente investigación fue desarrollar una herramienta informática de libre acceso fundada en el método matricial de rigideces que permita la formación de recursos humanos en el diseño de redes hidráulicas presurizadas. Los resultados corresponden a la primera versión del programa denominada *RedesUAZ*, implementada en lenguaje C#, misma que se ejecuta exclusivamente en equipos de cómputo con sistema Windows.

Materiales y Métodos

Ecuaciones gobernantes

Huddleston *et al.* (2004) muestran las ecuaciones que gobiernan el flujo permanente en redes presurizadas para un fluido incompresible con las que se lleva a cabo el balance de masa y energía unidimensional. El principio de conservación de la masa se aplica a cada uno de los nodos N_i que conforman la red, tal que:

$$\sum Q_e - \sum Q_s = 0 \quad (1)$$

donde Q_e y Q_s ($m^3 s^{-1}$) denotan la demanda nodal. El equilibrio másico ocurre en los nodos según los caudales que entran (Q_e) o salen (Q_s) de ellos a través del flujo por tubos o fuentes de abastecimiento. Ahora bien, de acuerdo con el principio de la conservación de la energía, para cada circuito (C_i) del total (N_L) que comprenden la red debe cumplirse que:

$$\sum_{j=1}^{I_P} h_{Lj} - \sum_{k=1}^{J_P} H_{Gk} - \Delta E = 0 \quad (2)$$

donde h_L (m) es la pérdida de energía en cada uno de los tubos (I_P); H_G (m) es la energía que se aporta a los distintos circuitos (J_P representa el total de equipos que permiten la ganancia de energía hidráulica) y ΔE (m) es la variación neta en la carga de energía al interior de la red.

El sistema de ecuaciones que resulta de aplicar la ecuación 1 a cada nodo y la ecuación 2 a cada circuito, incluyendo aquellos puntos con cargas hidráulicas constantes, describen la distribución de caudales a través de la red hidráulica. El sistema de ecuaciones algebraicas consiguiente se resuelve por medio de diversos algoritmos numéricos, entre ellos Hardy Cross, Newton-Raphson y la teoría lineal (Mays, 2011). Por otra parte, la ecuación general para el cálculo de las pérdidas de energía se describe en Silvestre (1983) como:

$$h_L = \beta \frac{Q^m}{\phi^n} L \quad (3)$$

donde β representa el término que incluye el factor de rugosidad; Q ($m^3 s^{-1}$) es el caudal circulante, ϕ (m) es el diámetro interior del tubo, L (m) corresponde a la longitud del tubo y m y n son coeficientes cuyo valor depende del modelo de fricción que se adopte.

Formulación matricial de las ecuaciones para régimen permanente

Para una tubería j sujeta a las condiciones hidráulicas como las mostradas en la figura 1, la ecuación 3 se transforma en:

$$h_{Lj} = \beta_j \frac{L_j}{\phi_j^n} q_j^m \quad (4)$$

De la ecuación 4 resulta la expresión para determinar el caudal que circula por la tubería j , tal que:

$$q_j = \sqrt[m]{\frac{1}{\beta} \frac{h_{Lj} \phi_j^n}{L_j}} \quad (5)$$

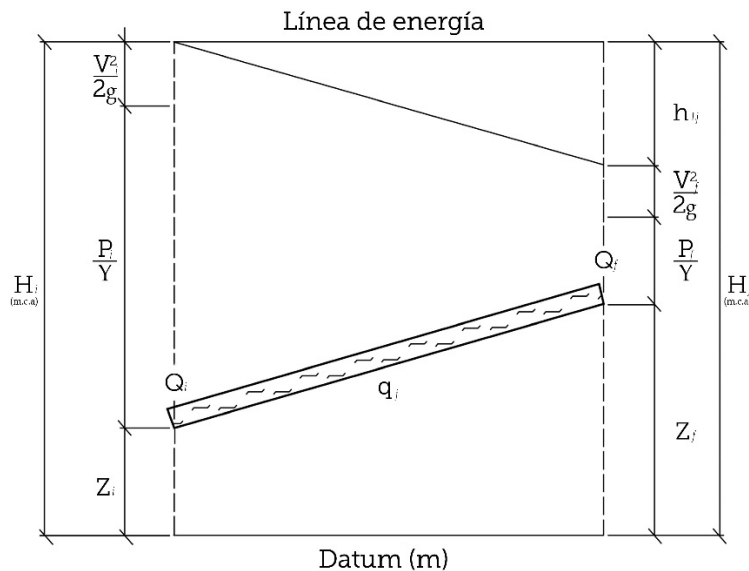


Figura 1. Representación esquemática de las cargas de posición, presión y velocidad para una tubería.
Fuente: Elaboración propia, adaptado de Martín-Navarro (1986).

Reescribiendo la ecuación 5 se llega a:

$$q_j = \sqrt[m]{\frac{1}{\beta} \frac{\phi_j^n}{L_j h_{Lj}^{m-1}}} h_{Lj} = \delta_j h_{Lj} \quad (6)$$

Ahora bien, según lo indicado en la misma figura 1, se tiene que:

$$Q_i = -q_j = -\delta_j h_{Lj} = -\delta_j (H_i - H_f) \quad (7)$$

$$Q_f = q_j = \delta_j h_{Lj} = \delta_j (H_i - H_f) \quad (8)$$

Que en forma matricial se escribe de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} Q_i \\ Q_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\delta_j & \delta_j \\ \delta_j & -\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_i \\ H_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

La ecuación 9 se emplea para determinar los caudales que circulan por los tubos de una red presurizada y es análoga a la matriz de rigideces utilizada en el diseño de estructuras. Los signos indican la dirección del flujo: negativo sale del nodo, positivo llega al nodo.

