

**DISEÑO HIDRÁULICO DE UNA RED DE SUMINISTRO DE AGUA EN
CIRCUITO EN UNA ZONA URBANA CRÍTICA MEDIANTE LA ECUACIÓN
DE HAZEN-WILLIAMS
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE UMA REDE MALHADA DE ABASTECIMENTO
DE ÁGUA EM ÁREA URBANA CRÍTICA UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE HAZEN-
WILLIAMS
HYDRAULIC DESIGN OF A LOOPED WATER SUPPLY NETWORK IN A CRITICAL
URBAN AREA USING THE HAZEN-WILLIAMS EQUATION**

Suka Lau Komba Augusto

Universidade Jean Piaget de Angola, Angola

[sukalaukombaaugusto@gmail.com] [<https://orcid.org/0009-0007-0292-2702>]

José Paulo Kai

Universidade Agostinho Neto (FEUAN) / Universidade Jean Piaget de Angola, Angola

[josepkai@gmail.com] [<https://orcid.org/0009-0006-3255-9900>]

Pedro Gelson Moraes

Universidade Jean Piaget de Angola, Kapalanga / Centro de Investigação e Desenvolvimento de Sonangol, Angola

[pedrogelson@live.com.pt] [<https://orcid.org/0009-0006-3255-9900>]

Información del manuscrito:

Recibido/Received: 31/12/2025

Revisado/Reviewed: 23/03/2026

Aceptado/Accepted: 18/03/2026

RESUMEN

Palabras clave:

distribución de agua,
dimensionamiento del sistema,
hardy-cross, red en bucle, pérdida
de carga, análisis de sensibilidad.

Esta investigación tuvo como objetivo el diseño hidráulico de una red de distribución de agua en bucle a gran escala, utilizando el Bairro 11 de Novembro (Luanda) como caso de estudio, un área crítica que enfrenta graves deficiencias en su sistema existente. La metodología integró la determinación de la demanda de agua a través de la evaluación de las necesidades aparentes basadas en el consumo de agua per cápita en Luanda, entrevistas y consultas técnicas con análisis hidráulico utilizando el método de Hardy-Cross y la ecuación de Hazen-Williams ($C=140$), aplicando correcciones iterativas (ΔQ) hasta lograr el equilibrio del bucle ($\epsilon \leq 0,01$ m). El análisis de sensibilidad OAT identificó el coeficiente de rugosidad (C) como el parámetro más crítico para la pérdida de carga ($S \approx 2,6$), mientras que los coeficientes de demanda (K_1 , K_2) impactan directamente los caudales ($S \approx 1$). La red diseñada presenta caudales que oscilan entre 125,41 L/s y 5,90 L/s, con diámetros de 350 mm a 80 mm y velocidades entre 0,6 y 2,9 m/s. Se logró el equilibrio hidráulico con un promedio de 3,7 iteraciones por bucle y $\Sigma \Delta H = 0$ m. El análisis de sensibilidad identificó el coeficiente de rugosidad (C) como el parámetro más crítico para las pérdidas de carga ($S \approx 2,6$). La solución propuesta es técnicamente viable y replicable, lo que representa una contribución significativa a la ingeniería de saneamiento en contextos de rápido crecimiento urbano, aunque los resultados

	dependen de las estimaciones de demanda y del coeficiente C, que requieren calibración futura.
	RESUMO
Palavras chave: distribuição de água, dimensionamento do sistema, hardy-croos, rede malhada, perda de carga.	Esta pesquisa objectivou o dimensionamento hidráulico de uma rede malhada de grande porte para abastecimento de água, tomando como caso de estudo o Bairro 11 de Novembro (Luanda), uma localidade crítica onde se enfrentam severas deficiências no sistema existente. A metodologia integrou a determinação da demanda hídrica via deção necessidades aparentes pelo consumo de água per capita em Luanda, entrevistas e consultas técnicas com a análise hidráulica pelo método de Hardy-Cross utilizando a equação de Hazen-Williams ($C=140$), aplicando correções iterativas (ΔQ) até o equilíbrio das malhas ($\epsilon \leq 0,01$ m). A análise de sensibilidade OAT identificou o coeficiente de rugosidade (C) como parâmetro mais crítico para perdas de carga ($S \approx 2,6$), enquanto os coeficientes de demanda (K_1, K_2) impactam diretamente as vazões ($S \approx 1$). A rede dimensionada apresenta vazões entre 125,41 L/s e 5,90 L/s, com diâmetros de 350 mm a 80 mm, velocidades entre 0,6 e 2,9 m/s. O equilíbrio hidráulico foi alcançado com uma média de 3,7 iterações por anel e $\Sigma \Delta H=0$ m. A análise de sensibilidade identificou o coeficiente de rugosidade (C) como o parâmetro mais crítico para as perdas de carga ($S \approx 2,6$). A solução proposta é tecnicamente viável e replicável, constituindo uma contribuição significativa para a engenharia de saneamento em contextos de rápido crescimento urbano, embora os resultados dependam de estimativas de demanda e do coeficiente C, que requerem calibração futura.
	ABSTRACT
Keywords: water distribution, system sizing, hardy-cross, meshed network, head loss.	This research aimed at the hydraulic design of a large-scale looped water distribution network, using the Bairro 11 de Novembro (Luanda) as a case study a critical area facing severe deficiencies in its existing system. The methodology integrated water demand determination via assessing apparent needs based on per capita water consumption in Luanda, interviews, and technical consultations with hydraulic analysis using the Hardy-Cross method and the Hazen-Williams equation ($C=140$), applying iterative corrections (ΔQ) until loop balance was achieved ($\epsilon \leq 0.01$ m). The OAT sensitivity analysis identified the roughness coefficient (C) as the most critical parameter for head loss ($S \approx 2.6$), while demand coefficients (K_1, K_2) directly impact flow rates ($S \approx 1$). The designed network features flow rates ranging from 125.41 L/s to 5.90 L/s, with diameters from 350 mm to 80 mm, and velocities between 0.6 and 2.9 m/s. Hydraulic balance was achieved with an average of 3.7 iterations per loop and $\Sigma \Delta H=0$ m. The sensitivity analysis identified the roughness coefficient (C) as the most critical parameter for head losses ($S \approx 2.6$). The proposed solution is technically viable and replicable, representing a significant contribution to sanitation engineering in contexts of rapid urban growth, although the results depend on demand estimates and the C coefficient, which require future calibration.

Introducción

El sistema de abastecimiento resulta bastante complejo, y no solo en lo que respecta al mantenimiento y al funcionamiento. Por lo general, se trata de la parte más costosa del proyecto global de abastecimiento de agua, por lo que requiere una atención especial en lo que respecta al consumo *per cápita*, los parámetros del sistema, las hipótesis de cálculo adoptadas y las metodologías, con el fin de lograr un proyecto eficiente.

Luanda registra un crecimiento demográfico, agravado por el éxodo rural. Según EPAL-EP (2021), esta situación hace que el problema del suministro de agua a la población sea crítico. En el barrio 11 de Noviembre, del distrito urbano de Kima Kieza, en el municipio de Cazenga, el sistema de distribución y suministro de agua potable no es suficiente para abastecer a toda la población y a las instalaciones, debido al crecimiento de las infraestructuras y al aumento de la población. Dado que se trata de un barrio problemático, se ha prestado especial atención a su inclusión en esta investigación como caso de estudio, con el fin de encontrar una solución para la nueva red de distribución y suministro de agua en esa población, que se ha visto perjudicada por las deficiencias del sistema.

Ante esta situación, el objetivo general del estudio era proponer una nueva red de distribución y abastecimiento de agua, de tipo mallado. En concreto, se ha tratado de: (1) Aplicar una metodología sistematizada para el dimensionamiento hidráulico de una red de gran envergadura en el barrio 11 de Novembro, distrito de Kima Kieza, Luanda; (2) Elaborar un proyecto ejecutivo completo y técnicamente viable para dicha red, definiendo una jerarquía de diámetros, garantizando caudales equilibrados y asegurando la capacidad para responder a las demandas de punta; (3) Realizar un análisis de sensibilidad del sistema proyectado, identificando los parámetros críticos para su sostenibilidad a largo plazo; y (4) Demostrar la eficacia y la estabilidad del uso conjunto de la ecuación de Hazen-Williams y del método de Hardy-Cross como herramienta para el dimensionamiento de redes de distribución de agua de gran envergadura.

