

1

Diseño Optimizado De Redes De Distribución De Agua Mediante Programación No Lineal.

*Optimized Design Of Water Distribution
Networks Using Nonlinear Programming.*

Autores

Fredy Alejandro Aguirre Morales

Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad Técnica de Machala,
faguirre@utmachala.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-1592-5044>

Juan Carlos Berrú Cabrera

PhD en Ciencias Ambientales, Magíster en Gestión de la Construcción, Magíster en Docencia
Universitaria e Investigación, Universidad Técnica de Machala
jberru@utmachala.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-0505-9135>

Marco Antonio Tacurí Rivas

Magíster en Ingeniería de la Construcción, Universidad Técnica de Machala,
mtacuri@utmachala.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-7466-8076>

Javier Oyola Estrada

Magister en Gestión de la Construcción, Magister en Ingeniería en Vialidad y Transportes,
Universidad Técnica de Machala,
eoyola@utmachala.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-4710-681X>

Diseño Optimizado De Redes De Distribución De Agua Mediante Programación No Lineal.

1

RESUMEN

En la búsqueda de soluciones eficientes para mejorar los sistemas de agua potable en regiones con recursos limitados, el uso de la programación no lineal ha emergido como un método prometedor para optimizar el diseño de redes de distribución de agua. Este enfoque permite identificar los diámetros mínimos de tuberías necesarios para minimizar los costos de implementación, mientras se cumplen todas las restricciones hidráulicas necesarias para un funcionamiento eficiente. La investigación presentada demuestra que, a través de la aplicación de modelos matemáticos no lineales, es posible alcanzar un equilibrio entre los costos y las especificaciones técnicas requeridas, como la presión y la velocidad del agua en la red, logrando mantener las ecuaciones de conservación de masa y energía en cada nodo y tramo de la red, respectivamente. Utilizando herramientas accesibles como hojas de cálculo con complementos como Solver, los ingenieros pueden implementar estos modelos en sus proyectos, facilitando el diseño óptimo que garantiza la adecuada distribución del agua a todos los puntos de consumo. Los resultados indican que en todos los casos estudiados se han cumplido las normativas y requisitos mínimos, asegurando caudales adecuados en cada punto de la red. Este avance no solo optimiza los recursos económicos, cada vez más escasos en países en desarrollo, sino que también promueve la adopción de prácticas de diseño más eficientes y accesibles para los ingenieros dedicados a la planificación de infraestructuras críticas como son los sistemas de agua potable.

Palabras claves: diseño optimizado, Epanet, programación no lineal, redes de distribución de agua

ABSTRACT

In the quest for efficient solutions to improve potable water systems in regions with limited resources, the use of nonlinear programming has emerged as a promising method to optimize the design of water distribution networks. This approach allows for identifying the minimum pipe diameters necessary to minimize implementation costs while meeting all the hydraulic constraints required for efficient operation. The presented research demonstrates that through the application of nonlinear mathematical models, it is possible to achieve a balance between costs and the technical specifications required, such as pressure and water velocity in the network, maintaining the conservation equations of mass and energy in each node and segment of the network, respectively. By utilizing accessible tools like spreadsheets with add-ons such as Solver, engineers can implement these models in their projects, facilitating the optimal design that guarantees the adequate distribution of water to all consumption points. The results indicate that in all studied cases, the regulations and minimum requirements have been met, ensuring adequate flow rates at each point in the network. This advancement not only optimizes the increasingly scarce economic resources in developing countries but also promotes the adoption of more efficient and accessible design practices for engineers dedicated to the planning of critical infrastructures such as potable water systems.

Keywords: optimized design, Epanet, non-linear programming, water distribution networks

Nota Editorial: Recibido: Mayo 2024 Aceptado: Diciembre 2024

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más importante para la vida y está asociada a diferentes aspectos de la civilización humana, desde la subsistencia hasta la producción y el desarrollo económico. A pesar de esto, el abastecimiento de agua sigue siendo un grave problema a nivel mundial. Según la OMS, hasta el año 2017 un tercio de la población mundial no tenía acceso al servicio de agua potable en sus viviendas [1].

En Ecuador, si bien la cobertura de agua potable alcanzó el 84.4% en 2023 [2], persisten brechas significativas en zonas rurales y urbano-marginales. Ante esta realidad, se propone una red de distribución hipotética como herramienta para optimizar el diseño y la gestión de sistemas de abastecimiento de agua; este modelo servirá como referencia para futuros proyectos, permitiendo reducir costos y mejorar la eficiencia en la entrega del servicio, contribuyendo así a ampliar la cobertura y garantizar el acceso universal a este recurso vital.

Una red de distribución de agua es un conjunto de tuberías, accesorios y diversas estructuras que conducen agua desde los tanques de almacenamiento hasta las conexiones domiciliarias e hidrantes para control de incendios. Su finalidad es abastecer de agua para consumo doméstico, comercial, industrial y público, la red debe prestar el servicio de forma continua, en cantidad suficiente, con la calidad establecida y la presión adecuada [3].

Las redes de distribución de agua potable son estructuras muy importantes que entregan agua desde las plantas de tratamiento hasta los usuarios finales. El diseño de las redes es un problema complejo, en el que el diseñador busca el diseño óptimo para garantizar que el servicio sea continuo y de calidad [4].