Fundamento teórico del método de rigideces

En un medio continuo existe un número infinito de grados de libertad. Representar su comportamiento, por lo tanto, implica una cantidad de parámetros acorde al número de grados de libertad que se consideren. Sin embargo, está el caso de estructuras reticulares en forma de armaduras o marcos, en las cuales el campo de desplazamientos puede ser representado por la denominada curva elástica, cuya deformación se valora a través de un conjunto de parámetros determinado. Si se considera el caso de una barra elástica, una vez definidos sus desplazamientos y giros en las secciones extremas, su forma podrá estar completamente definida. Las ecuaciones elásticas de una pieza establecen la relación existente entre las fuerzas y momentos que actúan en sus extremos, así como los movimientos que ocurren (e.g., desplazamientos y giros). Así, para una estructura formada por un conjunto de barras elásticas tenemos que, si se restringen los desplazamientos de los nudos, se puede determinar completamente la forma deformada de dicha estructura. Esto significa que la estructura puede analizarse mediante un número finito de grados de libertad resolviendo un número finito de ecuaciones algebraicas.

Para aplicar el método, dada su condición matricial, se deben cumplir los siguientes principios que se agrupan en tres conjuntos de ecuaciones: 1) ecuaciones de compatibilidad, 2) ecuaciones constitutivas y 3) ecuaciones de equilibrio. Las ecuaciones de compatibilidad relacionan las deformaciones de barras con los desplazamientos nodales. Teniendo en consideración estas relaciones en las ecuaciones constitutivas, relacionamos las fuerzas en los extremos de barras con los desplazamientos nodales. Tomando en cuenta estas últimas relaciones en las ecuaciones de equilibrio, se obtiene un conjunto de ecuaciones de fuerzas nodales en función de desplazamientos nodales que pueden ser consideradas como ecuaciones de equilibrio de la estructura en función de desplazamientos. La resolución de este sistema de ecuaciones nos permite obtener el valor de las incógnitas (desplazamientos nodales), a partir de los cuales se obtienen las solicitaciones de las barras de la estructura, así como las reacciones.

El método requiere asignar a cada barra elástica de la estructura una matriz de rigidez llamada matriz de rigidez elemental, que dependerá de sus condiciones de conexión en sus extremos, la forma de la barra y las constantes elásticas del material de la barra. A partir del conjunto de matrices elementales mediante un algoritmo conocido como acoplamiento que tiene en cuenta la conectividad de unas barras con otras, se obtiene una matriz de rigidez global que relaciona las fuerzas nodales equivalentes y desplazamientos sobre los nodos de la estructura mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n1} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1+R_1 \\ F_2+R_2 \\ \vdots \\ F_n+R_n \end{pmatrix} \quad (10)$$

donde F_i son las fuerzas nodales equivalentes asociadas a las fuerzas exteriores aplicadas sobre la estructura, R_i corresponde a las reacciones hiperestáticas inicialmente desconocidas sobre la estructura, δ_i indica los desplazamientos nodales incógnita de la estructura y n es el número de grados de libertad de la estructura.

Una vez aplicadas las fuerzas en cada elemento, se construye el llamado vector de fuerzas nodales equivalentes que dependen de las acciones externas aplicadas en la estructura. A la par de dichas fuerzas, se toman en cuenta las reacciones sobre la estructura en los apoyos. Posteriormente, se construye un sistema lineal de ecuaciones, para los desplazamientos y las reacciones. El número de incógnitas (reacciones y desplazamientos) depende del número de nodos. Finalmente, a partir de las reacciones, fuerzas nodales equivalentes y desplazamientos, se encuentran los esfuerzos en los nudos o uniones de las barras. A partir de los esfuerzos nodales, es posible obtener los esfuerzos en cualquier punto de la estructura, así como también las tensiones máximas. A partir de los esfuerzos y tensiones, se pueden dimensionar los distintos elementos que forman parte de la estructura.

Código solución e interfaz gráfica

El código fuente y su interfaz gráfica para resolver la matriz completa que se genera a partir de la ecuación 9 se construyeron en el lenguaje de programación Visual C#. Esta primera versión se denomina *RedesUAZ*, con la intención de dar el crédito que corresponde a la Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas", institución donde se desarrolló el trabajo. Sus componentes se despliegan en una pantalla general de inicio e incluye cinco módulos: Archivos, Tubos, Graficar, Ejecutar, Ver, según se ilustra en la figura 2.

Las opciones que incluye cada módulo siguen el criterio de aquellos paquetes desarrollados en sistemas operativos que únicamente funcionan bajo ambiente Windows. El módulo Archivos contiene herramientas para crear una nueva red hidráulica, abrir una red hidráulica existente y guardar una red hidráulica en la que se esté trabajando; además, cuenta con la posibilidad de cargar archivos de AutoCAD con información gráfica de planimetría y de altimetría en nodos y tuberías. El módulo Tubos posibilita crear o modificar las características geométricas e hidráulicas de un proyecto; en forma manual se realizan cambios en nodos (coordenadas X, Y, Z), tuberías (nodo inicial, nodo final, diámetro, rugosidad, longitud) y condiciones de operación (altura piezométrica y caudal de extracción en nodos específicos de la red). Graficar es el módulo con el cual se ejecutan las diversas manipulaciones que sirven de apoyo para visualizar (Mover, Aumentar/Reducir, Zoom, Vista Previa, Vista Previa de Impresión) ya sea a la red en su conjunto o una parte de ella; incluye también la ventana Opción Gráfica que despliega valores alfanuméricos de nodos, tubos, diámetros, rugosidades, entre otros. El módulo Ejecutar corresponde al componente donde, una vez construida la red hidráulica, se efectúa el proceso iterativo que da solución a la matriz que resulta de aplicar la ecuación 9; adicionalmente, incluye opciones que permiten observar en pantalla (Pantalla Resultados) los resultados del proceso o, en su defecto, imprimirlos. Por último, el módulo Ver hace posible modificar las opciones gráficas del programa; encierra acciones para precisar cómo se llevó a cabo el ingreso de datos en nodos, tuberías y condiciones hidráulicas de operación.