La determinación de los consumos y los caudales de los sistemas de distribución de agua es una etapa fundamental para el correcto dimensionamiento de estas infraestructuras. Los caudales de diseño deben tener en cuenta los diferentes tipos de consumo —doméstico, comercial, institucional, industrial y público—, además de prever las necesidades para la extinción de incendios y compensar las pérdidas de carga continuas (h_f) y las posibles fugas. Las fórmulas para el cálculo de las pérdidas de carga continuas (h_f) establecen relaciones entre las siguientes seis variables hidráulicas principales: longitud de la tubería (L), presión (P), diámetro (D), caudal (Q), pérdida de carga (h_f) y rugosidad interna (ϵ) (Nogueira y Justino, 2013).

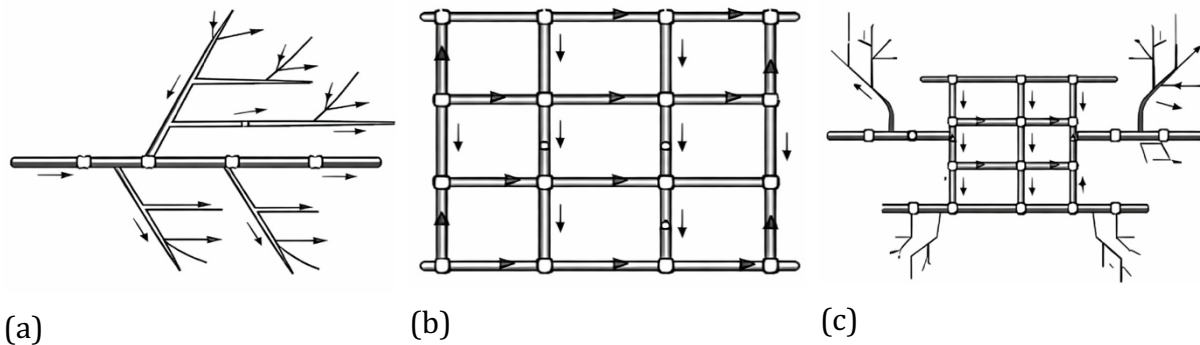
A pesar de la existencia de normas y metodologías consolidadas para el dimensionamiento de redes de abastecimiento, se observa una falta de estudios aplicados al contexto angoleño que integren, de forma sistemática, la determinación de la demanda local, el dimensionamiento hidráulico mediante métodos clásicos y el análisis de sensibilidad de los parámetros críticos. Esta carencia se nota especialmente en los barrios periféricos de Luanda, como el 11 de Noviembre, donde el rápido crecimiento urbano no ha ido acompañado de proyectos de ingeniería que garanticen la sostenibilidad y la resiliencia del sistema a largo plazo.

Redes de distribución de agua

Las redes de distribución de agua son un conjunto de depósitos que distribuyen el agua hasta los puntos de consumo (conexiones domésticas). Existen tres tipos de redes de distribución, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 1

(a) Red ramificada, (b) Red en malla y (c) Red mixta



Nota. Adaptado de Rossman (2000), Mays (2011), AWWA (2012) y Walski et al. (2003)

La red ramificada se caracteriza por una estructura jerárquica en forma de árbol, en la que el suministro de agua se realiza a partir de una tubería principal, que se divide progresivamente en tuberías secundarias y terciarias hasta llegar a los puntos de consumo. Este tipo de red se caracteriza por la sencillez de su diseño y por un menor coste de implantación, por lo que se utiliza con frecuencia en pequeñas comunidades o zonas periféricas. Sin embargo, presenta una baja redundancia hidráulica, lo que puede provocar interrupciones en el suministro en caso de averías o trabajos de mantenimiento (Walski et al., 2003; AWWA, 2012).

La red en malla está formada por tuberías principales interconectadas que forman anillos o mallas cerradas, lo que permite que el agua llegue a cualquier punto del sistema por múltiples vías. Esta configuración ofrece una mayor fiabilidad operativa, una mejor distribución de las presiones y una mayor flexibilidad en situaciones de mantenimiento o emergencia. A pesar de que su construcción resulta más costosa, su uso está muy extendido en zonas urbanas de densidad de población media y alta (Rossman, 2000; Mays, 2011).

La red mixta es el resultado de la combinación de la red ramificada y la red en malla, y es la solución más habitual en los sistemas reales de abastecimiento de agua. Por lo general, las zonas centrales y más críticas del sistema utilizan redes en malla, mientras que las regiones periféricas se abastecen a través de ramificaciones. Este tipo de red busca un equilibrio entre el coste, la fiabilidad y la eficiencia hidráulica (AWWA, 2012; Walski et al., 2003).

Método de Hardy-Cross

La red mixta es el resultado de la combinación de la red ramificada y la red en malla, y es la solución más habitual en los sistemas reales de abastecimiento de agua. Por lo general, las zonas centrales y más críticas del sistema utilizan redes en malla, mientras que las regiones periféricas se abastecen a través de ramificaciones. Este tipo de red busca

un equilibrio entre el coste, la fiabilidad y la eficiencia hidráulica (AWWA, 2012; Walski et al., 2003).

Se trata de un método interactivo para equilibrar los caudales en redes en malla, basado en la ley de conservación de la masa (nudos) y la ley de conservación de la energía (mallas).

La pérdida de carga continua en cada tramo se calcula mediante una fórmula del tipo:

$$\Delta H \text{ ou } h_f = k \cdot Q^n \quad (1)$$

donde:

- Para Darcy-Weisbach: $n \approx 2$ (pero f depende de Re y de la rugosidad, y puede variar con Q)
- Para Hazen-Williams: $n = 1,852$ e k depende de C (coeficiente de rugosidad).

El análisis del equilibrio hidráulico de los sistemas de redes de distribución de agua se basa en las dos leyes fundamentales de la mecánica de fluidos —la de la continuidad y la de la conservación de la energía— y, además, en una relación entre el caudal (o velocidad) y la pérdida de carga (o variación de presión) (Munson et al., 2020), establecida mediante las ecuaciones de Darcy-Weisbach (fórmula universal de la pérdida de carga) o de Hazen-Williams.

Ecuación de Hazen-Williams

La elección de la fórmula de Hazen-Williams para el dimensionamiento de redes de gran envergadura va más allá de la mera eficiencia numérica, ya que influye directamente en la fiabilidad operativa y la sostenibilidad del sistema. La rapidez de convergencia del método permite analizar más escenarios de demanda y escasez, optimizando los diámetros y definiendo configuraciones de red más robustas y resilientes (Tsutiya, 2006). Esta mayor agilidad en el cálculo permite analizar alternativas que garanticen unas presiones mínimas adecuadas en todos los puntos de la red, incluso en períodos de máxima demanda o en situaciones de crecimiento demográfico, asegurando así un suministro equitativo de agua, un factor socioambiental fundamental (Heller y Pádua, 2006). Desde el punto de vista medioambiental, la selección cuidadosa de coeficientes C realistas, junto con un dimensionamiento hidráulico preciso, contribuye a reducir las pérdidas por fugas y a minimizar la energía necesaria para el bombeo, lo que fomenta la eficiencia energética y la conservación de los recursos hídricos (Carrijo, 2012). Por lo tanto, la elección metodológica se refleja no solo en el diseño de la red, sino también en su capacidad para servir a la sociedad de forma justa y respetuosa con el medio ambiente.

La elección entre las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach determina la dinámica y la eficiencia del proceso iterativo de equilibrio hidráulico.