Los diámetros de las tuberías entre los nudos o conexiones pueden variar, esta situación hace que el comportamiento y diseño de la red sea complejo, por lo que el principal desafío que enfrentan los ingenieros es lograr una solución que cumpla con determinadas restricciones de caudal y presión, a un costo razonable [5].

El comportamiento del agua en una red de distribución está gobernado por ecuaciones lineales, que son la conservación de la masa en los nudos, y ecuaciones no lineales, las de conservación de la energía en cada malla. En la etapa de diseño, el problema es muy complejo, debido a que existen múltiples combinaciones de diámetros de tuberías que cumplen con las restricciones de carácter hidráulico. Sin embargo, al incluir la variable costo de las tuberías, se incrementa el número de variables, lo que dificulta encontrar una solución óptima [6].

Desde 1970, se han venido investigando diferentes metodologías para lograr diseños óptimos de redes de agua potable, con el objetivo de lograr soluciones más económicas. Para la solución de este problema se han empleado diferentes técnicas de optimización como algoritmos genéticos, simulated annealing, técnicas de programación lineal y no lineal [7].

En el presente trabajo se ha utilizado la programación no lineal por medio del complemento Solver de la hoja de cálculo Excel de tal manera que se ajusten los valores de las celdas variables, diámetros y caudales hasta que se cumplan los límites de las celdas de restricción de presiones y velocidades y den el resultado en la celda objetivo que corresponde al costo mínimo de la red.

Para esto se ha tomado como referencia una red de agua potable con dos mallas y ocho tramos de tuberías. Conocida la estructura de la red, se planea el sistema de ecuaciones de conservación, así como las restricciones a cumplir y se programa la hoja de cálculo, para que busque entre las múltiples opciones de combinación de diámetros una solución que se ajuste al mínimo costo de la red.

Objetivo general: Optimizar el diseño de redes de agua potable mediante la determinación de los diámetros mínimos de las tuberías y la reducción del costo total, cumpliendo con todas las restricciones técnicas establecidas, utilizando programación no lineal.

Objetivos específicos:

- Diseñar una red de agua potable mallada cumpliendo con los principios de conservación de la masa, energía y restricciones de velocidades y presiones.
- Emplear herramientas computacionales accesibles, como el Excel y su complemento Solver, para facilitar el diseño de redes de agua potable eficientes y económicas.
- Analizar el impacto del modelo desarrollado, en función del costo de la red, considerando diámetros discretos ajustándose a los requerimientos de diseño de redes malladas.

2. METODOLOGÍA

Cuando se proyecta una red se pueden tener dos escenarios, el primero, es el análisis de una red que permite conocer su funcionamiento identificando todos sus elementos longitudes y diámetros de tuberías, cotas y caudales de los nudos, tanques, bombas, etc.; con esta información se puede obtener los caudales y presiones en los diferentes puntos de la red. El otro escenario es el diseño en el que deben seleccionarse los diámetros de las tuberías y por ende los caudales para que el sistema funcione de manera óptima [8].

Sin embargo, hay distintos aspectos que deben tenerse en cuenta en el diseño de la red para que el diseño sea óptimo, tales como la operación y mantenimiento, por lo que se añaden variables de naturaleza hidráulica y económica. Para el presente proyecto solamente se han considerado los costos de construcción y entre estos al rubro más representativo que representan las tuberías [9].

Se ha utilizado un modelo matemático de programación no lineal para el dimensionamiento económico de redes malladas, en el que los diámetros y caudales de los tramos son las variables a determinar, cumpliendo con las presiones mínimas establecidas dentro de un rango de velocidades recomendadas, tomando en cuenta que el agua es distribuida desde un tanque que tiene cota conocida [10].

La función objetivo a minimizar en el diseño de redes de agua potable es la suma de los costos de cada tramo de tubería, buscando reducir el costo total del sistema sin comprometer su funcionamiento hidráulico, en este caso se ha considerado solamente el costo de las tuberías que representa el 60 % del presupuesto de construcción de toda la red.

La representación matemática de la función objetivo es la siguiente:

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^{nt} L_i C_i \quad (1)$$

Donde C= Costo de la red de distribución en dólares.

C_i = Costo unitario por metro de tubería de diámetro i .

L_i = Longitud de la tubería del tramo i en m.

nt = Número de tramos

El principio de conservación de la masa establece que el caudal que ingresa al nudo debe ser igual al que sale del mismo.

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (2)$$

Donde:

Q_i = caudales que ingresan al nudo

Q_j = caudales que salen del nudo

n = número de nudos

El principio de conservación de la energía establece que la sumatoria de las pérdidas de energía en una malla es igual a cero.

$$\sum_{i=1}^n hf_i = 0 \quad (3)$$

Donde:

hf_i = pérdida de energía debido a la fricción en el tubo i

m = número de tubos en la malla.

Para el análisis y modelación, se ha considerado una red de distribución de agua, mostrada en la Figura 1, que funciona a gravedad, la misma que se abastece desde un tanque y está compuesta por dos mallas, con 8 tramos de tubería y 7 nodos. Además, la presión en cada nudo debe ser igual o superior al mínimo de 10 m, según lo establecido por la norma ecuatoriana, y las velocidades deben mantenerse entre 0.60 m/s y 2.50 m/s.