Con la finalidad de mostrar el procedimiento que se sigue al ingresar una red hidráulica presurizada en el programa *RedesUAZ*, y así comparar los resultados que este arroja con relación a otras alternativas, en este estudio se trabajó con la red hidráulica propuesta por Huddleston *et al.* (2004). El ejemplo de estos autores incluye 14 nodos (dos para almacenamientos superficiales, cuatro con demanda de caudal y ocho solo para unir tuberías) y 21 tramos de tubos. Primeramente, desde el módulo Tubos en la opción Coordenadas se ingresan los valores X, Y, Z para los nodos. Luego, desde la opción Tubos se construye la red hidráulica, por lo que los nodos definidos en el paso anterior se ingresan en Nudo i o Nudo j , según

corresponda, en el entendido que la dirección del flujo será de i a j . Al ser arbitraria la definición anterior, el proceso iterativo con el cual se resuelve la ecuación 9 corregirá la dirección tal que se cumpla con lo dispuesto en la ecuación 1.

Después, se ingresa la información referente a cargas hidráulicas y caudales de entrada o salida al sistema hidráulico, de modo que en el módulo Tubos se selecciona la opción Altura Piezométrica en Nudos o Gasto en Nudos según corresponda. En el ejemplo de estudio, los nodos 13 y 14 tienen cargas conocidas, y por los nodos 4, 6, 9 y 11 ocurren extracciones de caudal. Es pertinente resaltar que el programa *RedesUAZ* reconoce los caudales que salen por los nodos con un signo negativo, mientras que los que llegan a ingresar a estos se registran con un signo positivo. En síntesis, las posibilidades anteriormente descritas se reflejan en la figura 2; la red hidráulica incluida en esa figura corresponde a la propuesta por Huddleston *et al.* (2004).

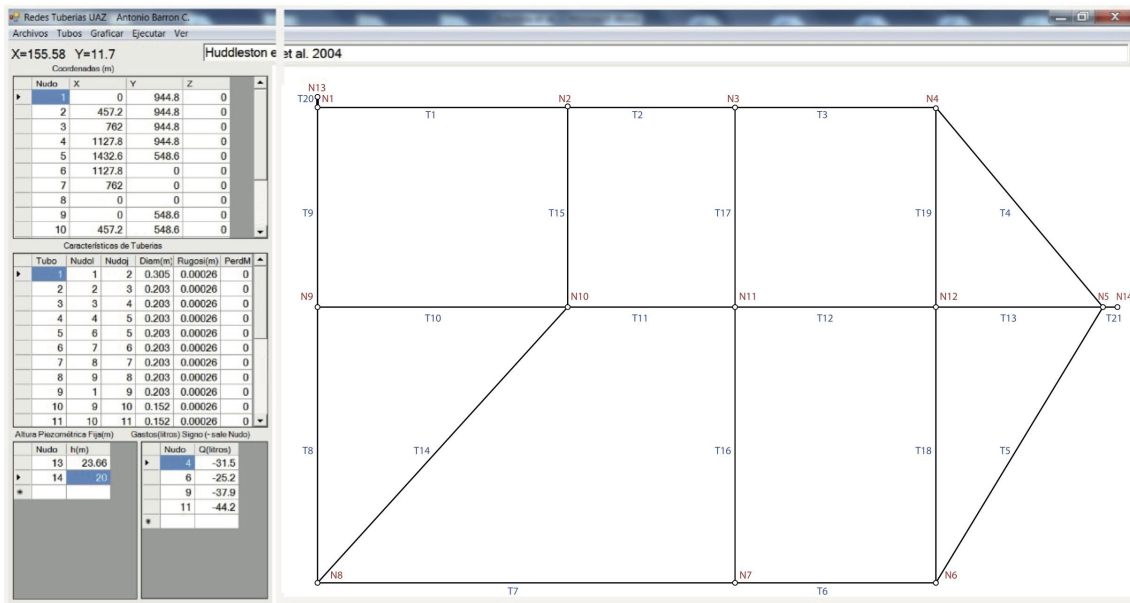


Figura 2. Esquema general de una red hidráulica en *RedesUAZ*.
Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Posterior a ingresar la información geométrica e hidráulica en la construcción de la red, el procedimiento iterativo se realiza desde el módulo Ejecutar; concluida la acción, *RedesUAZ* despliega una gráfica como la correspondiente a la figura 3. La herramienta informática permite identificar, con el apoyo de flechas, la dirección real del flujo más allá de la selección arbitraria inicial.

