

## DIMENSIONAMIENTO ECONÓMICO DE REDES RAMIFICADAS EN PRESIÓN. CASO DE ESTUDIO EN CENTROAMÉRICA

**Autor principal:** Pablo Blanco Gómez.

pablo.b@vielca.com; MSc Environmental Water Management e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Vielca Ingenieros, S.A; Director de proyectos hidráulicos.

**Coautores:** Vicente M. Candela Canales (Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Vielca Ingenieros, S.A., vicente.c@vielca.com) y Alejandro Belenguer González (Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Vielca Ingenieros, S.A., alejandro.b@vielca.com).

**Resumen:** Tradicionalmente no se contempla la optimización global de costes en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua porque los programas comerciales de diseño hidráulico no persiguen obtener la solución más económica.

La revisión literaria realizada muestra que los métodos de optimización actuales están basados en algoritmos evolutivos, cuya aplicación requiere de conocimientos avanzados de programación y sus variables se alejan del ámbito de aplicación de la hidráulica, por lo que su uso está restringido al ámbito científico.

Sin embargo, el uso de Programación Lineal para resolver problemas sencillos, como las redes ramificadas, es fácilmente programable en hojas de cálculo comerciales, como *MS Excel*, al tiempo que permite el intercambio de datos con el programa de cálculo hidráulico de manera directa.

El presente trabajo describe la metodología de optimización mediante Programación Lineal y la aplica a un caso de estudio en Centroamérica.

**Palabras clave:** Optimización económica de tuberías; Programación Lineal; Sistemas de abastecimiento de agua; Redes ramificadas

---

### INTRODUCCIÓN

---

Los sistemas de distribución de agua potable conectan las fuentes de agua con los usuarios a través de componentes hidráulicas como tuberías, válvulas, depósitos, tanques, etc. El diseño de estos sistemas o de sus ampliaciones requiere seleccionar el tamaño y el punto de funcionamiento de las distintas componentes (Shamir, 1974; Alperovits y Shamir, 1977; Zhou, Gao y Simpson, 2013).

Usualmente los costes de construcción de las redes de tuberías se encuentran entre el 60% (Sarbu, 2009) y el 70% (Kumar, Rao y Bandyopadhyay, 1998) de los costes totales del proyecto. Mientras que los costes de energía asociados a los bombeos suelen ser superiores al 60 % de los costes totales de operación del sistema (Sarbu, 2009).

Del mismo modo, el sistema deberá funcionar de manera apropiada ante diferentes demandas y niveles en los tanques y depósitos.

Bajo esta perspectiva, los criterios de operación deben formar parte del proceso de diseño puesto que no es viable separar los costes de construcción de los costes de operación en un sistema con una vida útil determinada, usualmente superior a 25 años (Alperovits y Shamir, 1977; Montalvo, Izquierdo, Pérez y Tung, 2008).

El presente trabajo parte de la definición básica del problema para introducir los métodos de optimización más usados en la actualidad, presentando las ventajas que aportan al estado del arte. Sin embargo, no es común la aplicación de estos criterios en los diseños de ampliaciones y nuevas redes de tuberías, por la complejidad de los métodos y la falta de integración en un paquete comercial de diseño.

La aplicación de los principios de optimización económica es sencilla de implementar en el caso de redes simples, como las ramificadas, mediante el uso de Programación Lineal (Alperovits y Shamir, 1977).

La integración de este método numérico en *MS Excel* – función *Solver* que resuelve el algoritmo *SIMPLEX* de Programación Lineal – permite optimizar el diseño de redes a partir de una red exportada de un programa de diseño, que una vez optimizada puede volver a ser importada en el mismo y comprobar su funcionamiento óptimo.

La metodología se aplica para un caso de estudio de una red ramificada en Centroamérica, donde el agua extraída de un sistema de pozos profundos alimenta un tanque de cabecera desde donde se da servicio a otros dos tanques reguladores.