A pesar de sus ventajas prácticas, la aplicación de la ecuación de Hazen-Williams presenta algunas limitaciones que deben explicarse con claridad. Se reconoce su validez para el flujo de agua a temperaturas habituales (alrededor de 20 °C) en régimen turbulento rugoso, lo cual es típico en las redes de distribución. Sin embargo, en situaciones en las que los diámetros son muy pequeños, las velocidades son reducidas (regímenes laminar o de transición) o los fluidos presentan una viscosidad significativamente diferente, la ecuación de Darcy-Weisbach, al ser teóricamente más amplia, sería la opción más adecuada (Giles, 2004). Además, el coeficiente de rugosidad " C " no es constante a lo largo de la vida útil de la tubería, sino que disminuye con el

envejecimiento, las incrustaciones y la corrosión, un aspecto crítico que el presente análisis de sensibilidad ha tratado de evaluar (Mays, 2000).

Mientras que la fórmula universal de Darcy-Weisbach presenta una relación en la que el exponente n es aproximadamente 2, pero el coeficiente f varía implícitamente con el número de Reynolds y la rugosidad, la ecuación de Hazen-Williams destaca por su simplicidad estructural, con un exponente fijo $n = 1.852$ y un coeficiente k que depende únicamente del coeficiente de rugosidad C del material (Azevedo Netto y Álvarez, 2004).

$$\Delta H = \frac{1}{(0,2785C)^{1,85}} \times \frac{L}{D^{4,87}} \times Q^{1,85} \quad (2)$$

Esta característica hace que la relación entre caudal y pérdida de carga sea explícita y directa, lo que simplifica considerablemente los cálculos dentro del algoritmo iterativo de Hardy-Cross (Tsutiya, 2006).

En el caso de las redes de distribución de agua potable, la elección de la fórmula de Hazen-Williams está ampliamente justificada por una serie de ventajas prácticas decisivas. En primer lugar, su simplicidad computacional agiliza el proceso: con un exponente n constante, el cálculo de la corrección del caudal por malla (ΔQ) resulta más estable y directo, sin necesidad de reevaluar un factor de fricción f variable en cada iteración (Porto, 2004). En consecuencia, se observa una mayor velocidad de convergencia, con un menor número de ciclos necesarios para alcanzar el equilibrio. Esta eficiencia se complementa con su facilidad de implementación en herramientas informáticas habituales, como las hojas de cálculo. Además, los manuales de referencia como los de Azevedo Netto y Tsutiya, que proporcionan tablas normalizadas del coeficiente C , garantizan la compatibilidad y la fiabilidad de los proyectos (Tsutiya, 2006). Por último, la adaptación al régimen de flujo típico en redes de abastecimiento con flujo turbulento rugoso justifica el uso de esta fórmula empírica, calibrada originalmente para estas condiciones.

Limitación de la ecuación de Hazen-Williams

A pesar de estos aspectos, la aplicación de la ecuación de Darcy-Weisbach sigue siendo fundamental en situaciones concretas en las que el rigor físico y la precisión general son imprescindibles. Esta fórmula universal debe tenerse en cuenta cuando el sistema funciona con fluidos cuya viscosidad difiere significativamente de la del agua a 20 °C, como en casos de temperaturas extremas u otros líquidos (Giles, 2004). También resulta necesaria en regímenes de flujo no turbulentos, como en conductos con diámetros muy reducidos o velocidades muy bajas, donde pueden darse regímenes laminares o de transición, fuera del ámbito de validez de la ecuación de Hazen-Williams. Por último, cuando se conoce con gran precisión la rugosidad absoluta (ϵ) del material y el diseñador busca la máxima rigurosidad física en el modelado, la fórmula de Darcy-Weisbach, basada en la mecánica de fluidos, ofrece una representación más completa y precisa de la física del flujo en cualquier condición (Azevedo Netto y Álvarez, 2004).

La evolución del dimensionamiento de las redes de abastecimiento parte de métodos clásicos, como el de Hardy-Cross, e incorpora enfoques contemporáneos basados en la optimización y la calibración avanzada. Johns, Keedwell y Savić (2014) aportaron el algoritmo genético ALCO-GA, que aumenta la eficiencia en la búsqueda de soluciones viables en redes complejas. Cui y Kuczera (2025) ampliaron esta perspectiva al aplicar algoritmos genéticos a la optimización de reglas operativas, con el objetivo de minimizar los costes anuales en sistemas sujetos a incertidumbres.

En el ámbito de la calibración, Rai y Lingayat (2021) validaron el uso de EPANET al comparar sus resultados con soluciones analíticas obtenidas mediante el método de Hardy-Cross. Bas (2026) profundizó en este enfoque al integrar EPANET con índices estadísticos como el MBE y el NSE, demostrando que los modelos calibrados con datos de campo alcanzan una alta fiabilidad en las simulaciones de presión y caudal.

Esto refuerza la necesidad de vincular el dimensionamiento a estrategias de control operativo y de gestión de pérdidas, tal y como destaca Lusk (2025) al abordar el control de las pérdidas reales de agua como elemento fundamental para garantizar la viabilidad del suministro.

Método

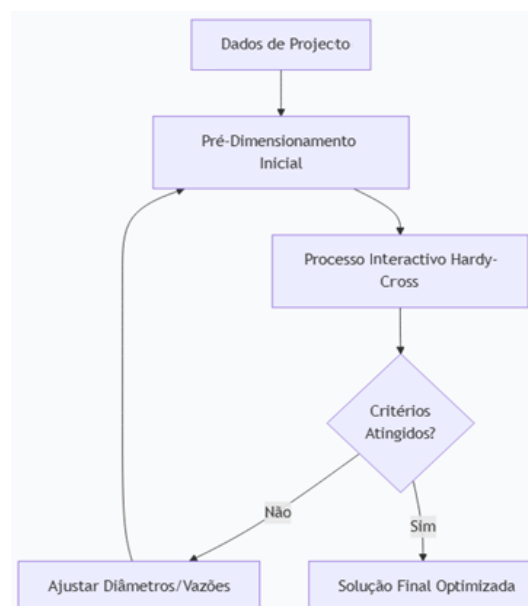
Para el dimensionamiento de una red de abastecimiento y distribución de agua a gran escala, la metodología de este estudio se centró en dos fases interrelacionadas: la determinación precisa de la demanda de agua y el análisis hidráulico de la red.

La cuantificación de la demanda se basó en un análisis demográfico y de patrones de consumo, utilizando datos primarios obtenidos mediante entrevistas estructuradas con la población objetivo y consultas técnicas a la Empresa Pública de Aguas de Luanda (EPAL, E.P.), ArcGIS 10.8 para la cartografía, AutoCAD 2021 para el levantamiento topográfico, Handy GPS (gratuito) para la orientación y Redem.Exe (Epanet 2.0) para los cálculos de pérdidas de carga. Este enfoque ha permitido definir el caudal medio diario, el coeficiente del día de mayor consumo (K_1) y el coeficiente de la hora de mayor consumo (K_2), parámetros fundamentales para el cálculo de los caudales de diseño que garantizan la capacidad del sistema para satisfacer las demandas máximas.

La metodología para el dimensionamiento de la red se llevó a cabo siguiendo el enfoque sistemático que se ilustra en la siguiente figura, que integra los principios fundamentales de la hidráulica de redes con criterios técnicos de proyecto.

Figura 2

Diagrama de flujo metodológico del dimensionamiento hidráulico



El dimensionamiento se basó en las siguientes **hipótesis fundamentales**:

- (i) Régimen permanente y uniforme;
- (ii) Coeficiente de rugosidad $C = 140$ para tuberías nuevas de PVC/PEAD, según Azevedo Netto y Álvarez (2004);
- (iii) Criterios de diseño basados en la norma NBR 12218 (ABNT, 2027), con una presión dinámica mínima de 15 m.c.a. y una velocidad máxima de 3,0 m/s. La topología de la red (Figura 3) se definió a partir del levantamiento topográfico y la cartografía (AutoCAD, ArcGIS). El caudal de diseño se calculó de la siguiente manera:

$$Q_p = K_1 \times K_2 \times Q_{med} \quad (3)$$

Dónde: Q_{med} = caudal medio diario, calculado a partir de la población de diseño y del consumo per cápita (resultante de entrevistas y datos de la EPAL), con $K_1 = 1,2$ y $K_2 = 1,5$.