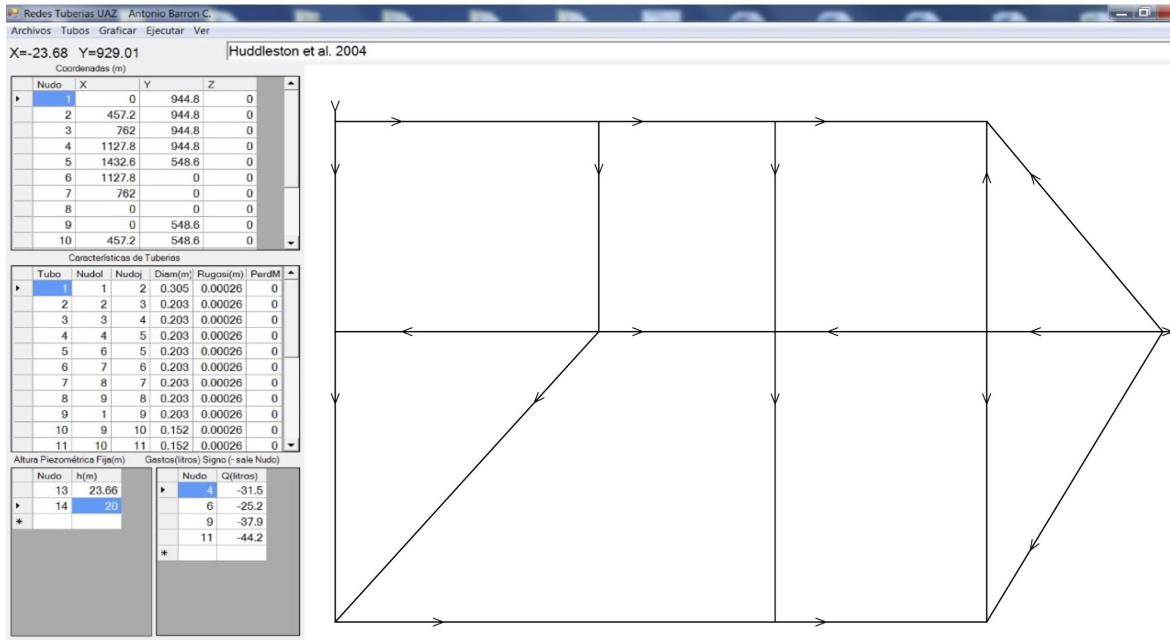


Figura 3. Dirección real del flujo (posterior al proceso de cálculo).
Fuente: Elaboración propia.

RedesUAZ es capaz de desplegar los resultados de cálculo en forma numérica. En la tabla 1 se establece la comparación entre la propuesta de Huddleston *et al.* (2004) y la calculada por *RedesUAZ*. Las diferencias encontradas se deben a las variaciones en las longitudes de los tubos; es decir, Huddleston *et al.* (2004) indican que las tuberías 4, 5 y 14 tienen una longitud de 609.6 m, 853.4 m y 548.6 m, respectivamente; sin embargo, al aplicar el teorema de Pitágoras, las longitudes son de 499.9 m, 627.6 m y 714.1 m para cada caso. Cabe advertir que, aunque las longitudes propuestas por Huddleston *et al.* (2004) pueden ocurrir, en la práctica no es lo más común. Con fundamento en lo anterior, esta primera versión de *RedesUAZ* no contempla la posibilidad de modificar las longitudes más allá de los cálculos que realiza en función de las coordenadas que se ingresan para cada nodo.

Los resultados de Huddleston *et al.* (2004) señalan para los tubos 4, 5, 12, 16 y 19 un cambio de dirección en el flujo en cuanto a lo propuesto en un inicio. En el caso de la metodología de *RedesUAZ*, originalmente se definieron direcciones (nodo inicial, nodo final) para los tubos 4 (4, 5); 5 (6, 5); 12 (11, 12); 16 (11, 7) y 19 (4, 12). Una vez llevado a cabo el procedimiento de cálculo (tabla 1) en *RedesUAZ*, los resultados evidencian lo siguiente: 4 (5, 4); 5 (5, 6); 12 (12, 11); 16 (11, 7) y 19 (12, 4). Así, los caudales que circulan por las tuberías 4, 5, 12 y 19 cambian de dirección al igual que ocurre con la metodología de Huddleston *et al.* (2004); no obstante, esta condición no se presenta en la tubería 16. A fin de valorar las diferencias descritas, se compararon los resultados obtenidos (tabla 2) del método de *RedesUAZ* y aquellos que arroja EPANET (Rossman, 1994) Al comparar las diferencias en caudales tanto de Huddleston *et al.* (2004) como de EPANET respecto a *RedesUAZ*, en general se observa que los valores de esta variable hidráulica son mayores cuando se determinan con el paquete informático desarrollado en esta investigación. En promedio, la diferencia de caudales que circulan por las tuberías fue: $0.0118 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (6.01%) Huddleston *et al.* (2004) / *RedesUAZ*; $0.0185 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (10.83%) EPANET/ *RedesUAZ*.

Tabla 1. Comparación de resultados entre Huddleston *et al.* (2004) y *RedesUAZ*.

Tubo	Huddleston <i>et al.</i> (2004)				<i>RedesUAZ</i>			
	Ø (m)	L (m)	Q [†] (m ³ s ⁻¹)	Nodo i	Nodo f	L (m)	Q (m ³ s ⁻¹)	ΔQ [‡] (m ³ s ⁻¹)
1	0.305	457.2	0.0558	1	2	457.2	0.0560	-0.0002
2	0.203	304.8	0.0400	2	3	304.8	0.0403	-0.0003
3	0.203	365.8	0.0165	3	4	365.8	0.0159	0.0006
4	0.203	609.6	-0.0103	5	4	499.9	0.0116	-0.0013
5	0.203	853.4	-0.0087	5	6	627.6	0.0115	-0.0028
6	0.203	335.3	0.0126	7	6	365.8	0.0095	0.0031
7	0.203	304.8	0.0150	8	7	762.0	0.0093	0.0057
8	0.203	762.0	0.0097	9	8	548.6	0.0058	0.0039
9	0.203	243.8	0.0480	1	9	396.2	0.0406	0.0074
10	0.152	396.2	0.0004	10	9	457.2	0.0032	-0.0028
11	0.152	304.8	0.0108	10	11	304.8	0.0090	0.0018
12	0.254	335.3	-0.0074	12	11	365.8	0.0109	-0.0035
13	0.254	304.8	0.0160	5	12	304.8	0.0192	-0.0032
14	0.152	548.6	0.0053	10	8	714.1	0.0035	0.0018
15	0.152	335.3	0.0157	2	10	396.2	0.0157	0.0000
16	0.152	548.6	-0.0024	11	7	548.6	0.0002	0.0022
17	0.254	365.9	0.0236	3	11	396.2	0.0245	-0.0009
18	0.152	548.6	0.0040	12	6	548.6	0.0043	-0.0003
19	0.152	396.2	-0.0047	12	4	396.2	0.0041	0.0006
20	1.000	25.0	0.1037	13	1	25.0	0.0966	0.0071
21	1.000	25.0	0.0351	14	5	25.0	0.0422	-0.0071