---

## OBJETIVO

Presentar una metodología y aplicarla a un caso de estudio en Centroamérica para la optimización de costes de redes ramificadas de agua, dentro del conjunto de soluciones hidráulicamente factibles del problema.

Su facilidad de implementación y la capacidad de importación y exportación que presentan los paquetes de software comerciales de cálculo de redes de tuberías en *MS Excel*, facilitan el uso de la metodología para obtener soluciones de coste mínimo teniendo en cuenta tanto las componentes de construcción como de operación.

---

## METODOLOGÍA

### Presentación del problema

El problema consiste en disminuir los costes globales de una red de tuberías cumpliendo una serie de requisitos funcionales que arrojan soluciones realistas y factibles.

Los costes implicados en el problema se pueden clasificar en costes de construcción (o costes fijos) y costes de operación (o costes variables). La *Figura 1* representa los costes asociados a una red de distribución, donde destacan los costes de instalación de tuberías dentro de los costes fijos y los costes energéticos dentro de los costes variables:



*Figura 1. Costes globales de una red de distribución de agua (adaptados de Montalvo et al., 2008)*

En los casos en los que es necesario elevar un caudal de agua mediante una tubería de impulsión, la energía en términos de altura que debe generar la bomba es igual a la diferencia de cotas a vencer más las pérdidas de carga provocadas en la conducción.

- La diferencia geométrica de cotas depende de la topografía del terreno y de las necesidades de presión en el punto de desagüe, pero es independiente del diámetro de la tubería.
- Las pérdidas en la tubería, sin embargo, son dependientes del diámetro de la misma, produciéndose la siguiente situación:

- Las pérdidas de energía disminuyen al aumentar el diámetro de la tubería, disminuyendo en consonancia los costes de operación.
- El incremento del diámetro de la tubería implica el aumento de los costes de construcción de la red.

Para toda tubería de impulsión existirá una solución óptima que minimice la suma de costes de construcción (representados por los costes de amortización de tuberías) y de operación (representados por los costes energéticos) del sistema.

A esta definición del problema hay que añadirle la formulación en diámetros discretos del mismo, puesto que la solución deberá adaptarse a los diámetros disponibles comercialmente (Shamir, 1974; Alperovits y Shamir, 1977; Montalvo et al., 2008).

Del mismo modo, existen una serie de restricciones que debe cumplir el diseño y que son del tipo:

- Geométrico.
- Presiones máxima y mínima en cada nudo.
- Velocidades máxima (evitar daños internos) y mínima (evitar sedimentación) del fluido en las tuberías.
- Cumplimiento de las ecuaciones de continuidad.
- Cumplimiento con el principio de conservación de la energía.

### Procedimiento de cálculo

En primer lugar se determinan los costes de las redes de tuberías para toda la serie comercial que está previsto utilizar en el diseño. Cada diámetro de la serie tendrá asociados unos costes de adquisición, transporte, obra civil, etc. que acabarán constituyendo sus precios unitarios (USD/m). El ajuste de una relación del tipo potencial o exponencial a la serie de costes unitarios de tuberías permitirá resolver el problema de manera continua.

A continuación se introduce la restricción de velocidades máxima y mínima, definiendo para cada tramo de tubería el conjunto de diámetros candidatos.

Se establece la pendiente hidráulica ( $j$ ) para cada tramo y diámetro ( $D$ ) de la serie en base a la expresión de pérdidas de Darcy:

$$j_i = \left( \frac{8 \cdot f_i \cdot q_i^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D_i^5} \right) \quad (1)$$

Donde  $f$  es el factor de fricción del tramo de tubería y  $q$  es el caudal circulante por cada tramo ( $m^3/s$ ).

El producto de la pendiente hidráulica ( $j$ ) por la longitud de cada tramo ( $L$ ) determina las pérdidas lineales de carga ( $h_f$ ) del mismo. Y en base a la definición geométrica del problema ( $z_g$ ), la energía de impulsión de la bomba ( $H_b$ ) y la ecuación de la energía, se establecen las presiones en los nodos de la red ( $P$ ).