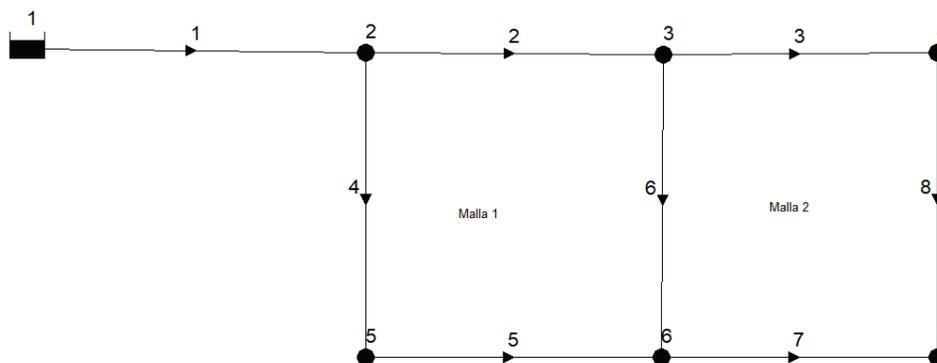


Figura 1: Red mallada abastecida desde un tanque

La información referente a las tuberías se muestra en la Tabla 1

Tabla 1: Datos de las tuberías

Tramo	Coefficiente de Hazen – Williams C	Longitud (m)
1	140	1000
2	140	500
3	140	500
4	140	500
5	140	500
6	140	500
7	140	500
8	140	500

Los datos de los nudos se muestran en la Tabla 2

Tabla 2: Cota y caudales en los nudos

Nudo	Cota nudo(m)	Caudal demandado en el nudo qi(l/s)
1	25,00	0,00
2	0,00	4,00
3	0,00	7,00
4	0,00	5,00
5	0,00	10,00
6	0,00	8,00
7	0,00	6,00

El costo por metro de tuberías de PVC ha sido determinado en base a sus precios referenciales de mercado, para el efecto se utilizó el método de los mínimos cuadrados para obtener una ecuación tipo potencial que representa el costo de un metro de tubería en función del diámetro interior [11].

$$C_u = 0,000944 * D^{1.959377} \quad (4)$$

Donde:

C_u =Costo de la tubería de PVC en dólares/metro

D =Diámetro interior del tubo en milímetros.

Las pérdidas por fricción han sido calculadas utilizando la fórmula de Hazen – Williams.

$$hf = \frac{10.674 L Q^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.871}} \quad (5)$$

Donde:

L = Longitud de la tubería en metros.

Q = Caudal en m³/s.

C = Coeficiente de Hazen – Williams

D = Diámetro interior de la tubería en metros.

Para el presente caso se han despreciado las pérdidas menores que se producen en los accesorios.

Aplicando el principio de conservación de la masa en cada nudo se tiene las ecuaciones en cada nudo, mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3: Ecuaciones de conservación de la masa en cada nudo de la red

Nudo	Ecuación en cada nudo
2	$Q_1 = Q_2 + Q_4 + Q_{n2}$
3	$Q_2 = Q_3 + Q_6 + Q_{n3}$
4	$Q_3 = Q_8 + Q_{n4}$
5	$Q_4 = Q_5 + Q_{n5}$
6	$Q_5 + Q_6 = Q_7 + Q_{n6}$
7	$Q_7 + Q_8 = Q_{n7}$

Aplicando las ecuaciones de conservación de la energía en cada malla, se obtienen las siguientes ecuaciones. Se ha asumido la dirección del flujo en base a la estructura de la red y se ha considerado que las pérdidas de energía en sentido horario son positivas y en el antihorario negativas [12].

Malla 1

$$hf_2 + hf_6 - hf_4 - hf_5 = 0 \quad (12)$$

Malla 2

$$hf_3 + hf_8 - hf_6 - hf_7 = 0 \quad (13)$$

Para la red analizada en el presente trabajo se plantean ocho ecuaciones no lineales, si los diámetros fueran conocidos el problema se puede resolver por métodos como el de Newton – Raphson o matriciales. Pero en el caso de diseño se tienen diez y seis incógnitas por lo que no se podría aplicar los métodos antes mencionados.

Se ha considerado que existen 11 diámetros disponibles en tubería de PVC para ser utilizados en el diseño, los cuales se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Diámetros de las tuberías

No.	Diámetro interior (mm)
1	333,30
2	295,40
3	234,40
4	187,60
5	150,00
6	131,60
7	103,20
8	84,40
9	70,40
10	59,00
11	47,00

Considerando que se tiene 8 tramos de tubería y 11 diámetros factibles de utilizar, se pueden presentar $11^8 = 2,14 \times 10^8$ posibles combinaciones de diámetros lo que confirma la complejidad del problema de diseño solamente en esta red que es relativamente pequeña [13].

Cuando no se dispone de herramientas tecnológicas apropiadas la manera de resolver este tipo de problemas es utilizar la prueba y error, pero resulta ser un método ineficiente y se hace imposible la solución debido a la enorme cantidad de posibles combinaciones.

