



Quinto  
Congreso Nacional  
de Riego y Drenaje  
**COMEII-AURPAES 2019**

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



**Artículo: COMEII-19045**

*Mazatlán, Sin., del 18 al 20*

*de septiembre de 2019*

## **DISEÑO DE REDES DE RIEGO CON UN MÉTODO BASADO EN PÉRDIDAS UNITARIAS**

**Martín Rubén Jiménez Magaña<sup>1\*</sup>; Martha Bautista Hernández<sup>2</sup>; José Juan Aguilar Cabrera<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México. Avenida Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Nezahualcóyotl, Estado de México.

[mr.jimenez@comunidad.unam.mx](mailto:mr.jimenez@comunidad.unam.mx) - 55 5623 1090 Ext. 39221 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Posgrado de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Estado de México.

<sup>3</sup>Laboratorio de Hidráulica, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México.

### **Resumen**

Se presenta un método, que, sin llegar a determinar los diámetros óptimos, porque no involucra costos, sino solamente funcionamiento hidráulico, es de muy fácil programación y se puede hacer una rutina que ligada con un software como Epanet, sea una herramienta útil en la toma de decisiones. El método se basa en las pérdidas unitarias para seleccionar los diámetros más adecuados para una red con un trazo determinado; se establece una pérdida unitaria máxima y el algoritmo junto con Epanet, que se utiliza como herramienta de análisis hidráulico en flujo permanente, de manera automática va sustituyendo diámetros comerciales hasta que se alcance un criterio de paro previamente establecido, en este caso, satisfacer la condición de pérdida unitaria máxima. Los resultados se comparan con los obtenidos para redes a presión mediante el empleo de otras metodologías, de ello se observa que, a pesar de no ser la red más barata posible, sí cumple con las restricciones hidráulicas de presión y velocidad; tiene la ventaja de ser muy fácil de programar y de emplear tiempos de cómputo menores que los requeridos por alguna técnica heurística. Se prueba la bondad del método con una red abierta de escritorio, aunque el método también funciona adecuadamente para redes cerradas.

Si bien es un método poco sofisticado, tiene la ventaja de no utilizar códigos complejos, puede ser empleado en el ámbito académico para mostrar a los estudiantes una técnica sencilla y funcional o en el ejercicio profesional con resultados bastante aceptables y que se pueden obtener en muy poco tiempo.

**Palabras claves:** Epanet, velocidad y presión mínima, redes presurizadas.



## Introducción

Una red de riego a presión es un sistema compuesto por pozos, almacenamientos, tuberías y válvulas de diferentes tipos, conectados entre sí con el objeto de llevar el agua hasta el usuario final, en este caso, las tomas granja ubicadas en las diferentes parcelas. Cabe mencionar que la metodología presentada en este trabajo es útil para el diseño de redes, ya sean para riego o para abastecimiento de agua potable en zonas urbanas.

La agricultura de riego es uno de los mejores caminos para satisfacer el incremento de la demanda de alimentos y, hasta el momento, la seguridad alimentaria sigue dependiendo casi por completo del riego. En México, la agricultura utiliza métodos de riego por gravedad (melgas y surcos) y sistemas de riego presurizado, este último representa apenas un porcentaje de 8%, respecto del total de tierras irrigadas, a pesar de que su eficiencia global es, en promedio, de 82%; muy superior al riego tradicional. En la actualidad, las redes de tuberías para riego constituyen una excelente alternativa para evitar el desperdicio del vital líquido y producir mayores cantidades de alimentos posibilitando el uso de sistemas de riego presurizado. (Ángeles, 2013).

El objetivo de este trabajo es entonces, proponer una metodología sencilla y alternativa a las existentes para que sirva de apoyo a los ingenieros en irrigación o ingenieros hidráulicos encargados del diseño de una red de distribución, ya sea para abastecimiento o para riego. Existen técnicas, como los algoritmos genéticos o el PSO (Particle Swarm Optimization), que, si bien son bastante robustas, requieren de códigos complejos para un adecuado funcionamiento. En ocasiones suele hacerse distinción entre redes abiertas o cerradas, la metodología aquí presentada funciona de igual manera para ambos casos.

El diseño de una red consiste, una vez que se cuenta con el trazo en planta y los gastos de demanda a satisfacer, en seleccionar, dentro de un conjunto de diámetros comerciales disponibles para un cierto material, el diámetro más adecuado para cada tramo de tubería que forma parte de la red; de tal manera que la red una vez formada cumpla con ciertas restricciones hidráulicas, a saber, presión y velocidad mínimas y máximas. Si se trata de un diseño óptimo, no sólo se deben satisfacer las restricciones hidráulicas, además, la red debe ser la más barata posible.