La solución deberá cumplir con la restricción de presiones máxima y mínima en cada nudo.

Los costes de las tuberías se deberán referir a costes anuales mediante la aplicación del factor de amortización ( $a_t$ ), definido como sigue:

$$a_t = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad (2)$$

Donde  $r$  es el interés anual, en tanto por uno, y  $T$  el período de amortización en años.

Los costes de amortización de tuberías ( $C_a$ ) estarán definidos por el producto del factor de amortización ( $a_t$ ) y el sumatorio de costes unitarios de cada tramo de tubería ( $c_{i,j}$ ) por la longitud de dicho tramo ( $L_{i,j}$ ), estando éstos asociados a los diámetros de tuberías. La ecuación resultante se podría escribir del siguiente modo:

$$C_a = a_t \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{ND} c_{i,j} \cdot L_{i,j} \quad (3)$$

Donde  $n$  se corresponde con el número de tramos de tubería de la red y  $ND$  el número de diámetros de la serie considerada para el diseño.

Por su parte, los costes energéticos ( $C_e$ ) se definen como el producto de los costes unitarios anuales de cada metro de altura de bombeo ( $K_b$ ) por la altura de bombeo ( $H_b$ ). La ecuación que define  $K_b$  es la siguiente:

$$K_b = \frac{g \cdot q_b}{\eta} \cdot n_h \cdot p \quad (4)$$

Donde  $q_b$  es el caudal bombeado (en  $m^3/s$ ),  $\eta$  es el rendimiento global de la bomba,  $n_h$  es el número de horas anuales de funcionamiento y  $p$  es el precio de la energía (en USD/kWh).

En base a todo lo anterior, el problema a resolver mediante programación lineal puede escribirse como sigue:

$$\min(C_T) = \min(C_a + C_e) = \min \left( a_t \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{ND} (c_{i,j} \cdot L_{i,j}) + K_b \cdot H_b \right) \quad (5)$$

Con las siguientes variables de decisión:

$$L_{i,j}$$

$$H_b$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$P_i \geq P_{\min}$$

$$\sum_{j=1}^{ND} L_{i,j} = L_i \Rightarrow \forall i = 1 \dots n$$

$$L_{i,j} \geq 0 \Rightarrow \forall i, j$$

$$H_b \geq 0$$

El problema se puede plantear en *MS Excel* y utilizar la función *Solver* para su resolución.

### Consideraciones actuales en optimización de redes de tuberías

En la actualidad, a nivel científico, las técnicas tradicionales de optimización basadas en la programación lineal y no lineal quedan relegadas por los algoritmos evolutivos, que presentan las siguientes características (Montalvo et al., 2008):

- Solo utilizan la información dada por la función objetivo, por lo que evitan complicaciones asociadas con la determinación de otras funciones auxiliares.
- Son procedimientos de optimización global, por lo que pueden adaptarse fácilmente a cualquier función objetivo.
- Debido al hecho de que permiten la obtención de una familia de soluciones, se pueden obtener varias soluciones óptimas o soluciones próximas al caso óptimo.

- Durante el proceso de optimización se pueden evaluar sistemas con diferentes estados de carga.
- Su proceso de búsqueda dentro del espacio de posibles soluciones se caracteriza por:
  - Exploración, que es la capacidad de un algoritmo de realizar una amplia búsqueda dentro del espacio de soluciones.
  - Extracción, que es la capacidad de un algoritmo de buscar de manera más específica dentro de un conjunto reducido del espacio de soluciones, cercano a donde anteriormente se han encontrado buenas soluciones.