Nota: El factor de rugosidad corresponde a la aplicación de la expresión de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas de energía (Huddleston *et al.*, 2004), que en este caso fue 0.00026.

†: El signo negativo indica cambio en la dirección del flujo respecto a lo propuesto inicialmente.

‡: La diferencia (ΔQ) resulta de restar valor absoluto de Huddleston *et al.* (2004) menos valor absoluto de *RedesUAZ*.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Comparación de resultados entre EPANET (Rossman, 1994) y *RedesUAZ*.

Tubo	Ø (m)	L (m)	EPANET			RedesUAZ			ΔQ [§] (m ³ s ⁻¹)
			Nodo i	Nodo f	Q (m ³ s ⁻¹)	Nodo i	Nodo f	Q (m ³ s ⁻¹)	
1	0.305	457.2	1	2	0.0649	1	2	0.0560	0.0089
2	0.203	304.8	2	3	0.0477	2	3	0.0403	0.0074
3	0.203	365.8	3	4	0.0191	3	4	0.0159	0.0032
4	0.203	499.9	5	4	0.0086	5	4	0.0116	-0.0030
5	0.203	627.6	5	6	0.0093	5	6	0.0115	-0.0022
6	0.203	365.8	7	6	0.0118	7	6	0.0095	0.0023
7	0.203	762.0	8	7	0.0129	8	7	0.0093	0.0036
8	0.203	548.6	9	8	0.0091	9	8	0.0058	0.0033
9	0.203	396.2	1	9	0.0458	1	9	0.0406	0.0052
10	0.152	457.2	10	9	0.0012	10	9	0.0032	-0.0020
11	0.152	304.8	10	11	0.0123	10	11	0.0090	0.0033
12	0.254	365.8	12	11	0.0022	12	11	0.0109	-0.0087
13	0.254	304.8	5	12	0.0101	5	12	0.0192	-0.0091
14	0.152	714.1	10	8	0.0038	10	8	0.0035	0.0003
15	0.152	396.2	2	10	0.0172	2	10	0.0157	0.0015
16	0.152	548.6	7	11	0.0011	11	7	0.0002	0.0009
17	0.254	396.2	3	11	0.0286	3	11	0.0245	0.0041
18	0.152	548.6	12	6	0.0041	12	6	0.0043	-0.0002
19	0.152	396.2	12	4	0.0038	12	4	0.0041	-0.0003
20	1.000	25.0	13	1	0.1108	13	1	0.0966	0.0142
21	1.000	25.0	14	5	0.0280	14	5	0.0422	-0.0142

Nota: El factor de rugosidad corresponde a la aplicación de la expresión de Darcy-Weisbach para el cálculo de las pérdidas de energía, que para este caso fue 0.00026.

§: La diferencia (ΔQ) resulta de restar valor absoluto de EPANET (Rossman, 1994) menos valor absoluto de *RedesUAZ*.

Fuente: Elaboración propia.

La metodología *RedesUAZ*, al igual que EPANET, permite conocer la presión en los nodos y la velocidad en las tuberías. Las figuras 4 y 5 ilustran la comparación con respecto a la línea 1:1 para velocidades y cargas hidráulicas entre EPANET y *RedesUAZ*, respectivamente. Las velocidades y cargas hidráulicas comparadas corresponden a las mismas tuberías o nodos según corresponde.

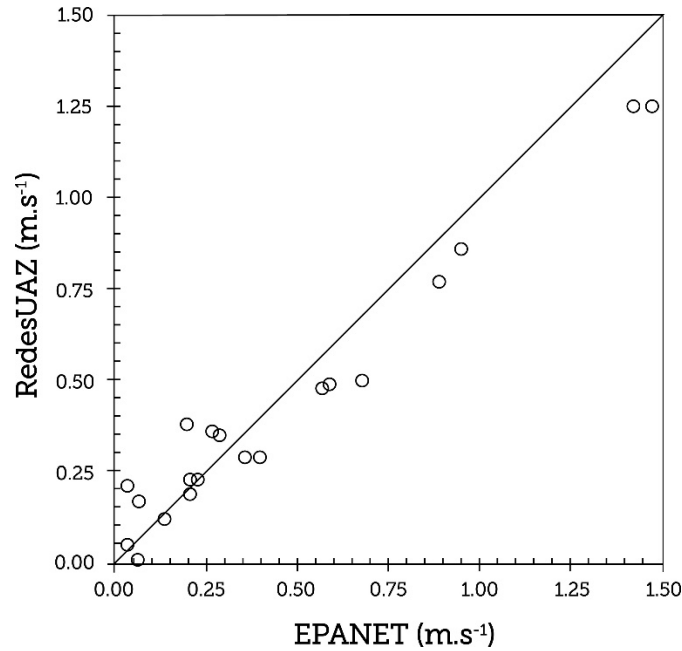


Figura 4. Comparación de velocidades en las tuberías entre EPANET (Rossman, 1994) y RedesUAZ.
Fuente: Elaboración propia.