Existen muchos métodos propuestos para el diseño de redes, se mencionarán dos catalogados dentro de los análisis consecutivos direccionados.

*Rosales et al.* (2002) El método propuesto utiliza un modelo estático para realizar los análisis hidráulicos consecutivos, además de que utiliza diámetros comerciales y no necesita que los gastos iniciales se fijen de antemano. El fundamento del método es establecer una jerarquización basada en relaciones del número de Reynolds máximo, para una determinada combinación de diámetros, con respecto a los números de Reynolds en todos los tramos de tubería para la misma combinación.



En cada iteración se analizan tantos casos como número de tuberías se tengan en la red, y se seleccionará aquella opción que implique la mayor relación beneficio/costo. El beneficio en este caso está relacionado con el incremento en la presión para el nudo de menor carga del sistema.

*Tzatchkov y Alfonso (1991)* presentan un procedimiento para seleccionar los diámetros óptimos de una red de tuberías. La selección se efectúa entre un surtido de diámetros discretos y está sujeta a condiciones de velocidad máxima en los tramos, presión mínima en los nodos y costo mínimo de la red. La solución parte de suponer los diámetros de las tuberías, e iterativamente realizar el cálculo hidráulico de la misma, cambiando el diámetro de un tramo si no se cumplen las condiciones hidráulicas. El método está basado en el cociente entre la velocidad máxima y la velocidad en cada tramo de tubería para una combinación dada de diámetros comerciales. Se evalúa también el déficit de presión en los nudos, tomando como referencia la presión mínima en el sistema para una combinación dada.

### **Método propuesto**

Se asume que se cuenta con el trazo de la red, la topografía del sitio y los gastos a satisfacer en función de la superficie a ser regada y el cultivo a producir; como esta metodología también sirve para el diseño de redes de distribución de agua potable, de la misma manera, se asume que se tiene el trazo de la red, la topografía de la localidad y que se han estimado los gastos para satisfacer las necesidades de la población.

Una vez que se ha decidido de qué material será la red, se genera un archivo de texto que contiene los diámetros comerciales disponibles para el material seleccionado. El proceso de selección o asignación de diámetros para un determinado tramo de la red se hace con base en la pérdida unitaria que se genera en los diferentes tramos para una combinación dada. El proceso se lista a continuación:

1. Se asigna el diámetro más pequeño, dentro del conjunto de diámetros comerciales disponibles, a todos los tramos de tubería de que se conforma la red.
2. Se genera un archivo de texto que es evaluado por Epanet, éste genera un archivo de salida del que se obtiene de manera directa la pérdida unitaria en m/km para cada tramo de tubería de la red. Cabe aclarar que se hacen simulaciones en flujo permanente.
3. Se revisa la totalidad de las tuberías y si alguna o varias de ellas tienen una pérdida unitaria superior al valor establecido como límite superior, entonces a ese tramo se le asigna el diámetro superior inmediato.
4. Se repiten los pasos dos y tres hasta que todos los tramos tengan un valor de pérdida unitaria inferior a la establecida como límite superior, y en este caso también, como criterio de paro del programa.

El código de la metodología está escrito en Matlab y vinculado con Epanet para realizar las simulaciones hidráulicas de manera automática; una vez alcanzado el criterio de paro,

se genera un archivo con el formato INP empleado por Epanet para utilizar todas las capacidades que éste brinda en el análisis de redes a presión, por ejemplo, visualización de resultados de manera gráfica o tabular o mediante un archivo de texto.

El valor máximo de pérdida unitaria establecido depende de la longitud de la red, para redes pequeñas, se recomiendan valores que oscilan entre 10 y 50 m/km, en cambio para redes grandes se recomienda utilizar valores cercanos a 1 m/km. En la Figura 1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta.