Tradicionalmente se ha utilizado la programación lineal que consiste en transformar las ecuaciones no lineales en lineales para facilitar la resolución, hasta lograr aproximar los diámetros discretos disponibles que estén más cercanos a los teóricos calculados, pero el inconveniente de este método es que estos algoritmos no pueden obtener óptimos globales y en ocasiones se obtienen soluciones inadecuadas que no son factibles [14].

En la programación no lineal se trata de resolver un sistema de igualdad y desigualdades sujetas a varias restricciones, las cuales pueden ser lineales o no lineales. El objetivo es maximizar o minimizar la función objetivo [15].

El análisis y diseño de un sistema de red de agua potable es una tarea compleja que demanda mucho tiempo. Actualmente existen softwares de uso comercial como Watercad, Mike, Hidrasoftware, etc. que realizan el diseño de sistemas de tuberías, pero son costosos y se requiere de capacitaciones permanentes, por lo que no están al alcance de los ingenieros en los países en vías de desarrollo [16].

En el presente trabajo se ha utilizado la hoja de cálculo Excel con su complemento Solver con el método de resolución GRG que usa el Algoritmo de Gradiente Reducido Generalizado para optimizar problemas no lineales. Este algoritmo fue desarrollado por León Lasdon, de la Universidad de Texas en Austin, y Allan Waren, de la Universidad Estatal de Cleveland [17].

En la tabla 5, se muestran los datos ingresados a la hoja de cálculo,

Tabla 5: Datos de los tramos de tubería

Tramo	Caudal Q (l/s)	Diámetro (mm)	Coefficiente de HW	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Pérdida de energía por fricción hf (m)	Precio Unitario \$	Precio Total \$
1	40,0	231,0	140	1000	1,0	3,666	40.40	40,396.39
2	19,0	175,3	140	500	0,8	1,767	23.51	11,753.68
3	7,5	126,0	140	500	0,6	1,573	12.32	6,161.31
4	17,0	160,0	140	500	0,8	2,260	19.66	9,832.25
5	7,0	122,3	140	500	0,6	1,630	11.61	5,805.22
6	4,5	97,5	140	500	0,6	2,124	7.45	3,723.21
7	3,5	86,4	140	500	0,6	2,444	5.88	2,940.44
8	2,5	72,6	140	500	0,6	2,995	4.18	2,090.82
							Total	82,703.31

Las columnas que corresponden a Tramo, Coeficiente de Hazen – Williams y Longitud son datos de la red.

Las columnas de Caudal y Diámetro son los valores suministrados por el complemento Solver de Excel que cumplen con las restricciones establecidas para que el costo total de la red sea mínimo.

La columna de velocidad es calculada con la Ecuación de Continuidad, que establece que la velocidad es igual a:

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (14)$$

Donde:

V = Velocidad media en m/s.

Q = Caudal que fluye por el tramo de tubería en m³/s.

D = Diámetro interior de la tubería en m.

La pérdida de energía por fricción ha sido calculada utilizando la fórmula de Hazen – Williams. Las presiones dinámicas calculadas para cada nudo se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Datos de los nudos

Nudo	Caudal en el nudo qi(l/s)	Cota del terreno (m)	Presión dinámica (m)	Ecuación de continuidad en el nudo.
1	0,00	25,00	0,00	0,000
2	4,00	0,00	21,33	0,000
3	7,00	0,00	19,57	0,000
4	5,00	0,00	17,99	0,000
5	10,00	0,00	19,07	0,000
6	8,00	0,00	17,44	0,000
7	6,00	0,00	15,00	0,000

Las columnas que corresponden a Nudo, Caudal en el nudo y Cota del terreno son datos de la red.

La presión dinámica se calcula aplicando la ecuación de la energía entre el tanque de almacenamiento y el nudo, con la siguiente fórmula:

$$\frac{P_i}{\gamma} = z_1 - hf_{acumulada} - z_i \quad (16)$$

Donde:

$\frac{P_i}{\gamma}$ = Presión dinámica en el nudo i en metros.

z_1 = cota del tanque de almacenamiento en metros.

$hf_{acumulada}$ = Sumatoria de las pérdidas por fricción en los tramos que unen el tanque con el nudo i en metros.

z_i = Cota del terreno en el nudo i en metros.

Las Normas de Diseño para sistemas de agua potable y alcantarillado para poblaciones urbanas establecen que la presión en la red de distribución de agua potable debe estar entre 10 y 50 mca, para el presente caso se ha establecido una presión mínima de 15 mca.

En la columna de ecuación de continuidad de cada nudo se establecen las ecuaciones de conservación de la masa, que indican que los caudales que ingresan a cada nudo deben ser iguales a los que salen del nudo.

En la columna de la ecuación de conservación de la energía se plantean las ecuaciones correspondientes de cada malla que deben ser iguales a cero.

En la hoja de cálculo Excel, utilizando el complemento Solver, observada en la Figura 2, se establecen las celdas correspondientes al objetivo, las celdas que contienen las variables a cambiar, las restricciones que deben cumplirse y el método de resolución GRG Nonlinear.