Los algoritmos evolutivos más comúnmente usados en los problemas de optimización de redes de tuberías de agua son (Montalvo et al., 2008; Mansouri, Torabi, Hoseini y Morshedzadeh, 2015):

- Algoritmos genéticos, se trata de técnicas estocásticas de búsqueda de soluciones basadas en los mecanismos de evolución natural. A continuación se presenta una breve descripción del método, introduciendo los conceptos más relevantes (Walters y Savic, 1994):
  - Identificar todas las variables de diseño en código binario, de manera que el diseño completo se pueda re-escribir con una cadena de código binario, que sea equivalente a un cromosoma en la naturaleza.
  - Mediante un proceso aleatorio se genera una población de diseños individuales, mediante la elección del valor 0 o 1 de cada uno de los caracteres de la cadena. Normalmente se utilizan tamaños de población de entre 10 y 100 valores.
  - La función objetivo (en este caso el coste global del sistema de tuberías) se evalúa para cada uno de los miembros de la población. Si uno de los miembros incumple alguna de las restricciones, se le impone una penalización. Adicionalmente se establecen unos pesos a los resultados de la función objetivo, de manera que la siguiente generación de soluciones se vea influenciada por unas reglas reproductivas. La función peso aplica un valor de 1.0 al mejor miembro de la población y 0.0 al peor miembro de una población, aplicando valores graduales al resto de soluciones intermedias.
  - La siguiente generación de soluciones se establece en base a los siguientes criterios reproductivos:
    - Selección: dos padres son seleccionados de la población existente de manera aleatoria en base a una probabilidad de selección proporcional a la función peso. Esta estrategia de supervivencia garantiza que las mejores soluciones tienen más probabilidades de ser padres que las peores soluciones.
    - Mezcla: las cadenas binarias (cromosomas) de ambos padres se rompen en una posición aleatoria y las segundas secciones de ambas cadenas se intercambian, de manera que cada pareja de padres genera dos nuevas soluciones “hijas”, que son generalmente diferentes a sus padres, aunque conservan un parentesco significativo.
    - Mutación: con una muy baja probabilidad, cada carácter del cromosoma de cada hijo se cambia de 0 a 1 y viceversa, introduciendo nuevos elementos a la población de diseño.
  - Finalmente se elimina la vieja población y se vuelve a evaluar la función objetivo en cada nuevo miembro de la misma, repitiendo el proceso hasta que se alcanza el criterio de finalización.

- Algoritmo de la colonia de hormigas, está basado en el concepto de que las hormigas son capaces de encontrar el camino más corto desde su nido hasta una fuente de comida liberando feromonas en su camino de vuelta, con el tiempo los caminos más cortos se ven reforzados con mayor cantidad de feromonas convirtiéndose por tanto en los caminos dominantes de la colonia (Simpson, Maier, Foong, Phang, Seah y Tan, 2001; Afshar, Massoumi, Afshar y Mariño, 2015). El algoritmo se estructura en tres fases principales:
  - Construcción de la solución, las hormigas artificiales se mueven a través de estados adyacentes de un problema en base a una regla de transición, construyendo soluciones de manera iterativa.
  - Actualización de feromonas, en base al refuerzo con feromonas de los caminos y a la evaporación de feromonas en los caminos menos transitados.
- Algoritmo de búsqueda armónica, trabaja en base a tres conceptos (Geem, 2006): inicialización, improvisación de nuevas armonías y actualización de la memoria. Las etapas de trabajo del presente algoritmo son:
  - Se establece la función objetivo y las variables de decisión, que constituyen los vectores solución del problema.
  - Se construye la matriz de vectores solución de manera aleatoria y se obtienen los costes totales de diseño.
  - Se improvisan nuevas armonías en función del parámetro de probabilidad de pertenencia a los diámetros candidatos del problema (HMCR) y se realizan ajustes de campo, (cambiando un diámetro por el inmediatamente superior o inferior) en función de la probabilidad de ajuste de campo (PAR).
  - Si los nuevos vectores armonía improvisados son mejores que las peores soluciones del problema anterior y no se repite ningún vector armonía, se almacenan en la memoria sustituyendo a éstos. Repitiéndose el proceso hasta alcanzar el criterio de convergencia.
- Algoritmo de enjambre de partículas, basado en los principios colectivos de un grupo de pájaros o insectos que se desplazan en busca de alimento. Cada individuo se dirige en una determinada dirección y alcanza su mejor posición hasta el momento. Del mismo modo los individuos se comunican entre ellos y son capaces de identificar el que se encuentra en la mejor posición del conjunto. De este modo, todos los individuos buscan la mejor posición colectiva y desde allí repiten la búsqueda. El proceso computacional del algoritmo contiene los siguientes pasos (Montalvo et al., 2008; Izquierdo, Montalvo, Pérez y Fuertes, 2008):
  - Se inicia con un grupo de partículas generado aleatoriamente que representa diferentes soluciones del problema.
  - A lo largo del proceso cada partícula está asociada con tres vectores: posición actual, mejor posición global y velocidad de desplazamiento a su nueva localización.
  - La nueva posición del resto de partículas se ve modificada por la velocidad de desplazamiento, que está compuesta por un factor de inercia que modifica la velocidad inicial; y dos componentes de aprendizaje, uno relacionado con la mejor posición global del ciclo anterior y otro relacionado con la mejor posición global alcanzada por el colectivo hasta dicho momento.
  - Las velocidades de las partículas están limitadas superior e inferiormente y la condición de finalización se alcanza con un determinado número de iteraciones.