El valor absoluto de las velocidades calculadas por la metodología RedesUAZ se encuentran entre 0.05 m s^{-1} y 1.25 m s^{-1} , mientras que en EPANET el rango oscila alrededor de los valores 0.04 m s^{-1} y 1.47 m s^{-1} . Concerniente al valor relativo de esta variable, la velocidad promedio es 21.31% mayor cuando se obtiene con la metodología RedesUAZ que cuando se calcula con EPANET.

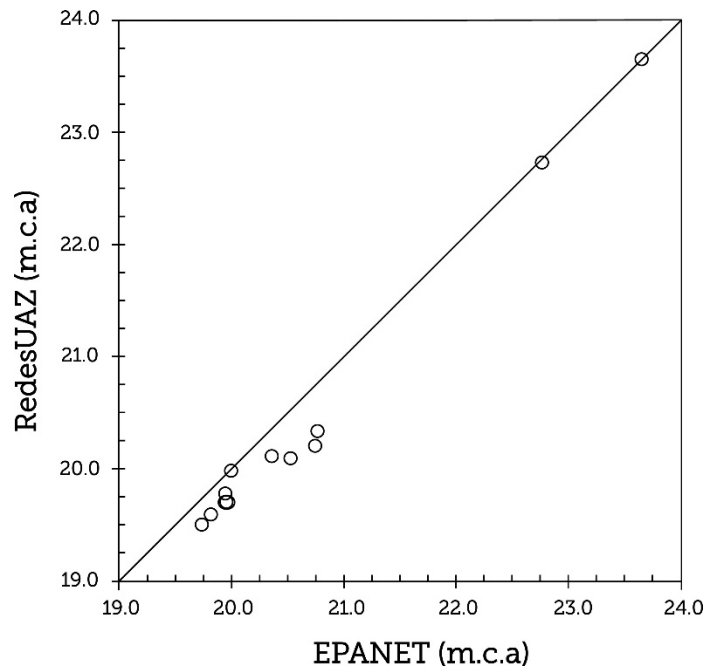


Figura 5. Comparación de presiones (metros columna de agua [m.c.a]) en los nodos entre EPANET (Rossman, 1994) y RedesUAZ.
Fuente: Elaboración propia.

Al evaluar la carga hidráulica en los nodos, los resultados evidencian una diferencia de 1.12% entre los calculados por EPANET y aquellos que se obtienen con *RedesUAZ*. Sobre esta variable, el rango de cargas hidráulicas se encuentra entre 19.82 m.c.a. y 23.66 m.c.a. cuando se calculan con EPANET, mientras que las que resultan de *RedesUAZ* oscilan entre 19.52 m.c.a. y 23.66 m.c.a.

Discusión

En cuanto al diseño y análisis de redes presurizadas, se cuenta con una gama amplia de paquetes informáticos. De las diversas opciones existentes, destaca EPANET (Rossman, 1994) por sus cualidades técnicas y por ser un recurso de libre acceso con versiones en inglés y español. Cabe mencionar que se han desarrollado otras posibilidades que ofrecen alternativas de solución a sistemas hidráulicos presurizados, en los cuales se debe garantizar caudal y presión hidráulica simultáneamente por medio de códigos de programación accesibles y libres. La presente investigación, cuyo código se ha programado en el lenguaje Visual C#, brinda una alternativa a la solución de redes hidráulicas presurizadas mediante el método matricial de rigideces. En principio, la herramienta informática *RedesUAZ* ha sido propuesta como una opción didáctica para la formación de recursos humanos a nivel licenciatura; sin embargo, al haber sido evaluado su rendimiento respecto a propuestas similares, se observa como una posibilidad que puede emplearse para casos prácticos. Cabe señalar que el reto subsecuente conlleva la evaluación del potencial máximo de *RedesUAZ* en cuanto al número de tubos y nodos que pueden ser analizados con esta primera versión del paquete tecnológico; hasta el momento se han realizado pruebas con redes de hasta 250 tramos y los resultados evidencian diferencias en el rango de 0.8%-24.2% respecto a aquellos que se determinan con EPANET.

Las variaciones encontradas entre las herramientas informáticas Huddleston *et al.* (2004), EPANET y *RedesUAZ* se atribuyen al principio físico que emplea cada paquete tecnológico para dar solución a las ecuaciones de conservación de masa y energía, a los errores acumulados que ocurren según el número de cifras significativas que cada una de ellas emplea y a posibles diferencias en la información inicial. Las diferencias porcentuales de caudal, carga hidráulica y velocidad entre A1 y A2 son tolerables desde el punto de vista del diseño hidráulico.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una herramienta computacional desarrollada en el lenguaje de programación Visual C#, denominada *RedesUAZ*, para el diseño de redes presurizadas, fundamentada en el análisis matricial de estructuras utilizando el procedimiento de cálculo aplicable a estructuras denominado método de las rigideces. La formulación sigue el criterio de aquellos paquetes desarrollados para sistemas operativos que funcionan bajo ambiente Windows, lo cual la hace ser una herramienta suficientemente amigable hacia el usuario. El programa *RedesUAZ* se caracteriza por una gran cantidad de cálculo sistemático, ya que optimiza el tiempo de cálculo y por su aplicación práctica.

Entre las características y ventajas de la herramienta informática *RedesUAZ* destaca la posibilidad de cargar archivos de AutoCAD con información gráfica de planimetría y de altimetría en nodos y tuberías, así como poder crear o modificar las características geométricas e hidráulicas de un proyecto; asimismo, puede desplegar los valores alfanuméricos de nodos, tubos, diámetros y rugosidades, facilitando el manejo de la información de entrada, además de que permite identificar la dirección real del flujo más allá de la selección arbitraria inicial.