La población del proyecto se estimó en 33 334 habitantes, basándose en (datos del censo y proyecciones de la EPAL), y se prevé que alcance los 41 668 habitantes en 2044, veinte años después), lo que da como resultado un consumo per cápita de [200 litros/habitante al día] y un caudal medio diario (Q_{med}) de 207 L/S.

La solución iterativa del equilibrio hidráulico mediante el método de Hardy-Cross, aplicado con la ecuación de Hazen-Williams (ecuación 2). Esta elección se justificó por su eficiencia computacional en sistemas a gran escala, ya que la fórmula, con su exponente fijo ($n = 1,852$) y su coeficiente de rugosidad (C) constante para cada material, simplifica el cálculo iterativo del equilibrio de caudales y pérdidas de carga, a partir de:

$$\Delta H = \frac{(1,0643 \times L)}{(0,2785C)^{1,85} \times D^{4,87}} \times Q^{1,85} \quad (4)$$

Dónde: $C = 140$, L (m), D (m), Q (m^3/s). La fórmula presentada (con 0,2785) es equivalente, utilizando L (m), D (m) y Q (L/s).

La suma de las pérdidas de carga en el anillo ($\Sigma\Delta H$) debe ser cercana a cero, lo que indica un equilibrio energético.

En la siguiente tabla se describen los parámetros de cada tramo:

Tabla 1
Parámetros de cada tramo

Fragmento	Longitud, L (m)	Diámetro, D (m)	Coefficiente C	Caudal inicial, Q ₁ (L/s)
AB	500	0,350	140	+120,00
BI	2000	0,250	140	+20,00
HI	500	0,250	140	-57,00
AH	2000	0,350	140	-67,00

Para facilitar los cálculos manuales, se ha utilizado la forma equivalente:

$$\Delta H = \frac{1}{(0,2785C)^{1,85}} \times \frac{1}{D^{4,87}} \times Q^{1,85} \quad (5)$$

Con Q en L/s, L en m, y D en m.

Para cada celda k en cada iteración n , el proceso siguió los siguientes pasos.

Determinación de la pérdida de carga para cada tramo i de la red, a partir de:

$$\Delta H_i^{(n)} = k_i \cdot (Q_i^{(n)})^{1,85} \quad (6)$$

donde $k_i = \frac{1}{(0,2785 \cdot C)^{1,85}} \cdot \frac{L_i}{D_i^{4,87}}$ (constante del fragmento).

La comprobación del equilibrio viene dada por:

$$\Sigma \Delta H^{(n)} = \sum_{i=1}^m \Delta H_i^{(n)} \quad (7)$$

donde m = número de tramos de la red.

El criterio de convergencia viene dado por:

$$|\Sigma \Delta H^{(n)}| \leq \varepsilon \quad (8)$$

con $\varepsilon = 0,01$ m como tolerancia.

Si es necesario, se calcula la corrección del caudal si $|\Sigma \Delta H^{(n)}| > \varepsilon$, se utiliza:

$$\Delta Q^{(n)} = - \frac{\Sigma \Delta H^{(n)}}{1,85 \cdot \sum_{i=1}^m (|\Delta H_i^{(n)}| / |Q_i^{(n)}|)} \quad (9)$$

$$\Delta Q^{(n)} = - \frac{\Sigma \Delta H^{(n)}}{1,85 \cdot \sum_{i=1}^m (|\Delta H_i^{(n)}| / |Q_i^{(n)}|)}$$

A continuación se presenta el cálculo de la actualización de los caudales para cada tramo i , a partir de:

$$Q_i^{(n+1)} = Q_i^{(n)} + \sigma_i \cdot \Delta Q^{(n)} \quad (10)$$

Dónde: $\sigma_i = +1$ si el sentido del tramo coincide con la orientación positiva de la malla (en el sentido de las agujas del reloj), y $\sigma_i = -1$ en caso contrario.

Por último, se repite el proceso hasta alcanzar la convergencia, repitiendo los pasos 1 a 4 hasta $|\Sigma \Delta H^{(n)}| \leq \varepsilon$ para todas las mallas.

Al sustituir los datos, se han adaptado las siguientes convenciones para el signo de los caudales, siendo Positivo (+) el flujo en sentido horario y Negativo (-) el flujo en sentido antihorario. En cuanto al signo de las pérdidas de carga, Positivo (+) indica una pérdida de carga en la dirección del flujo considerada positiva; y Negativo (-), una pérdida de carga en la dirección opuesta. Cada malla se ha tratado por separado, y las correcciones se han aplicado a los tramos comunes.

Para evaluar la solidez y la fiabilidad del dimensionamiento propuesto frente a las incertidumbres inherentes a los parámetros de entrada, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad sistemático. Este análisis siguió el enfoque *one-factor-at-a-time* (OAT), en el que cada parámetro crítico se modificó individualmente, mientras que los demás se mantuvieron constantes en sus valores nominales.

Se seleccionaron tres parámetros considerados los más sensibles y sujetos a una mayor incertidumbre: (1) el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams (C), variado en ± 10 unidades en torno al valor de referencia (C = 140) para simular condiciones de tubería nueva (C = 150), estándar (C = 140) y deteriorada (C = 130); (2) los coeficientes de consumo (K_1 y K_2), que se han variado individualmente en un ± 15 % para representar las fluctuaciones en las estimaciones de la demanda; y (3) el consumo *per cápita*, que se ha variado en un ± 20 % para reflejar diferentes escenarios de hábitos de consumo. Para cada combinación de parámetros, se volvió a aplicar el método de Hardy-Cross a la red completa y se calcularon las variaciones porcentuales en los caudales finales, las pérdidas de carga y las presiones mínimas. El índice de sensibilidad (S) se cuantificó como la relación entre la variación relativa de la variable de salida ($\Delta Y/Y$) y la variación relativa del parámetro de entrada ($\Delta X/X$). Este análisis ha permitido identificar qué parámetros influyen más en el rendimiento del sistema y establecer los márgenes de seguridad adecuados para el proyecto.

Para comprobar la coherencia de los resultados, se compararon los caudales finales del Anillo 1 obtenidos mediante el proceso iterativo manual (Tabla 2) con los resultantes de la simulación realizada con el programa REDEM.EXE (Figura 3). Las diferencias observadas fueron inferiores a 0,1 L/s en todos los tramos, lo que confirma la validez de la aplicación del método y la precisión de los cálculos.

Resultados

El sistema de abastecimiento de agua actual se caracteriza por una tubería de acueducto con diámetros que oscilan entre los 250 mm y los 350 mm. La red de distribución cuenta con tuberías principales con un diámetro máximo de 110 mm, mientras que las tuberías secundarias tienen un diámetro mínimo de 90 mm.

El distrito de Kima Kieza se enfrenta a graves deficiencias en el sector del abastecimiento de agua, que pueden resumirse en tres problemas estructurales principales: (1) la falta de una red de distribución ramificada y con la capacidad adecuada; (2) el funcionamiento irregular e impredecible de la infraestructura existente, que solo suministra agua a horas aleatorias; y (3) la consiguiente dependencia de la población de soluciones informales, lo que obliga a los residentes a buscar agua en las viviendas de sus vecinos o en fuentes alternativas, lo que pone en peligro la calidad del recurso y la seguridad de la comunidad.