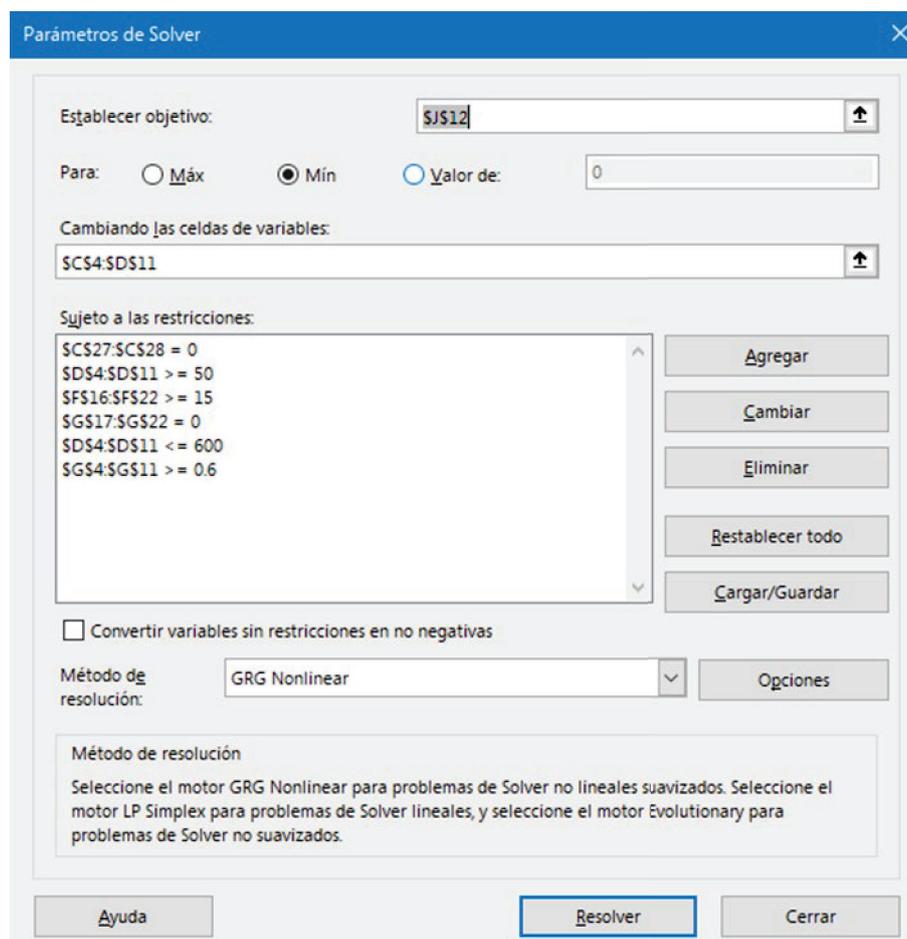


Figura 2: Parámetros para la resolución con Solver

La celda objetivo es la que contiene el presupuesto de la red, es decir la sumatoria de los precios de cada tramo de tubería. Esta celda es la que debe tener un valor mínimo.

Las celdas variables son las que contienen los diámetros interiores de las tuberías y los caudales que circulan en cada tramo.

Las restricciones se refieren a que la velocidad en cada tramo sea mayor a 0.60 m/s, las presiones dinámicas se encuentren entre la mínima establecida en el proyecto que es 15 mca, hasta un máximo de 50 mca, y las que calculan que la sumatoria de caudales en los nudos y de pérdidas de energía en las mallas sean iguales a cero, según se observa en la Tabla 7.

Tabla 7: Ecuaciones de la energía en cada malla

Malla No.	Ecuación de la energía en cada malla
I	0,00
II	0,00

En vista de que se está utilizando el método de programación no lineal se escoge el método de resolución GRG Non Linear.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, el problema fue resuelto mediante la herramienta Solver que busca entre miles de combinaciones de diámetros de tuberías la solución que se ajuste al mínimo costo cumpliendo con todas las restricciones ya indicadas,

En la siguiente, Tabla 8, se muestra la solución obtenida:

Tabla 8: Solución obtenida con Solver de Excel

Tramo	Caudal Q (l/s)	Diámetro (mm)	Coefficiente de HW	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Pérdida de energía por fricción hf (mca)	Precio Unitario \$	Precio Total \$
1	40,0	231,0	140	1000	1,0	3,666	40,40	40.396,39
2	19,0	175,3	140	500	0,8	1,767	23,51	11.753,68
3	7,5	126,0	140	500	0,6	1,573	12,32	6.161,31
4	17,0	160,0	140	500	0,8	2,260	19,66	9.832,25
5	7,0	122,3	140	500	0,6	1,630	11,61	5.805,22
6	4,5	97,5	140	500	0,6	2,124	7,45	3.723,21
7	3,5	86,4	140	500	0,6	2,444	5,88	2.940,44
8	2,5	72,6	140	500	0,6	2,995	4,18	2.090,82
							Total	82.703,31
Restricciones								
Nudo	Cota nudo (m)	Caudal en el nudo qi (l/s)	Cota del terreno (m)	Presión dinámica (m)	Ecuación de continuidad en el nudo.			
1	25,00	0,00	25,00	0,00	0,000			
2	0,00	4,00	0,00	21,33	0,000			
3	0,00	7,00	0,00	19,57	0,000			
4	0,00	5,00	0,00	17,99	0,000			
5	0,00	10,00	0,00	19,07	0,000			
6	0,00	8,00	0,00	17,44	0,000			
7	0,00	6,00	0,00	15,00	0,000			
Malla No.	Ecuación de la energía en cada malla							
I	0,00							
II	0,00							

Los diámetros obtenidos corresponden a valores teóricos que cumplen con todas las restricciones. El costo total de la red es de \$82,703.31. Para una solución definitiva, estos diámetros deben ajustarse a los disponibles para el proyecto, como se indicó en la Tabla 4.