Con el propósito de evaluar el rendimiento del programa *RedesUAZ*, se comparó con dos herramientas desarrolladas para el cálculo y diseño de redes presurizadas. Del análisis ejecutado se observó que el caudal es más grande cuando se obtiene con la herramienta informática propuesta que al hacer lo correspondiente con Huddleston *et al.* (2004) y EPANET (Rossman, 1994); las diferencias porcentuales fueron en el primer caso 6.01%, mientras que en el segundo alcanzaron 10.83%. Ahora bien, la velocidad en promedio incrementa 21.31% con la alternativa *RedesUAZ* respecto a la de EPANET; sin embargo, ocurre lo contrario con la carga hidráulica. Es decir, en promedio dicha variable es 1.12% mayor al calcularse con EPANET que al efectuarlo con *RedesUAZ*. Dadas las características de la propuesta y los resultados obtenidos, podemos concluir que el programa *RedesUAZ* representa una posibilidad viable de utilizar para el análisis y dimensionamiento de sistemas hidráulicos que conducen agua a presión, no solo desde el punto de vista académico sino también desde el punto de vista profesional.

Acrónimos

A1 – Alternativa que hace la comparación entre las propuestas para diseño de redes hidráulicas presurizadas de Huddleston *et al.* (2004) y *RedesUAZ*.

A2 – Alternativa que hace la comparación entre las propuestas para diseño de redes hidráulicas presurizadas de EPANET (Rossman, 1994) y *RedesUAZ*.

EPANET – Programa de cómputo para el análisis de sistemas de distribución de agua potable desarrollado por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

GESTAR – Herramienta computacional para redes de tuberías presurizadas para aplicaciones en sistemas de riego.

m.c.a. – Metros columna de agua.

RedesUAZ – Herramienta computacional para diseñar redes presurizadas, fundamentada en el análisis matricial de estructuras utilizando el método de rigideces.

Visual C# - Lenguaje de programación orientado a objetos diseñada para su uso en la plataforma para el desarrollo de software .Net.

WASDIM – Diseño de modelos de redes de tuberías de suministro de agua asistido por computadora (Computer-Aided Water Supply Piping Network Design Model).

Nomenclatura

Variable	Descripción	Unidades
Q_e	Caudal o demanda nodal de entrada	$m^3 s^{-1}$
Q_s	Caudal o demanda nodal de salida	$m^3 s^{-1}$
h_L	Pérdida de energía en cada uno de los tubos	m
H_G	Energía que se aporta a los diversos circuitos	m
J_P	Equipos que permiten la ganancia de energía hidráulica	adim.
ΔE	Variación neta en la carga de energía al interior de la red	m
β	Factor de rugosidad	adim.
Q	Caudal circulante	$m^3 s^{-1}$
\emptyset	Diámetro interior del tubo	m
L	Longitud del tubo	m
m, n	Coefficientes dependientes del modelo de fricción	adim.
q_j	Caudal circulante por una tubería j	$m^3 s^{-1}$

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas" por el apoyo brindado para llevar a cabo esta investigación.

Conflictos de intereses

Los autores expresan y declaran que no hay conflictos de intereses al redactar y presentar el manuscrito para su posible publicación.

Referencias

- Bautista-Capetillo, C., Zavala, M., & Martínez-Cob, A. (2013). Using thermal units for crop coefficient estimation and irrigation scheduling improves yield and water productivity of corn (*Zea mays* L.). *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(3), 214-220. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000529)
- Bonansinga, P. (1975). Computer analysis of water-distribution systems. *Journal American Water Works Association*, 67(7), 347-350. doi: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1975.tb02239.x>
- Cao, X., Wang, Y., Wu, P., & Zhao, X. (2015). Water productivity evaluation for grain crops in irrigated regions of China. *Ecological Indicators*, 55, 107-117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.003>

- Chatzivasilis, S., Papadimitriou, K., & Kanakoudis, V. (2019) Optimizing the formation of DMAs in a water distribution network through advanced modelling. *Water*, 11(2), 1-13. doi: <https://doi.org/10.3390/w11020278>
- Chenoweth, H., & Crawford, C. (1974). Pipe network analysis. *Journal American Water Works Association*, 66(1), 55-58. doi: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1974.tb01974.x>
- Christiansen, J. E. (1942). *Irrigation by sprinkling* (Bulletin 670). University of California. <https://archive.org/details/irrigationbyspri670chri/mode/2up>
- Cross, H. (1930). Analysis of continuous frames by distributing fixed-end moments. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 56(5), 919-928. https://archives.library.illinois.edu/erec/University%20Archives/1105037/Cross_Analysis_of_Continuous_Frames_opt.pdf
- Cross, H. (1936). *Analysis of flow in networks of conduits or conductors* (Bulletin 286). University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering. <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/4433/engineeringexperv00000i00286.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Dawidowicz, J. (2018). Evaluation of a pressure head and pressure zones in water distribution systems by artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 30, 2531-2538. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-017-2844-8>
- Duan, N., Mays, L. W., & Lansey, K. E. (1990). Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(2), 249-268. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:2\(249\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:2(249))
- Estrada, C., González, C., Aliod, R., & Paño, J. (2009). Improved pressurized pipe network hydraulic solver for applications in irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(4), 421-430. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000100)
- Fujiwara, O., Jenchaimahakoon, B., & Edirisinghe, N. C. P. (1987). A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks. *Water Resources Research*, 23(6), 977-982. doi: <https://doi.org/10.1029/WR023i006p00977>
- Hajibabaei, M., Nazif, S., & Sitzenfrei, R. (2019). Improving the performance of water distribution networks based on the value index in the system dynamics framework. *Water*, 11(12), 2445. doi: <https://doi.org/10.3390/w11122445>
- Henshaw, T., & Nwaogazie, I. L. (2015). Improving water supply network performance: A comparative analysis. *Physical Sciences and Engineering*, 1(2), 21-33. https://www.researchgate.net/publication/274456458_IMPROVING_WATER_SUPPLY_NETWORK_PERFORMANCE_A_COMPARATIVE_ANALYSIS
- Hibbeler, R. C. (2012). *Structural analysis* (8a ed.). Pearson Prentice Hall.
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281-289. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2001.932281x>
- Huddleston, D. H., Alarcon, V. J., & Chen, W. (2004). Water distribution network analysis using Excel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1033-1035. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:10\(1033\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1033))
- Jahandideh-Tehrani, M., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2020). Application of particle swarm optimization to water management: An introduction and overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(281). doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8228-z>
- Jeppson, R. W. (1974). *Steady flow analysis of pipe networks: An instructional manual* (Reports: Paper 300). Utah State University. https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1299&context=water_rep
- Jha, K., & Mishra, M. K. (2020). Object-oriented integrated algorithms for efficient water pipe network by modified Hardy Cross technique. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(1), 56-64. doi: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa006>
- Korkmaz, N., Avci, M., Unal, H. B., Asik, S., & Gunduz, M. (2009). Evaluation of the water delivery performance of the Menemen left bank irrigation system using variables measured on-site. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 633-642. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000053)