El uso generalizado de estos algoritmos en los procesos de optimización de redes de tuberías requeriría de su implementación como parte de los procesos de alguno de los paquetes comerciales de cálculo.

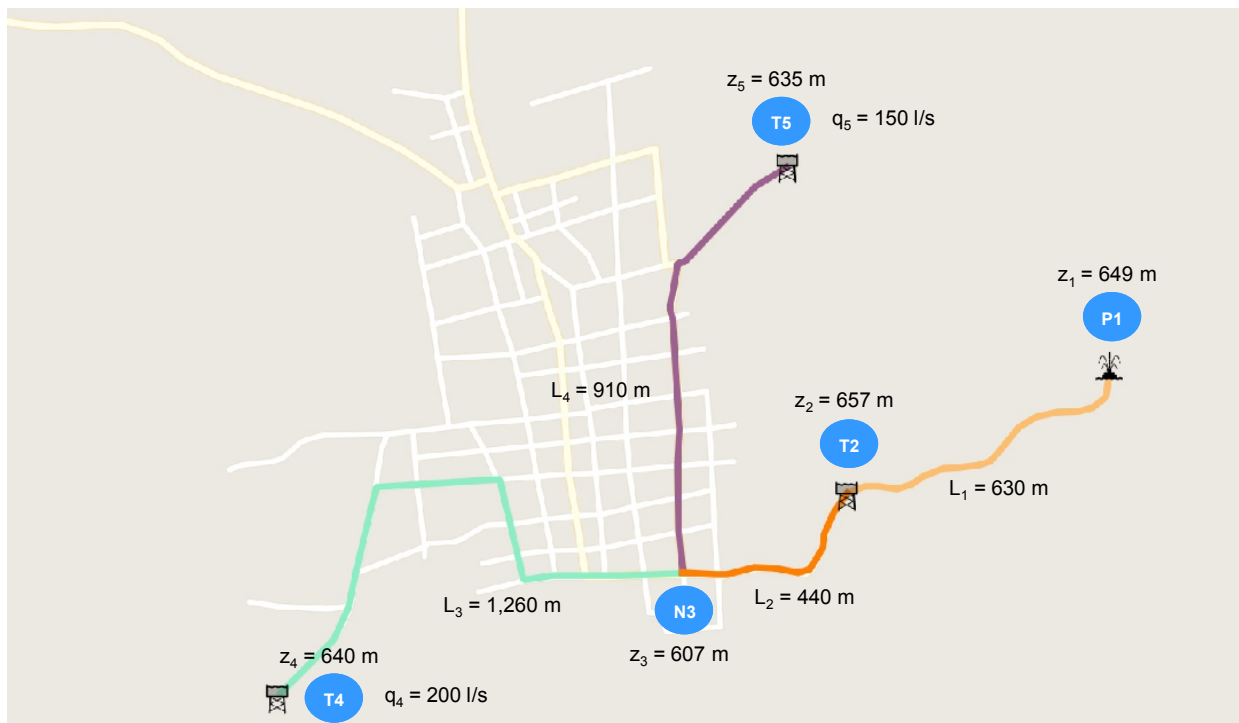
Sin embargo, la necesidad de definición de parámetros de convergencia que se alejan de los conocimientos físicos necesarios para los cálculos hidráulicos de tuberías dificulta su uso generalizado en los diseños, quedando relegado al campo científico en problemas de optimización.