Cabe indicar que los caudales corresponden a esos diámetros teóricos, por lo que al colocar los diámetros reales debe recalcularse los caudales, velocidades y presiones nuevamente.

Para el presente caso los diámetros adoptados para las tuberías, mostrados en la Tabla 9, se han considerado los de la Tabla 4 que sean mayores o iguales a los teóricos calculados

Tabla 9: Solución obtenida para los diámetros de las tuberías

Diámetro calculado por Solver (mm)	Diámetro adoptado (mm)
231,04	234,40
175,26	187,60
126,05	131,60
160,00	187,60
122,27	131,60
97,47	103,20
86,41	103,20
72,61	84,40

Una vez que se dispone de los diámetros de las tuberías, el problema se convierte en el análisis de la red para determinar las presiones y los caudales en las tuberías, verificando además las restricciones impuestas.

Para el efecto se ha utilizado EPANET, que es un programa que permite realizar simulaciones en periodos prolongados (uno o varios días) del comportamiento hidráulico y de la evolución de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Una red puede estar formada por tuberías, nudos, bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o embalses. EPANET efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación, discretizado en múltiples intervalos de tiempo [18].

Es importante señalar que EPANET interpreta la altura como la cota piezométrica, es decir, la presión se obtiene al restar la cota del terreno a la cota piezométrica.

Una vez ingresados los datos al programa mencionado, se procede a la simulación obteniendo los resultados que se muestran en las Figuras 3, 4 y 5.

ID Nudo	Cota m	Demanda LPS	Altura m	Presión m	Calidad
Conexión 2	0	4.00	21.59	21.59	0.00
Conexión 3	0	7.00	20.40	20.40	0.00
Conexión 4	0	5.00	19.19	19.19	0.00
Conexión 5	0	10.00	20.46	20.46	0.00
Conexión 6	0	8.00	19.11	19.11	0.00
Conexión 7	0	6.00	17.97	17.97	0.00
Embalse 1	25	-40.00	25.00	0.00	0.00

Figura 3: Resultados en los nudos mediante EPANET

ID Línea	Longitud m	Diámetro mm	Rugosidad	Caudal LPS	Velocidad m/s	Pérd. Unit. m/km	Factor de Fricción
Tubería 1	1000	234.4	140	40.00	0.93	3.41	0.018
Tubería 2	500	187.6	140	18.26	0.66	2.36	0.020
Tubería 3	500	131.6	140	7.28	0.54	2.42	0.022
Tubería 4	500	187.6	140	17.74	0.64	2.24	0.020
Tubería 5	500	131.6	140	7.74	0.57	2.71	0.022
Tubería 6	500	103.2	140	3.98	0.48	2.59	0.023
Tubería 7	500	103.2	140	3.72	0.44	2.28	0.023
Tubería 8	500	84.4	140	2.28	0.41	2.45	0.024

Figura 4: Resultados de los tramos mediante EPANET

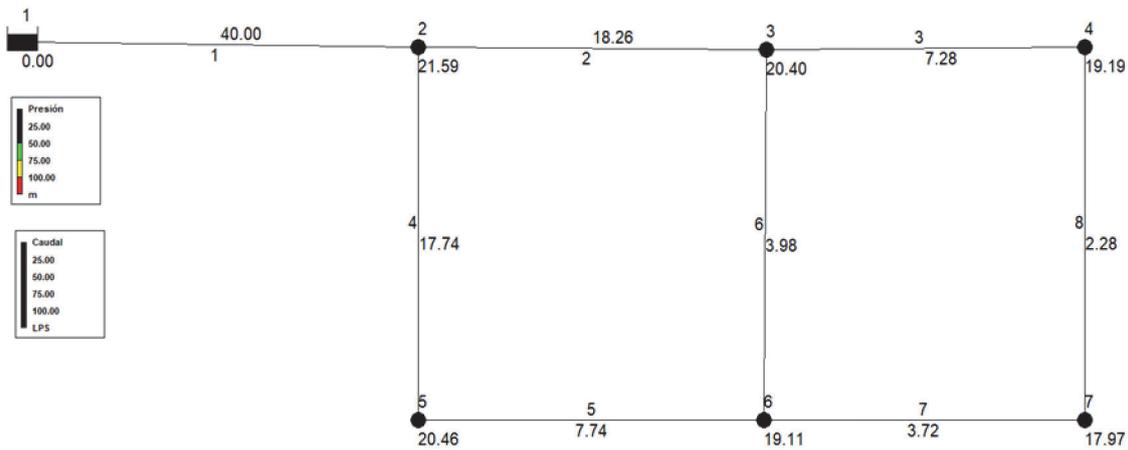


Figura 5: Caudales y presiones obtenidas mediante EPANET

Para comprobar los resultados obtenidos por EPANET, se ha utilizado otra hoja de cálculo en la que se ingresaron los diámetros reales de las tuberías. Nuevamente se utilizó el complemento Solver para resolver el sistema de 8 ecuaciones con igual cantidad de incógnitas, mostradas en la Tabla 10, las cuales son ahora los caudales que circulan por las tuberías.