- Marchi, A., & Simpson, A. R. (2013). Correction of the EPANET inaccuracy in computing the efficiency of variable speed pumps. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(4), 456-459. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000273)
- Martin-Navarro, A. F. (1986). Análisis hidráulico de tuberías por métodos matriciales. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 2(4), 417-436. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/8760/Article05.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mays, L. W. (2011). *Water resources engineering* (2a ed.). John Wiley and Sons, Inc. McCormac, J. C. (2010). *Structural analysis: Using classical and matrix methods* (4a ed.). John Wiley and Sons, Inc.
- Merriam, J. L., & Keller, J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*. Utah State University, Logan, UT.
- Moosavian, N., & Jaefarzadeh, M. R. (2014). Hydraulic analysis of water supply networks using a modified Hardy Cross method. *International Journal of Engineering*, 27(9), 1331-1338. http://www.ije.ir/article_72370_7845039b5000634dfede46831d93a59a.pdf
- Nielsen, H. B. (1989). Methods for analyzing pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(2), 139-157. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:2(139))
- Novarini, B., Brentan, B. M., Meirelles, G., & Luvizotto, E. (2019). Optimal pressure management in water distribution networks through district metered area creation based on machine learning. *Brazilian Journal of Water Resources*, 24(37), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180165>
- Ormsbee, L. E. (2006). *The history of water distribution network analysis: The computer age*. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006, Cincinnati, Ohio, USA. doi: [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)3](https://doi.org/10.1061/40941(247)3)
- Pardo, M. A., Riquelme, A., & Melgarejo, J. (2019). A tool for calculating energy audits in water pressurized networks. *AIMS Environmental Science*, 6(2), 94-108. <https://www.aimspress.com/fileOther/PDF/environmental/environ-06-02-94.pdf>
- Qi, L., & ZiFang, L. (1996). Optimization of looped water distribution systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 227-231. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT.1996.601578>
- Ramesh, H., Santhosh, L., & Jagadeesh, C. J. (2012). *Simulation of hydraulic parameters in water distribution network using EPANET and GIS*. International Conference on Ecological, Environmental and Biological Sciences, Dubai, United Arab Emirates. https://www.researchgate.net/publication/227859988_Simulation_of_Hydraulic_Parameters_in_Water_Distribution_Network_Using_EPANET_and_GIS
- Rendón, P. L., Fuentes, R. C., & Magaña, S. G. (2007). *Diseño del riego por gravedad, manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Rossman, L. A. (1994). *EPANET Users manual* (Reporte Técnico). U. S. Environmental Protection Agency. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2007107067.xhtml>
- Saldarriaga, V. J. G. (2007). *Hidráulica de tuberías*. McGraw-Hill Internacional.
- Silvestre, P. (1983). *Fundamentos de hidráulica general*. LIMUSA.
- Simpson, A. R., Dandy, G. C., & Murphy, L. J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 423-443. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(423\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(423))
- Sonaje, N. P., & Joshi M. G. (2015). A review of modeling and application of water distribution networks (WDN) softwares. *International Journal of Technical Research and Applications*, 3(5), 174-178. <https://www.ijtra.com/view/a-review-of-modeling-and-application-of-water-distribution-networks-wdn-softwares.pdf>
- Su, Y., Mays, L. W., Duan, N., & Lansey, K. E. (1987). Reliability-based optimization model for water distribution systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(12), 1539-1556. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:12\(1539\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:12(1539))
- Swamee, P. K., & Sharma, A. K. (2008). *Design of water supply pipe networks*. John Wiley & Sons, Inc. <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/87985/4/P.K.%20Swamee%20and%20A.K.%20Sharma%20%282008%29%20Design%20of%20Water%20Supply%20Pipe%20Network.pdf>

-
- Villalba, G., & Saldarriaga J. G. (2005). Algoritmos de optimización combinatorios (AOC) aplicados al diseño de redes de distribución de agua potable. *Revista de Ingeniería*, 22, 118-125.
<http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n22/n22a14.pdf>
- Volokh, K. (2002). On foundations of the Hardy Cross method. *International Journal of Solids and Structures*, 39(16), 4197-4200. doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(02\)00345-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(02)00345-1)
- Walski, T. M. (2006). A history of water distribution. *Journal American Water Works Association*, 98(3), 110-121. doi: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07611.x>