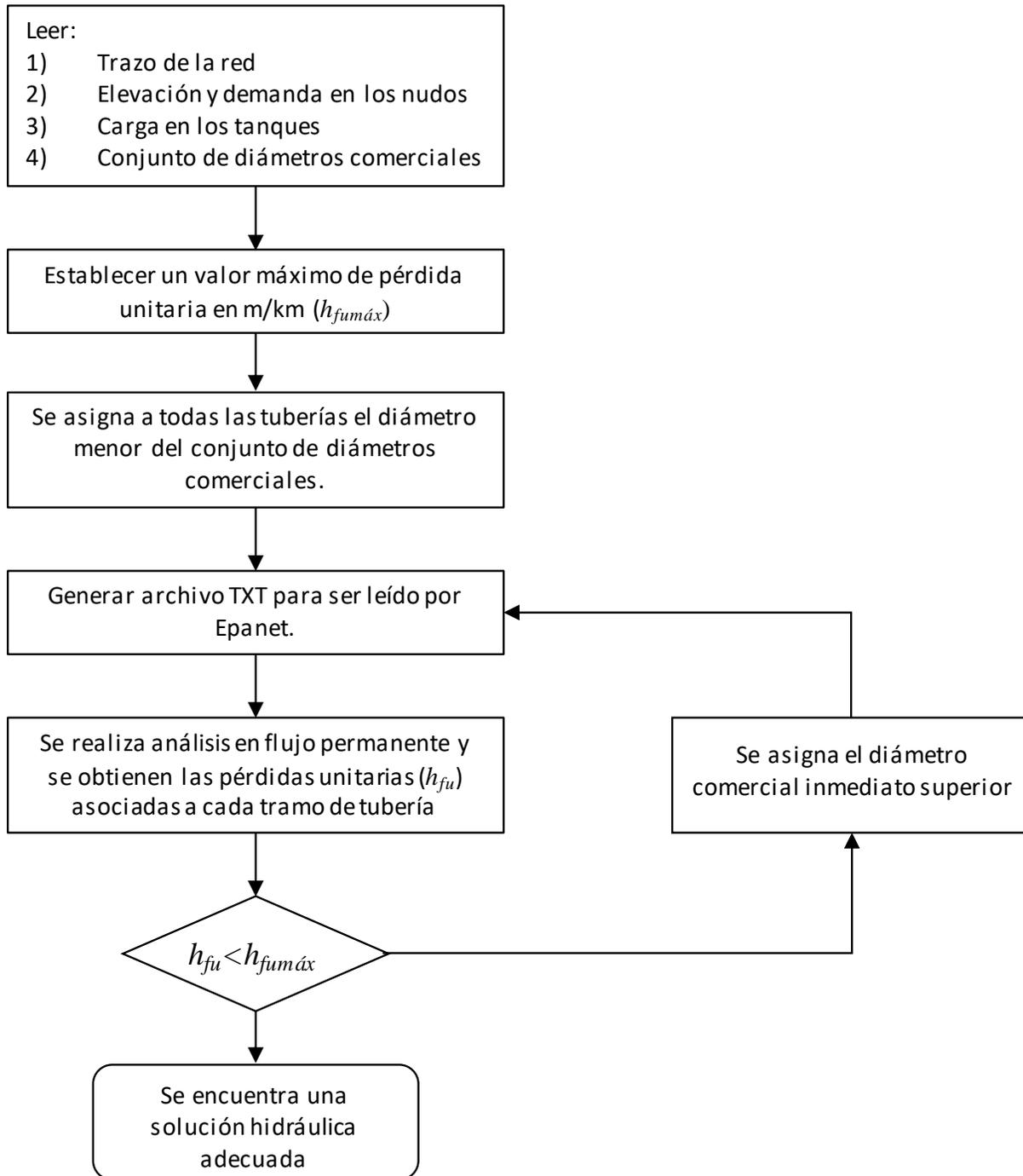
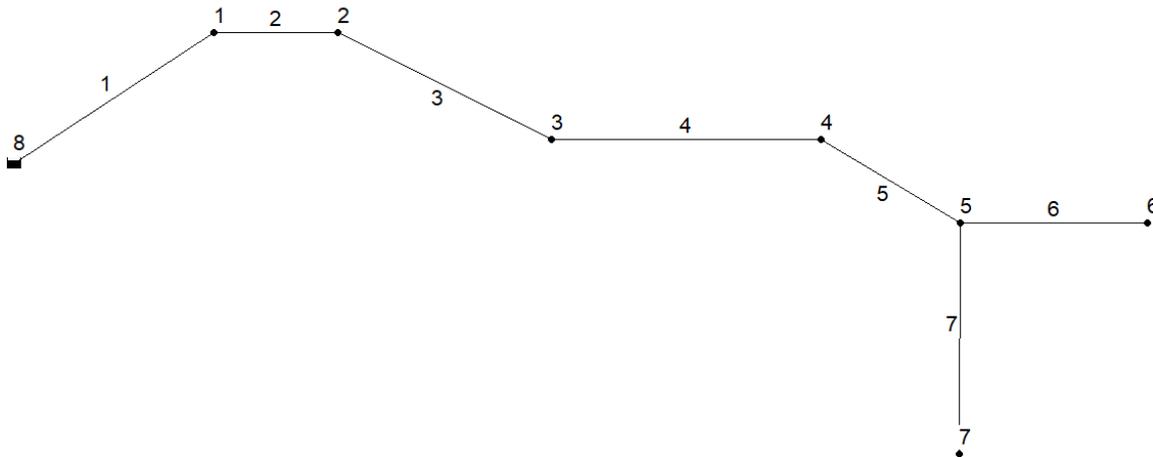