Esta situación precaria genera repercusiones socioambientales multidimensionales que van más allá de una simple deficiencia técnica. En el ámbito social, la irregularidad en el suministro supone una carga desproporcionada para las mujeres y los niños, que tradicionalmente se encargan de la recogida de agua, lo que limita el tiempo que pueden dedicar a la educación, al trabajo remunerado y al ocio. La costumbre de buscar agua en fuentes alternativas, a menudo sin tratar, aumenta la incidencia de enfermedades transmitidas por el agua, lo que sobrecarga el sistema de salud pública y perpetúa los ciclos de pobreza. Además, la inseguridad hídrica agrava las tensiones entre las comunidades y genera vulnerabilidad económica, ya que las familias empobrecidas destinan una parte significativa de sus ingresos a la compra informal de agua.

Desde el punto de vista medioambiental, este sistema deficiente provoca un desperdicio crónico de recursos hídricos debido a las fugas incontroladas en la red obsoleta y a la falta de mediciones. La presión sobre las fuentes alternativas, como los pozos superficiales, puede provocar su contaminación o agotamiento, lo que pone en peligro los acuíferos locales. La energía que se desperdicia al bombear agua a través de una red ineficiente también supone un coste medioambiental significativo en términos de emisiones de carbono.

Por lo tanto, el redimensionamiento de la red de malla mediante la ecuación de Hazen-Williams no solo supone una optimización hidráulica, sino también una intervención en favor de la justicia ambiental y social. Un sistema bien dimensionado, que garantice una presión y un caudal adecuados las 24 horas del día, es un requisito previo para promover la salud pública, la igualdad de género, la cohesión social y la sostenibilidad de los recursos hídricos, transformando el acceso al agua de un privilegio incierto en un derecho fundamental garantizado.

La aplicación de la metodología propuesta permitió realizar el dimensionamiento completo de la red de malla del barrio 11 de Noviembre, utilizando el método de Hardy-Cross junto con la ecuación de Hazen-Williams. Este binomio metodológico, clásico en la hidráulica de las redes de distribución, se basa en el balance de masa (conservación del caudal en los nodos) y de energía (conservación de la pérdida de carga a lo largo de cada malla cerrada). Esta elección queda respaldada por la bibliografía especializada, que destaca su solidez y eficiencia computacional en la resolución iterativa de sistemas con múltiples anillos, en los que no es viable una solución analítica directa (Larock et al., 2000; Jeppson, 1976).

La tabla 2 presenta un resumen del proceso iterativo para el Anillo 1, lo que demuestra la convergencia del método. El criterio de convergencia, según el cual la suma de las pérdidas de carga ($\Sigma\Delta H$) en cada malla tiende a cero, garantiza que se cumpla el principio de conservación de la energía para las direcciones de flujo consideradas. La rápida convergencia observada —que se estabiliza en tan solo 4 iteraciones— es una ventaja operativa directa del uso de la ecuación de Hazen-Williams. Su forma simplificada, con el exponente del caudal fijo, permite realizar cálculos más ágiles y garantiza la estabilidad numérica del método iterativo de Hardy-Cross, especialmente en redes con un gran número de anillos.

Tabla 2

Proceso interactivo del método de Hardy-Cross - Anillo 1

Iteración	Fragmento	Q inicial (l/s)	ΔH (m)	$\Delta H/Q$	ΔQ : corrección	Q corregida (l/s)
Inicio	AB	120,00	+1,88	0,0157	-1,35	118,65
	BI	20,00	+1,40	0,0700	-1,35	18,65
	HI	-57,00	-2,43	0,0426	-1,35	-58,35
	AH	-67,00	-0,51	0,0076	-1,35	-68,35
Suma 1. ^a			+0,34	0,1359		
	AB	118,65	+1,84	0,0155	10,59	129,24
	BI	18,65	+1,23	0,0104	10,59	29,24
	HI	-58,35	-2,54	0,0435	10,59	-47,76
	AH	-68,35	-2,65	0,0388	10,59	-57,76
			-2,12	0,1082		
Suma 2. ^a	AB	129,24	+2,16	0,0167	-3,83	125,41
	BI	29,24	+2,83	0,0968	-3,83	25,41
	HI	-47,76	-1,75	0,0366	-3,83	-51,59
	AH	-57,76	-1,94	0,0336	-3,83	-61,59
			+1,30	0,1837		
Suma 3. ^a	AB	125,41	+2,04	0,0163	0,00	125,41
	BI	25,41	+2,18	0,0858	0,00	25,41
	HI	-51,59	-2,02	0,0392	0,00	-51,59
	AH	-61,59	-2,20	0,0357	0,00	-61,59
Suma			0,00	0,1770		

La elección del coeficiente de rugosidad $C = 140$ para tuberías nuevas (que suele asociarse a materiales como el PVC, el PEAD o el acero revestido) es un parámetro crítico y justificable. Este valor, aunque optimista para la situación inicial, establece una base de rendimiento ideal y sirve de referencia para los análisis de sensibilidad y la planificación del mantenimiento. En la literatura especializada existe consenso en que el valor de C

disminuye con el paso del tiempo debido a procesos de incrustación y corrosión, lo que afecta gravemente a la eficiencia hidráulica. El análisis de sensibilidad posterior, que examina este descenso, es, por lo tanto, una práctica esencial en el diseño de proyectos (Mays, 2000).

La Tabla 3 presenta el resumen con los indicadores generales de rendimiento de la red:

Tabla 3

Indicadores globales de rendimiento de la red dimensionada

Indicador	Valor	Criterios de diseño	Cumplimiento
Caudal total (L/s)	[Calcular la suma de los caudales de entrada]	-	-
Diámetros (mm)	80 - 350	-	-
Velocidad media (m/s)	0,56	$\leq 3,0$ m/s	Sí
Velocidad máxima (m/s)	2,9	$\leq 3,0$ m/s	Sí
Presión mínima (m.c.a.)	16,78 m.c.a.	≥ 15 m.c.a.	El 92 % de los nudos responden
Presión inferior a 15 m.c.a.	8 % [Puntos 5 y 6; 12 y 13 (para el anillo 4); N.º 6 y 7; 13 y 14 (para el anillo 5); N.º 7 y 8; 14 y 15 (para el anillo 6)]	-	Sí

La aplicación de la metodología de cálculo también permitió determinar los siguientes espesores medios de los anillos:

- La presión media del anillo 4 = 13,96 m.c.a.;
- La presión media del anillo 5 = 12 m.c.a.;
- La presión media del anillo 6 es de 11,71 m.c.a.
- La presión media general = 16,78 m.c.a. (para el resto de anillos).

Aunque el 92 % de los nodos presentan presiones superiores a 15 m.c.a., el 8 % restante (correspondiente a los nodos 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14 y 15, situados en las cotas más elevadas de la red) presenta presiones comprendidas entre 12 y 14 m.c.a. Esta situación, aunque no alcanza el nivel óptimo, puede resultar aceptable en situaciones de máxima demanda; no obstante, se recomienda, en la fase de proyecto ejecutivo, evaluar la división de estas zonas en sectores o la instalación de boosters (válvulas reguladoras de presión) para garantizar el nivel de servicio en todas las condiciones.

Los resultados consolidados de toda la red, que se recogen en la tabla 3, revelan una arquitectura hidráulica coherente y jerarquizada. La progresión lógica de los

diámetros, desde los 350 mm en los tramos principales (AB, BC, CD, DE, EF, FG y AH) hasta los 80 mm en los ramales finales (GN), y el gradiente correspondiente en los caudales finales (de 125,41 l/s a 5,90 l/s), reflejan una adecuada distribución de la presión y el caudal. Esta jerarquía es fundamental para garantizar unas presiones de servicio adecuadas en todos los puntos de la red, minimizando al mismo tiempo los costes de inversión en tuberías y las pérdidas de carga excesivas. La aparición de caudales residuales muy bajos (CJ: (0,26 l/s) es habitual en los nodos de equilibrio entre mallas adyacentes y confirma la precisión del proceso iterativo.