Tabla 10: Ecuaciones de conservación de la masa y la energía

Ecuación	Observaciones
$Q_1 = Q_2 + Q_4 + Q_{n2}$	Nudo 2
$Q_2 = Q_3 + Q_6 + Q_{n3}$	Nudo 3
$Q_3 = Q_8 + Q_{n4}$	Nudo 4
$Q_4 = Q_5 + Q_{n5}$	Nudo 5
$Q_5 + Q_6 = Q_7 + Q_{n6}$	Nudo 6
$Q_7 + Q_8 = Q_{n7}$	Nudo 7
$r_2 Q_2^{1.852} + r_6 Q_6^{1.852} - r_4 Q_4^{1.852} - r_5 Q_5^{1.852} = 0$	Malla 1
$r_3 Q_3^{1.852} + r_8 Q_8^{1.852} - r_6 Q_6^{1.852} - r_7 Q_7^{1.852} = 0$	Malla 2

$$\text{Donde: } r = \frac{10.674 L}{C^{1.852} D^{4.871}} \quad (17)$$

Para el cálculo del término r para cada tramo, los valores de L, C y D son conocidos.

En la Tabla 11, se detallan los resultados, aplicando el complemento Solver para resolver el sistema de 8 ecuaciones con igual número de incógnitas. Se puede observar que se cumple la condición de que las presiones en los nudos sean mayores a 15 mca. de igual manera que las ecuaciones de conservación de la masa en cada nudo y de energía en cada malla sean iguales a cero. El costo total de la red es de \$92.957.64.

Si se compara con los hallazgos revelados con el programa EPANET, se puede observar que son similares, lo que demuestra que la hoja de cálculo permite obtener resultados satisfactorios para el análisis y diseño de redes de distribución de agua potable, además es de fácil manejo para el ingreso de datos y la obtención de los resultados.

Se debe anotar que, a pesar de que la hoja de cálculo permite determinar los diámetros de las tuberías de manera muy sencilla, no sustituye el criterio técnico que debe tener el diseñador para realizar el trazado de la red tomando en cuenta otros aspectos como el ambiental, socioeconómico, de operación y mantenimiento.

Tabla 11: Resultados del diseño de la red

Tramo	Caudal Q (l/s)	Diámetro teórico (mm)	Diámetro adoptado (mm)	Coefficiente de HW	Longitud (m)	Velocidad (m/s)	Pérdida de energía por fricción hf (mca)	Precio Unitario \$/m	Precio Total \$
1	40,000	231,0	234,4	140	1000	0,93	3,417	41,55	41.553,96
2	18,261	175,3	187,6	140	500	0,66	1,183	26,86	13.429,57
3	7,279	126,0	131,6	140	500	0,54	1,211	13,41	6.704,45
4	17,739	160,0	187,6	140	500	0,64	1,121	26,86	13.429,57
5	7,739	122,3	131,6	140	500	0,57	1,357	13,41	6.704,45
6	3,982	97,5	103,2	140	500	0,48	1,295	8,33	4.163,89
7	3,721	86,4	103,2	140	500	0,45	1,143	8,33	4.163,89
8	2,279	72,6	84,4	140	500	0,41	1,227	5,62	2.807,84
								Total \$	92.957,64
Restricciones									
Nudo	Cota nudo (m)		q en nudo (l/s)	Cota (m)	P. Disp (mca)	Eq contin. en nudo			
1	0,000		0,00	25,00	0,00	0,000			
2	0,000		4,00	0,00	21,58	0,000			
3	0,000		7,00	0,00	20,40	0,000			
4	0,000		5,00	0,00	19,19	0,000			
5	0,000		10,00	0,00	20,46	0,000			
6	0,000		8,00	0,00	19,10	0,000			
7	0,000		6,00	0,00	17,96	0,000			
Malla No.	Ecuación de la energía en cada malla								
I	0,000								
II	0,000								

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió, diseñar una red de agua potable mallada, obteniendo los diámetros teóricos que luego han sido ajustados a diámetros discretos, cumpliendo con todas las restricciones hidráulicas establecidas incluyendo la variable costo de la red como función objetivo a minimizar. Cumplido en el diseño de la red, los principios de conservación de la masa y de la energía, así como las restricciones establecidas previamente.

La integración de herramientas computacionales, como la hoja de cálculo Excel equipada con el complemento Solver, es de fácil manejo para los diseñadores y estudiantes de Ingeniería Civil, ya que permite obtener la combinación de los diámetros teóricos óptimos, los cuales han sido ajustados a diámetros discretos con el objetivo de realizar un análisis de la red y verificar su funcionamiento hidráulico, además, los resultados han sido verificados con el programa EPANET, para garantizar su efectividad y modelar la red en varios escenarios posibles.