Estas dificultades encontradas en problemas complejos no deberían condicionar la aplicación de los métodos de optimización de costes en problemas más sencillos, como los que pueden resolverse mediante Programación Lineal en base a la metodología revisada en el apartado anterior.

## CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

La metodología descrita de resolución del problema mediante Programación Lineal se aplica a una red ramificada de abastecimiento que recoge las aguas de un campo de pozos, donde el nivel estático se encuentra 40 m por debajo del nivel del terreno, y las eleva hasta un tanque de cabecera desde donde se da servicio a unos tanques de cola que actúan de elementos reguladores de la red, y que a efectos del modelo se consideran como nudos de consumo.

La red de distribución descrita queda representada en la *Figura 2*, donde se muestran además los datos geométricos que definen el problema:



*Figura 2. Definición geométrica del problema*

En los costes de las redes de tuberías se ha tenido en cuenta la adquisición, transporte e instalación, la obra civil, la parte proporcional de accesorios y anclajes, el control de calidad y la gestión de residuos. Su ajuste mediante una relación exponencial se representa en la *Figura 3*.

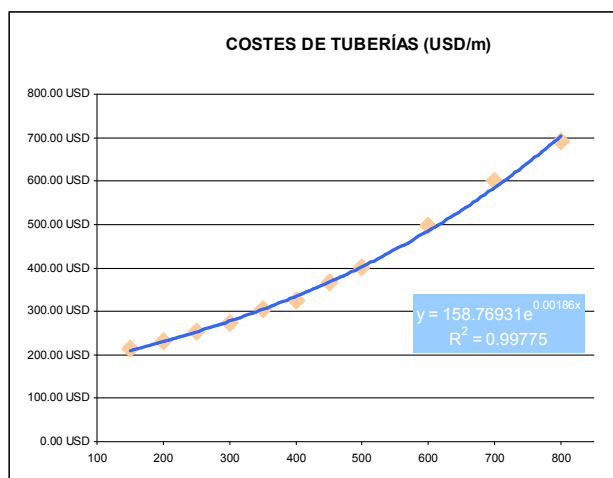


Figura 3. Costes unitarios de tuberías según diámetros

Velocidad		DN (mm)										
Línea	q (l/s)	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
L1	350	19.81	11.14	7.13	4.95	3.64	2.79	2.20	1.78	1.24	0.91	0.70
L2	350	19.81	11.14	7.13	4.95	3.64	2.79	2.20	1.78	1.24	0.91	0.70
L3	200	11.32	6.37	4.07	2.83	2.08	1.59	1.26	1.02	0.71	0.52	0.40
L4	150	8.49	4.77	3.06	2.12	1.56	1.19	0.94	0.76	0.53	0.39	0.30

Tabla 1. Limitación de velocidades y establecimiento de diámetros candidatos

A continuación se construye la matriz de pendiente hidráulica que permite conocer, para cada tramo y diámetro de la serie, las pérdidas por metro lineal que se tienen en la conducción. De este modo, variando las longitudes de cada uno de los diámetros asociados a un tramo, se establecen las pérdidas del mismo y se comprueba el cumplimiento del principio de conservación de la energía, sujeto a las restricciones de presión mínima en cada uno de los nodos.