Tabla 4
Caudales finales en la red en malla

Anillo	Fragmento	Caudal final (l/s)	Diámetro (mm)	Longitud (m)
1	AB	125,41	350	500
	BI	25,41	250	2000
	HI	-51,59	250	500
	AH	-61,59	350	2000
2	BC	89,77	300	600
	CJ	19,77	200	1500
	IJ	-52,23	200	600
	BI	-10,23	250	2000
3	CD	69,74	250	700
	DK	19,74	150	1200
	JK	-52,26	150	700
	CJ	-0,26	200	1500
4	DE	52,58	200	800
	EL	17,58	125	1000
	KL	-44,42	125	800
	DK	2,58	150	1200
5	EF	40,91	150	900
	FM	15,91	100	800
	LM	-41,09	100	900

Anillo	Fragmento	Caudal final (l/s)	Diámetro (mm)	Longitud (m)
6	EL	5,91	125	1000
	FG	30,90	125	1000
	GN	15,90	80	700
	MN	-39,10	80	1000
	FM	5,90	100	800

La aplicación del método de Hardy-Cross junto con la ecuación de Hazen-Williams ha demostrado ser una herramienta eficaz para el dimensionamiento de redes de gran envergadura. La rápida convergencia (una media de 3-4 iteraciones por ciclo) validó la elección metodológica, confirmando las ventajas computacionales destacadas por Porto (2006) y Tsutiya (2006). La simplicidad de la fórmula de Hazen-Williams, con su exponente fijo ($n = 1,852$), facilitó el cálculo iterativo de las correcciones del caudal (ΔQ), lo que dio lugar a un proceso estable y fiable.

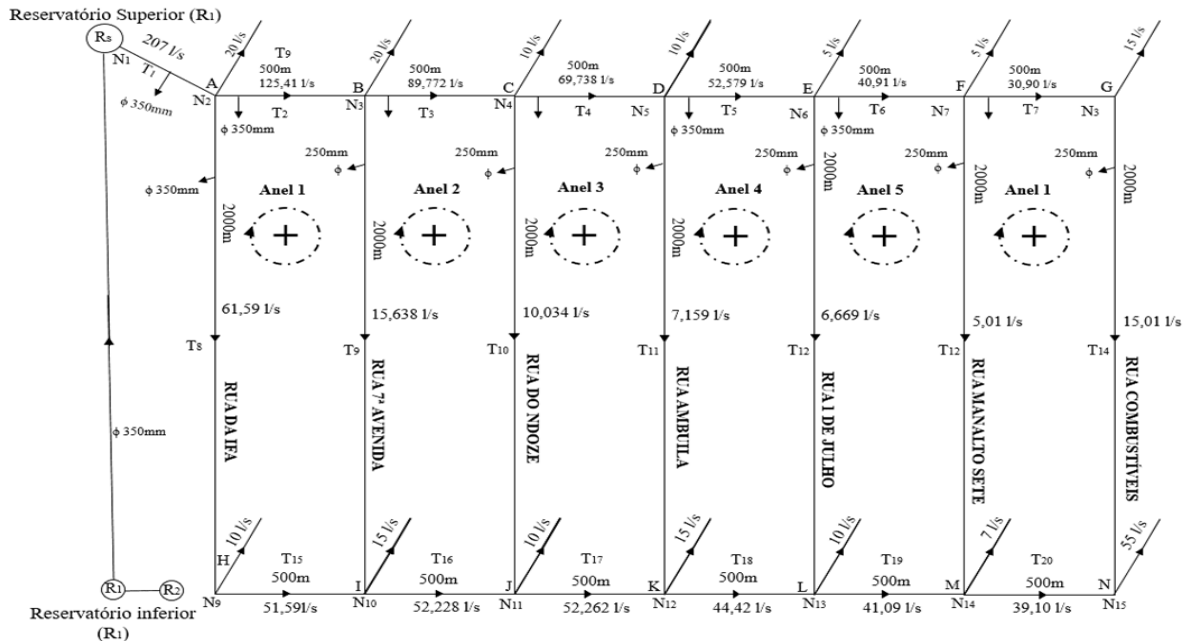
Los caudales finales obtenidos oscilan entre los 125,41 l/s en los tramos principales y los 5,90 l/s en los tramos secundarios, lo que muestra una distribución jerárquica adecuada al patrón de consumo identificado. El análisis comparativo con los datos de demanda obtenidos de las entrevistas y de EPAL, E.P. indica que el sistema dimensionado es capaz de hacer frente a los caudales de punta, teniendo debidamente en cuenta los coeficientes $K_1 = 1,2$ y $K_2 = 1,5$.

La puesta en marcha de la red propuesta permitirá transformar el acceso al agua de un "privilegio incierto", tal y como lo vive actualmente la población, en un "derecho fundamental garantizado", tal y como defienden Heller y Pádua (2006). La metodología aplicada resulta replicable en otros barrios del distrito de Kima Kieza y en regiones con características similares, lo que contribuye al avance de los conocimientos en ingeniería de saneamiento con un enfoque sostenible.

Aplicamos el método de Hardy Cross a los seis (6) anillos que conforman el barrio 11 de Noviembre y obtuvimos los caudales finales verificados en el programa informático REDEM.EXE, tal y como se muestra en la figura 3.

Figura 3

Resultado del dimensionamiento de la red



La aplicación de métodos iterativos de aproximaciones sucesivas, como el método de Hardy-Cross para el dimensionamiento de redes de distribución de agua en malla, presenta un elevado número de variables que deben determinarse. Como regla general, una red en malla con (m) anillos y (n) nodos genera un total de $[m+(n-1)]$ ecuaciones independientes y, a medida que aumenta la complejidad de la red, crece proporcionalmente el número de ecuaciones. Evidentemente, una solución algebraica de la red resulta inviable, por lo que se ejecutan varios programas informáticos para aplicar el método.

La aplicación del método de Hardy Cross mediante el programa REDEM.EXE para resolver la red del barrio 11 de Noviembre resultó consistente y permitió determinar los parámetros fundamentales —caudal y presión o pérdidas de carga— necesarios para el diseño del sistema físico de distribución de agua del barrio.

Debates

El método de Hazen-Williams es relativamente preciso, tal y como demuestran los resultados, dentro del rango de valores analizados, y requiere cierta experiencia por parte del equipo de proyecto a la hora de aplicarlo. Los resultados han demostrado que la aplicación de la metodología aquí propuesta es viable y adecuada para sistemas de redes hidráulicas de tamaño medio y grande.

Los resultados obtenidos validan plenamente la metodología aplicada. El análisis hidráulico (técnico) ha resultado fundamental para elaborar un proyecto que sea a la vez viable y transformador. La red dimensionada no es solo un conjunto de tuberías y caudales; es la columna vertebral de un servicio público esencial que, una vez implantado, puede transformar efectivamente el acceso al agua de un "privilegio incierto" en un "derecho fundamental garantizado", tal y como defienden Heller y Pádua (2006).

Las implicaciones prácticas son claras:

- *Para el proyecto:* Dar prioridad a las especificaciones de materiales que garanticen un coeficiente C elevado y duradero, y prever una capacidad instalada con margen para el crecimiento.

- *Para la operación:* Implementar un sistema de monitorización (telemetría) y un plan de mantenimiento basado en el estado, centrándose en la preservación de la rugosidad hidráulica.