Este estudio permitió identificar las ventajas y posibles desafíos al aplicar esta metodología en proyectos reales. También, permitió observar el comportamiento de las presiones dentro de la red en función de límites seguros y eficientes. A futuro se podrá incluir una valoración económica de costos a largo plazo, en donde se podrá incluir aspectos fundamentales como el mantenimiento, la vida útil de los materiales y el consumo energético.

En una futura investigación se podrá enlazar los programas Excel y EPANET, para facilitar el ingreso de los datos de la red y aprovechar la capacidad del simulador para modelar la red en otros aspectos importantes como simulador en periodo extendido y de calidad del agua.

- [1] M. Qiu, M. Housh, and A. Ostfeld, "A Two-Stage LP-NLP Methodology for the Least-Cost Design and Operation of Water Distribution Systems," *Water*, vol. 12, no. 5, p. 1364, May 2020. <https://doi.org/10.3390/w12051364>
- [2] Inec, "Medición de los ODS en Ecuador," *Boletín INEC*, 2023.
- [3] H. Mala-Jetmarova, N. Sultanova, and D. Savic, "Lost in Optimization of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design," *Water*, vol. 10, no. 3, p. 307, Mar. 2018. <https://doi.org/10.3390/w10030307>
- [4] Trębicka, A. Numerical modeling and rational methods of water supply network operations in environmental engineering systems. *Appl Water Sci* 13, 18 Jan. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01819-9>
- [5] Sutharsan, M. E. Optimizing the water distribution network of community water supply using different computer simulation techniques. *Journal of Science of the University of Kelaniya*, 16(1), 01-14. May. 2023. <http://doi.org/10.4038/josuk.v16i1.8070>
- [6] O. M. Awe, S. T. A. Okolie, and O. S. I. Fayomi, "Optimization of Water Distribution Systems: A Review," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1378, p. 022068, Dec. 2019. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022068>
- [7] H. Mala-Jetmarova, A. Barton, and A. Bagirov, "A History of Water Distribution Systems and their Optimization," *Water Sci. Technol. Water Supply*, vol. 15, no. 2, pp. 224–235, Feb. 2015. <https://doi.org/10.2166/ws.2014.115>
- [8] A. Chavan and U. L. Deshpande, "Design of Optimised Water Distribution System for Rural India with Reference To Jambhali, District-Satara, Maharashtra," *Journal of Indian Water Works Association*, vol. LII, no. July September 2020, pp. 65–70, jul. 2020. [\[Google Scholar\]](#)
- [9] N. Kourbasis, M. Patelis, S. Tsitsifli, and V. Kanakoudis, "Optimizing Water Age and Pressure in Drinking Water Distribution Networks," vol. 2, no. 1, p. 51, Sep. 2020. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2020002051>
- [10] M. Niazkari and S. H. Afzali, "Analysis of water distribution networks using MATLAB and Excel spreadsheet: Q-based methods," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 25, no. 2, pp. 277–289, Mar. 2017. [\[Google Scholar\]](#)
- [11] A. Moghaddam, A. Alizadeh, A. Faridhosseini, A. N. Ziaei, and D. F. Heravi, "Optimal design of water distribution networks using simple modified particle swarm optimization approach," *Desalination Water Treat.*, vol. 104, pp. 99–110, Jan. 2018. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.21911>
- [12] J. Saldarriaga, "Hidraulica de Tuberías." 2015.
- [13] R. Mansouri, H. Torabi, M. Hoseini, and H. Morshedzadeh, "Optimization of the Water Distribution Networks with Differential Evolution (DE) and Mixed Integer Linear Programming (MILP)," *J. Water Resource Prot.*, vol. 7, no. 09, pp. 715–729, Aug. 2015. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2015.79059>
- [14] Y. Wang, V. Puig, and G. Cembrano, "Non-linear economic model predictive control of water distribution networks," *J. Process Control*, vol. 56, pp. 23–34, Aug. 2017. [\[Google Scholar\]](#)
- [15] F. J. Martínez-Solano, P. L. Iglesias-Rey, J. G. Saldarriaga, and D. Vallejo, "Creation of an SWMM Toolkit for Its Application in Urban Drainage Networks Optimization," *Water*, vol. 8, no. 6, p. 259, Jun. 2016. , <https://doi.org/10.3390/w806>
- [16] M. R. Pinnto, M. A. H. de Castro, J. M. C. Barbosa, and J. V. F. Maia Júnior, "Dimensionamento econômico otimizado de redes de distribuição de água considerando custos de manutenção," *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 22, no. 1, pp. 145–153, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016140349>
- [17] D. Singh, P. S. Mahar, and R. P. Singh, "Optimal Design of Gravity-Fed Sewer Lines Using Linear Programming," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 100, no. 4, pp. 719–729, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09944-7>
- [18] A. Saad, A. Abdulkarim, A. Emran, F. Abdulsalam, M. Abdolgawad, and A. Saleh, "Hydraulic design of water distribution network by using AutoCAD and EPANET softwares: Case study," *Indian Journal of Science*, 2020, [10.13140/RG.2.2.22396.16007](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22396.16007)