En este caso se han establecido 5 mca como presiones mínimas en los tanques (T2, T4 y T5), limitando la presión mínima en el resto de nodos (N3) a 20 mca.

Por su parte, los costes energéticos se han establecido teniendo en cuenta un precio de energía tipo en Centroamérica para este tipo de instalaciones de 0.082 USD/kWh, que la instalación estará funcionando durante 3,000 h/año y que el rendimiento global del bombeo será del 75%.

Los costes anuales de las tuberías se determinan a partir del factor de amortización de las mismas en base a un interés anual del 9% y un período de 30 años.

Los valores alcanzados en los nodos se resumen en la Tabla 2, donde las pérdidas calculadas ( $\Sigma h_f$ ) hacen referencia al tramo de tubería que abastece al nodo de referencia.

Nodo	q (l/s)	$\Sigma h_f$ (m)	H (mca)	Cota (m)	P (mca)
P1	-	-	666.08	649.00	17.08
T2	-	4.08	662.00	657.00	5.00
N3	-	4.83	657.17	607.00	50.17
T4	200	12.17	645.00	640.00	5.00
T5	150	17.17	640.00	635.00	5.00

Tabla 2. Resultados en los nodos

Las longitudes y costes de las redes de tuberías después del proceso de optimización se presentan en la Tabla 3.



Longitud		DN (mm)										TOTAL	
Línea	q (l/s)	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700		800
L1	350	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	630.00	0.00	0.00	0.00	630.00
L2	350	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	440.00	0.00	0.00	0.00	0.00	440.00
L3	200	0.00	0.00	0.00	0.00	658.93	601.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1260.00
L4	150	0.00	0.00	142.66	767.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	910.00

Coste tuberías		DN (mm)										TOTAL	
Línea	q (l/s)	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700		800
L1	350	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	253,870.44 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	253,870.44 USD
L2	350	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	161,537.65 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	161,537.65 USD
L3	200	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	200,797.19 USD	201,046.96 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	401,844.15 USD
L4	150	0.00 USD	0.00 USD	36,084.77 USD	213,037.92 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	0.00 USD	249,122.69 USD
													<b>1,066,374.94 USD</b>

Tabla 3. Longitudes y costes de tuberías

La altura de bombeo necesaria para poder extraer el agua freática e inyectarla en la red cumpliendo con las necesidades de presión mínima en los nodos establecida es de 57.08 m. Con ello los **costes energéticos anuales** ascienden a **64,284.06 USD**.

Por otro lado, afectando los costes de construcción de la red por el factor de amortización se obtienen los **costes anuales de amortización de las tuberías**, cuyo valor es **96,629.22 USD**.

En el caso estudiado, el 60.05% de los costes se corresponde con los costes de construcción y el 39.95% equivale a los costes de operación. Aunque se trata de una simplificación del modelo donde no se ha considerado la red de distribución para los costes de construcción, mientras que los costes energéticos si que reflejan los costes necesarios para dar servicio a la red completa, por lo que en realidad la relación de costes entre ambas componentes es diferente, incrementándose notablemente los costes de construcción de la red.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño tradicional de redes de tuberías a presión no considera los costes de operación de los sistemas, por lo que su alcance se limita a obtener una solución hidráulicamente factible al problema que combine unas longitudes de tuberías de diferentes diámetros con la instalación de equipos de bombeo que garanticen una presión determinada en origen, en su caso.

El dimensionamiento económico de redes de tuberías consiste en minimizar los costes globales del sistema, considerando tanto los costes de construcción (principalmente de instalación de tuberías) como los costes de operación (donde destacan los costes energéticos).

Para ello, dentro de las infinitas soluciones hidráulicamente factibles del problema determinan la de menor coste.

Los programas informáticos que generalmente se utilizan para los cálculos hidráulicos de redes a presión no implementan el diseño económico de redes en base a criterios de optimización, por lo que su uso está limitado al campo científico.