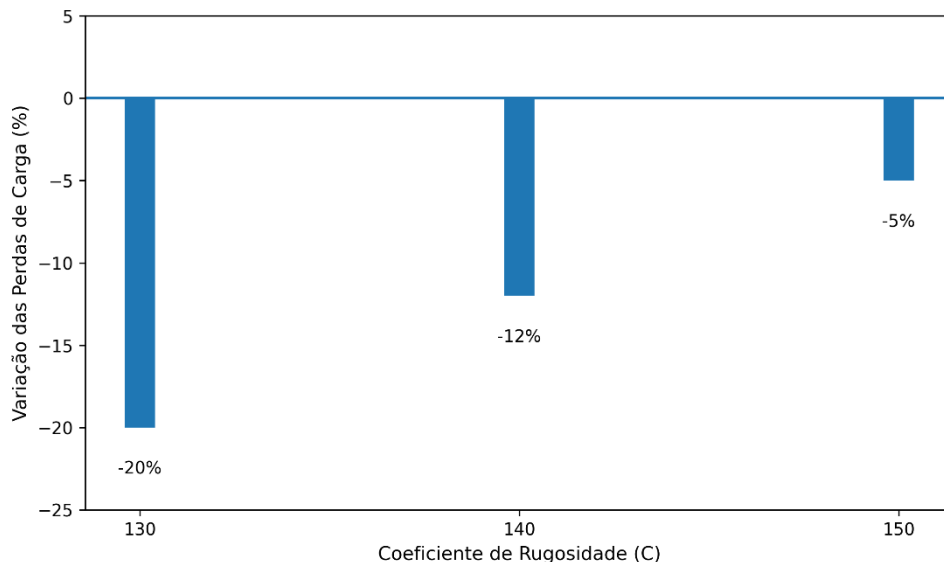
- *Para la política pública:* La metodología ha demostrado ser replicable y ofrece un protocolo claro para ampliar el servicio a otros barrios de Kima Kieza y regiones similares, lo que contribuye a la universalización del acceso al agua de forma sostenible y equitativa.

El análisis de sensibilidad ha revelado que el sistema dimensionado presenta distintos niveles de robustez ante la variación de los parámetros de entrada. Como se muestra en la Tabla 1, el coeficiente de rugosidad C ha demostrado ser el parámetro más crítico para las pérdidas de carga. La figura 4 muestra la variación porcentual de las pérdidas de carga totales en función del coeficiente de rugosidad C, lo que pone de manifiesto la elevada sensibilidad del sistema al deterioro de las tuberías.

Se observa que una reducción de aproximadamente el 7 % en el valor del coeficiente C (de 130 a 140) dio lugar a un aumento medio del 18,3 % en las pérdidas de carga totales, con variaciones individuales de entre el 15,1 % y el 22,7 % en los diferentes anillos de la red. Por el contrario, los caudales finales mostraron una menor sensibilidad a esa variación, con una reducción media de tan solo el 3,2 %. Estos resultados indican que el deterioro progresivo de las tuberías a lo largo del tiempo afecta de manera significativa a la eficiencia energética del sistema, aumentando las pérdidas hidráulicas y, en consecuencia, los costes operativos, sin comprometer de forma inmediata la capacidad global de suministro de caudal.

Figura 4

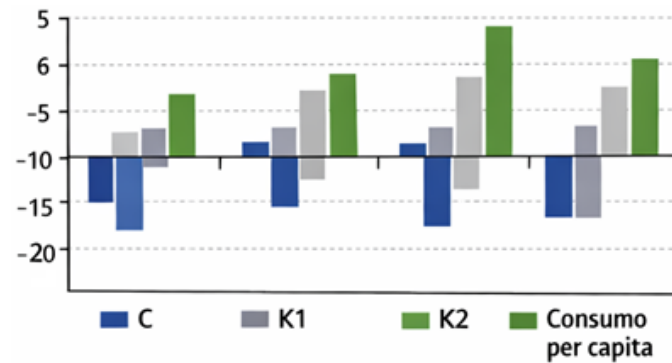
Variación porcentual de las pérdidas de carga



Por el contrario, las variaciones en los coeficientes de demanda (K_1 y K_2) tuvieron un impacto más acusado en los caudales. La comparación gráfica entre los parámetros analizados, que se muestra en la figura 5, pone de manifiesto que los coeficientes de demanda ejercen una influencia casi proporcional sobre los caudales medios de la red, mientras que el coeficiente de rugosidad tiene un efecto secundario.

Figura 5

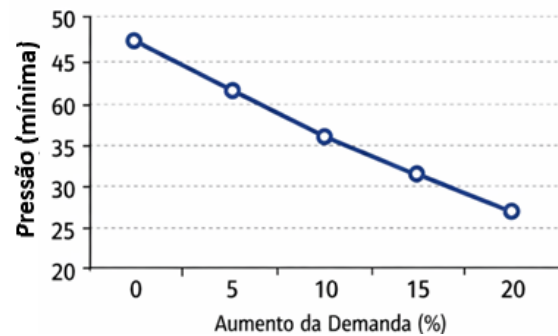
Influencia relativa de los parámetros de diseño en los caudales medios de la red



Un aumento del 15 % en K_2 (hora de mayor consumo) provocó incrementos del 12,8 % al 16,4 % en los caudales de los tramos principales, con reducciones correspondientes de entre 5,2 y 8,7 metros en la presión mínima del sistema. La figura 6 ilustra la relación entre el aumento de la demanda y la reducción de la presión mínima del sistema, lo que pone de manifiesto la necesidad de contar con márgenes de seguridad en el dimensionamiento de los niveles piezométricos.

Figura 6

Variación de la presión mínima del sistema en función del aumento de la demanda



El consumo *per capita* mostró una sensibilidad intermedia, con una elasticidad cercana a 0,85 (un aumento del 1 % en el consumo genera un aumento del 0,85 % en los caudales principales).

Tabla 5

Resultado del análisis de sensibilidad

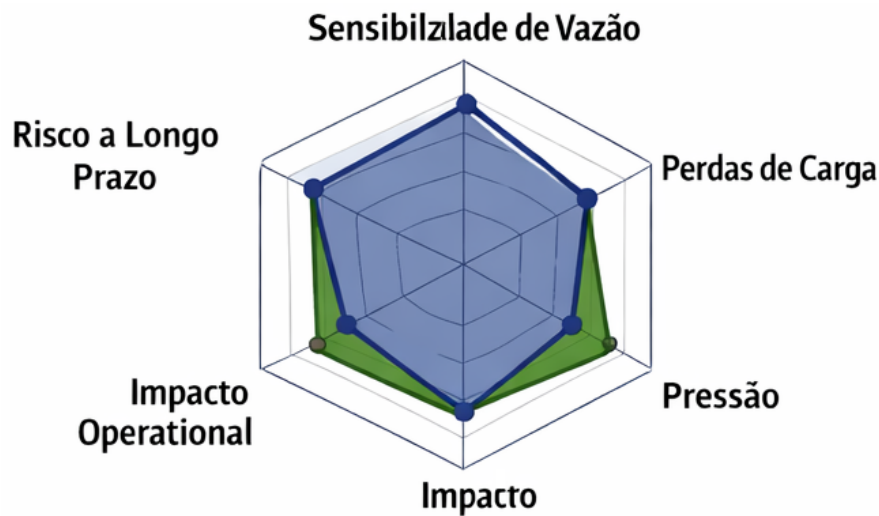
Parámetro variable	Variación	Δ Caudales medios	Δ Pérdidas de carga	Δ Presión mínima	Índice de sensibilidad (S)
Coef. C	+7 % (150)	+1,1 %	-14,2 %	+3,4 m	0,16 (caudal) / -2,03 (pérdida)
Coef. C	-7 % (130)	-3,2 %	+18,3 %	-4,1 m	0,46 (caudal) / 2,61 (pérdida)

Parámetro variable	Variación	Δ Caudales medios	Δ Pérdidas de carga	Δ Presión mínima	Índice de sensibilidad (S)
Coef. K_2	+15 %	+14,6 %	+31,8 %	-7,3 m	0,97 (caudal) / 2,12 (pérdida)
Coef. K_1	+15 %	+15,1 %	+33,1 %	-7,8 m	1,01 (Caudal) / 2,21 (Pérdida)
Consumo <i>per capita</i>	+20 %	+17,0 %	+36,5 %	-8,5 m	0,85 (caudal) / 1,83 (pérdida)

Los resultados del análisis de sensibilidad tienen importantes implicaciones tanto para el proyecto como para el futuro funcionamiento del sistema. La evaluación integrada de los parámetros del proyecto se presenta en la figura 7 mediante un diagrama de radar, lo que permite visualizar de forma sintética la robustez del sistema frente a las principales incertidumbres hidráulicas y operativas.