Figura 1. Diagrama de flujo del procedimiento propuesto.

## Resultados y Discusión

Para probar la bondad del método propuesto se trabajó con una red abierta de escritorio; la red fue propuesta por Rosales (2012), se decidió utilizar una red abierta porque, generalmente, las redes de riego son de este tipo, pero el método no está limitado a redes abiertas.

Red 1. Propuesta por Rosales (2012). La Figura 2 muestra el trazo de la red y el Cuadro 1, los datos necesarios para diseñar la red. Para el diseño de esta red se pide que la carga de presión mínima sea de 10 mca (metros de columna de agua). Se trata de una red abierta, como muchas veces suelen ser las redes de riego, con 7 tuberías y 7 nudos de suministro ya sea para abastecimiento de agua en una población o para el riego de cultivos en un distrito de riego. Se tiene un conjunto de 5 diámetros comerciales (2", 2.5", 3", 4" y 6") lo que da un total de 78,125 combinaciones posibles. La rugosidad de las tuberías es de 0.0225 mm.



**Figura 2.** Trazo de red abierta, Rosales (2012).

**Cuadro 1.** Datos del trazo y topografía de la Red 1. ( $H_T$  representa la carga total en el tanque)

	Elevación	Demanda		Longitud
Nudo	m	l/s	Tubería	m
1	912.67	0	1	43.9
2	911.08	0.389	2	10.9
3	908.17	0.402	3	57.7
4	901.91	1.085	4	155.8
5	899.45	0.438	5	62.9
6	893.27	0.348	6	50
7	901.58	2.44	7	85
<b><math>H_T</math> (m)</b>	923.45			

Para esta red cuya longitud total no supera los 500 m, por tratarse de una red de escritorio, se utilizó una pérdida máxima unitaria de 40 m/km. Los resultados obtenidos con el programa codificado, utilizando la metodología propuesta, se presentan en el Cuadro 2.

De resultados se observa que para la combinación de diámetros obtenidos se cumple con no tener una pérdida unitaria mayor de 40 m/km, salvo la velocidad en la tubería 2 todas las demás se encuentran dentro del límite mínimo permisible. Y todos los nudos cumplen con la carga de presión que se estableció como mínima, es decir, 10 mca.

**Cuadro 2.** Diámetros obtenidos y funcionamiento hidráulico de la Red 1.

Tubería	D (mm)	Q (l/s)	V (m/s)	$h_{fu}$ (m/km)	Nudo	Carga P (m)	Piezométrica (m)
1	76.2	5.1	1.12	16.77	1	10.04	922.71
2	76.2	5.1	1.12	16.77	2	11.45	922.53
3	63.5	4.71	1.49	35.51	3	12.31	920.48
4	63.5	4.31	1.36	30.11	4	13.88	915.79
5	63.5	3.23	1.02	17.67	5	15.23	914.68
6	50.8	0.35	0.17	0.98	6	21.36	914.63
7	50.8	2.44	1.2	31.63	7	10.41	911.99

En el Cuadro 3 se muestra una comparativa de los resultados obtenidos para el diseño de la red con tres metodologías diferentes, análisis consecutivos direccionados, algoritmo genético y el método presentado en este trabajo.