En la actualidad se utilizan algoritmos evolutivos para resolver este tipo de problemas, porque permiten resolver problemas de gran complejidad, con varias hipótesis de funcionamiento y penalizando el incumplimiento de algunas de las restricciones a las que están sometidos. Aunque, su implementación es compleja y requiere de la definición de parámetros que se alejan del conocimiento habitual de los ingenieros hidráulicos, sobre los que tradicionalmente recaen este tipo de diseños.

Sin embargo, los métodos clásicos de optimización, como los basados en Programación Lineal, permiten resolver una gran cantidad de problemas sencillos que existen en la realidad y su implementación es muy simple, pudiendo utilizar para su resolución incluso hojas de cálculo comerciales como *MS Excel*.

El presente trabajo resuelve un caso de estudio en Centroamérica de una red de distribución de agua potable ramificada.

La sencillez del método y de las herramientas de cálculo utilizadas permite la rápida exportación e importación de datos con los programas de cálculo hidráulico tradicionales (como EPANET), pudiendo optimizar económicamente los diseños en *MS Excel* y acabar comprobando el funcionamiento en el programa de cálculo hidráulico.

La incertidumbre asociada al planteamiento del problema (e.g. desconocimiento de las demandas futuras, proyecciones de crecimiento poblacional, agotamiento de recursos, averías, variabilidad de costes energéticos, etc.) impide asegurar que el método arroja la mejor solución de diseño, puesto que éste está sustentado en unas condiciones o hipótesis de partida.

En cualquier caso, estos métodos deberían utilizarse como una herramienta más en el proceso de diseño, puesto que añade criterios adicionales a los estrictamente hidráulicos que facilitan la toma de decisiones.

---

## **BIBLIOGRAFÍA**

---

Afshar, A., Massoumi, F., Afshar, A. y Mariño, M. A. (2015). State of the art review of ant colony optimization applications in water resource management. *Water Resources Management*, 29, 3891-3904.

Alperovits, E. y Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 13 (6), 885-900.

Geem, Z. W. (2006). Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering Optimization*, 38 (3), 259-280.

Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R. y Fuentes, V. S. (2008). Design optimization of wastewater collection networks by PSO. *Computers and Mathematics with Application*, 56, 777-784.

Kumar, D. N., Rao, T. R. M. y Bandyopadhyay, M. (1998). Optimal design of water distribution system using linear programming gradient (LPG) method. *Journal of Indian Water Works Association*, 79-87.

Mansouri, R., Torabi, H., Hoseini, M. y Morshedzadeh, H. (2015). Optimization of the water distribution networks with differential evolution (DE) and mixed integer linear programming (MILP). *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 715-729.

Montalvo, I., Izquierdo, J., Pérez, R. y Tung, M. M. (2008). Particle swarm optimization applied to the design of water supply systems. *Computers and Mathematics with Applications*, 56 (2008), 769-776.

Sarbu, I. Design of optimal water distribution systems. *International Journal of Energy*, 4 (3), 59-67.

Shamir, U. (1974). Optimal design and operation of water distribution systems. *Water Resources Research*, 10 (1), 27-36.

Simpson, A. R., Maier, H. R., Foong, W. K., Phang, K. Y., Seah, H. Y. y Tan, C. L. (2001). Selection of parameters for ant colony optimisation applied to the optimal design of water distribution systems. *MODSIM 2001, International Congress on Modelling and Simulation*, Modelling and Simulation Society of Australia, Canberra, Australia, 10-13 Diciembre, 1931-1936.

Walters, G. A. y Savic, D. A. (1994). Keynote paper: Optimal design of water systems using genetic algorithms and other evolution programs. *Hydrosoft 94*, Blain W. And Ktsifarakis, K. (eds.), 1, 19-26.

Zhou, X., Gao, D. Y. y Simpson, A. R. (2013). Optimal design of water distribution networks by discrete state transition algorithm. *Journal of Latex class files*, 1-14.