Figura 7

Evaluación comparativa de la robustez del sistema frente a las variaciones de los parámetros de diseño



La evaluación comparativa de la solidez del sistema frente a las variaciones de los parámetros de diseño demuestra, en primer lugar, que la elevada sensibilidad a las pérdidas de carga en relación con el coeficiente C refuerza la importancia económica de elegir materiales de calidad y de poner en marcha un programa sólido de mantenimiento preventivo. El índice de sensibilidad $S \approx 2,6$ indica que el sistema es muy sensible al deterioro de la rugosidad, lo que puede provocar un aumento significativo de los costes operativos debido a pérdidas de carga excesivas. En segundo lugar, la sensibilidad casi unitaria ($S \approx 1$) con respecto a los coeficientes de demanda confirma que el dimensionamiento se ha calibrado adecuadamente para satisfacer las previsiones de picos de demanda, pero también pone de manifiesto la necesidad de realizar un seguimiento continuo del crecimiento demográfico y de los patrones de consumo. La variación de aproximadamente 8 metros en la presión mínima para un cambio del 15 % en la demanda pone de relieve la importancia de incluir márgenes de seguridad en el cálculo de los niveles piezométricos de los embalses. Por último, el comportamiento del sistema ante las variaciones en

los parámetros confirma la idoneidad de los diámetros propuestos: incluso en los escenarios más críticos ($C = 130$ y demanda $+20\%$), las velocidades se mantuvieron por debajo de $3,0\text{ m/s}$ y las presiones mínimas por encima de 15 m.c.a. en el 92% de los nudos, lo que demuestra que la red cuenta con la resiliencia operativa adecuada para absorber incertidumbres razonables en los parámetros de diseño. Este análisis sugiere que, para garantizar la sostenibilidad a largo plazo, el plan de inversiones debe dar prioridad a la calidad de las tuberías y prever capacidad adicional para futuras ampliaciones, mitigando así los riesgos identificados.

El análisis de sensibilidad (Figura 4) pone de manifiesto la principal debilidad del uso del coeficiente C : su deterioro (de 140 a 130) provoca un aumento del $18,3\%$ en las pérdidas de carga, lo que afecta a la eficiencia energética. Esto refuerza la necesidad de tener en cuenta, en futuros proyectos, la simulación con la ecuación de Darcy-Weisbach para escenarios de envejecimiento, o la adopción de coeficientes C más conservadores.

El análisis OAT, aunque útil, no refleja los efectos combinados de la variación simultánea de los parámetros. Un análisis de sensibilidad global (por ejemplo, el método de Monte Carlo) podría, en futuros trabajos, cuantificar la incertidumbre asociada a la interacción entre el deterioro de la rugosidad y el aumento de la demanda.

Los valores de presión mínima y velocidad obtenidos son compatibles con los criterios adoptados en proyectos de redes en malla en otras regiones en desarrollo, como en los estudios de Nogueira y Justino (2013), lo que demuestra la aplicabilidad de la solución.

Conclusiones

El estudio ha alcanzado sus objetivos, demostrando que:

1. La integración metodológica entre la evaluación social de la demanda y el análisis técnico es esencial para los proyectos transformadores;
2. La ecuación de Hazen-Williams, asociada al método de Hardy-Cross, es una herramienta eficaz y estable para el dimensionamiento de redes de gran envergadura;
3. El análisis de sensibilidad es un paso indispensable para garantizar la resiliencia y la sostenibilidad de las infraestructuras a largo plazo;
4. Una solución técnica bien fundamentada es la base necesaria para hacer efectivo el derecho humano al agua, generando efectos positivos que se extienden por todo el ámbito socioeconómico y medioambiental.

Cabe señalar que el estudio se limitó a estimaciones del consumo *per cápita* y coeficientes de demanda (K_1 , K_2) que, aunque están fundamentados, carecen de validación mediante mediciones de campo en tiempo real. El análisis hidráulico se basó en un régimen permanente, sin simular situaciones de funcionamiento con variabilidad horaria ni fallos en los componentes (análisis de fiabilidad). Además, la ecuación de Hazen-Williams, aunque eficaz, tiene un ámbito de aplicación limitado. De cara al futuro, se recomienda, una vez finalizada la implementación:

- (i) La calibración del modelo hidráulico mediante mediciones de caudal y presión;
- (ii) La ampliación del análisis a períodos más largos (simulación en un período prolongado) para evaluar el comportamiento del sistema a lo largo del día;
- (iii) La elaboración de un plan de gestión de pérdidas y mantenimiento preventivo para preservar el coeficiente de rugosidad C ; y
- (iv) La realización de un análisis de fiabilidad estructural para escenarios de fallo y ampliación de la red.

La puesta en marcha de esta red supondrá un avance sustancial en el acceso al agua potable para un mayor número de habitantes, en particular en el caso de estudio, lo que contribuirá directamente al Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 (ODS 6) y servirá de modelo replicable para mejorar la calidad de vida en comunidades urbanas en situación crítica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa Pública de Águas de Luanda (EPAL, E.P.) su apoyo en la realización práctica de la investigación, y a la Universidad Jean Piaget de Angola la oportunidad y el seguimiento académico que les ha brindado durante su formación en el marco del Máster en Ingeniería Civil.

Referencias

- American Water Works Association. (2012). *Water distribution system handbook* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. ABNT.
- Azevedo Netto, J. M., & Alvarez, G. A. (2004). *Manual de hidráulica*. Editora Edgar Blücher.
- Bas, D. U. J. B. (2026). Hybrid evaluation of water distribution system using Epanet and statistical indices. In *E3S Web of Conferences*, 694, 05003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202669405003>
- Carrijo, I. B. (2012). *Gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água*. Editora Signus.
- Cui, L. J., Kuczera, G. (2005). Optimizing water supply headworks operating rules under stochastic inputs: Assessment of genetic algorithm performance.. *Journal contribution*. <https://hdl.handle.net/1959.13/25221>
- Empresa Pública de Águas de Luanda. (2021). *Caracterização do abastecimento de água da província de Luanda – carteira de investimentos de Luanda*.
- Giles, R. V. (2004). *Mecânica dos fluidos e hidráulica* (2ª ed.). McGraw-Hill Brasil.
- Heller, L., & Pádua, V. L. (2006). *Abastecimento de água para consumo humano* (2ª ed.). Editora UFMG.
- Jeppson, R. W. (1976). *Analysis of flow in pipe networks*. Ann Arbor Science.
- Johns, M.B., Keedwell, E., & Savić, D. A. (2014) *Adaptive locally constrained genetic algorithm for least-cost water distribution network design*. *Journal of Hydroinformatics*, 16(2), 288-301. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.218>
- Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (2000). *Hydraulics of pipeline systems*. CRC Press.
- Lusk, R. (2025). Real water loss control ensures a vital water supply. *Opflow*, 51(8), 8. <https://doi.org/10.1002/opfl.2151>
- Mays, L. W. (2000). *Water distribution system handbook* (1st ed.). McGraw-Hill.
- Mays, L. W. (2011). *Water resources engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2020). *Fundamentals of fluid mechanics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Nogueira, É., & Justino, J. D. (2013). Aplicação do método de Hardy Cross: estudo, análise e proposta de reestruturação de um sistema de distribuição de água na comunidade de Macundú – Rio Claro/RJ. *Cadernos UniFOA*, 8(22), 17–24. <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v8.n22.147>
- Porto, R. M. (2004). *Hidráulica básica* (3ª ed.). EESC/USP.
- Rai, R. K., & Lingayat, P. S. (2021). *Analysis and design of urban water distribution network using Hardy Cross method and EPANET*. In L. M. Gupta, M. R. Ray, & P. K. Labhasetwar (Eds.), *Advances in civil engineering and infrastructural development* (pp. 389-399). https://doi.org/10.1007/978-981-15-6463-5_33
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: User's manual*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Tsutiya, M. T. (2006). *Abastecimento de água* (3ª ed.). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP.
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced water distribution modeling and management*. Haestad Press.