**Cuadro 3.** Comparación de resultados con tres métodos diferentes.

Tubería/Nodo	Rosales (2012)		Algoritmo Genético		Pérdida unitaria	
	D (mm)	P (mca)	D (mm)	P (mca)	D (mm)	P (mca)
1	76.2	10.04	76.2	10.04	76.2	10.04
2	63.5	11.19	63.5	11.19	76.2	11.45
3	63.5	12.05	63.5	12.05	63.5	12.31
4	63.5	13.62	63.5	13.62	63.5	13.88
5	63.5	14.96	63.5	14.96	63.5	15.23
6	50.8	21.09	50.8	21.09	50.8	21.36
7	50.8	10.15	50.8	10.15	50.8	10.41

Aunque los resultados obtenidos por Rosales (2012) y el Algoritmo Genético empleado por los autores del presente trabajo llegan al mismo resultado, cabe hacer algunos comentarios al respecto, por ejemplo, los tiempos de computo, Rosales reporta que fueron varias horas, al AG (algoritmo genético) le tomó 2 minutos revisar una fracción de 0.01% del espacio de búsqueda total, si se toma en cuenta que se tienen 5 posibles diámetros para cada una de las 7 tuberías que forman la red. En el caso del método presentado basado en las pérdidas unitarias, el resultado es un poco más caro, si se



tomaran en cuenta los costos, pues el tramo 2 tiene un diámetro mayor que el obtenido por Rosales (2012) y por el Algoritmo Genético, pero a su favor se tiene que el tiempo en el que se obtiene ese resultado es solamente de 6 segundos, si sólo se hace referencia a los tiempos, puede resultar intrascendente, pero cuando se piensa en lo complejo de programar un algoritmo tan robusto como lo es el AG, o establecer un método que requiera de muchas iteraciones para llegar a un buen resultado, pues entonces se vuelve atractivo.

## Conclusiones

Se presenta un método para el diseño de redes presurizadas, que no hace distinción entre redes abiertas o cerradas, es una virtud si se tiene en cuenta que existen métodos que sí distinguen entre uno y otro tipo.

A pesar de no ser un método de diseño óptimo, pues no se toma en cuenta el costo de la red, se obtienen buenos funcionamientos hidráulicos, se respetan las restricciones hidráulicas establecidas y se puede concluir que es competitivo con técnicas mucho más robustas como lo es un algoritmo genético.

Es un método bastante sencillo de programar y se llega a buenos resultados hidráulicos en tiempos muy pequeños comparados con los empleados por técnicas mucho más robustas y complejas en su programación.

Se presenta un método vinculado con Epanet, esto permite explotar todas las potencialidades del software.

La metodología se puede utilizar perfectamente en redes reales y tiene la ventaja, a diferencia de algunas heurísticas, de no mezclar diámetros grandes con pequeños en redes abiertas con gran desnivel topográfico, que claramente se observa, que son del tipo telescópicas, es decir con diámetros decrecientes en el sentido de la circulación del flujo.

La pérdida máxima unitaria empleada como criterio de paro del algoritmo depende de la longitud total de la red, es lógico, porque finalmente, una vez seleccionado un diámetro para un determinado tramo, la pérdida es función de la longitud, si la longitud total es pequeña, se requieren grandes pérdidas unitarias para satisfacer las restricciones de presión, en cambio, si la longitud total es grande, se requieren pequeñas pérdidas unitarias que en una longitud muy grande generan grandes pérdidas para satisfacer las restricciones de presión.

Todo es susceptible de mejora, en ese sentido, se pretende hacer de este código-metodología un programa ejecutable de distribución gratuita para quienes quieran hacer uso de él como un apoyo en el diseño de redes a presión.

## Referencias Bibliográficas

Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 6, pp. 885-900.

Ángeles, V. (2013). Redes abiertas de tuberías para riego. Edición de la Universidad Autónoma Chapingo.



- Carrillo, J., Islas, U., Gómez, H., Vega, E. (1998). Selección de las tuberías de una red de distribución de agua potable para que sea eficiente y económica. XVIII Congreso latinoamericano de hidráulica, Oaxaca, México.
- Dandy, G.C., Simpson, A.R., and Murphy, L.J. (1996). An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resources Research*, Vol. 32, No.2, pp. 449-458.
- Jiménez, M. (2004). Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético. Tesis, Posgrado Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Rosales, I. (2012). Propuesta de métodos para revisión, rehabilitación y diseño de redes de tuberías de agua potable. Tesis, Posgrado Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Rosales, I., De Luna, F., Vega, E., Fuentes, O. (2002). Método para diseño óptimo de redes de distribución de agua potable. Seminario hispano-brasileño sobre planificación, proyecto y operación de redes de abastecimiento de agua". Valencia, España.
- Savic, D.A., and Walters, G.A. (1997). Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol 123, No. 2, pp. 67-77.
- Tzatchkov, V., Alfonso, M. (1991). Diseño óptimo de redes hidráulicas mediante análisis consecutivos direccionados. Seminario internacional sobre uso eficiente del agua. México, D.F., Págs. 635-342.