

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
DISEÑO HIDRÁULICO DE UNA RED DE SUMINISTRO DE AGUA EN CIRCUITO EN UNA ZONA URBANA CRÍTICA MEDIANTE LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS

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 Morais

Universidade Jean Piaget de Angola, Kapalanga / Centro de Investigação y Desarrollo 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

RESUMO

Palavras chave:

distribuição de água,
dimensionamento do sistema,
hardy-croos, rede malhada, perda
de carga.

Esta pesquisa objetivou 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.

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.

Introdução

O sistema de abastecimento torna-se bastante complexo, não só quanto à manutenção e operação. Trata-se, em geral da parte mais dispendiosa do projecto global para fornecimento de água, exigindo considerável atenção no que concerne o consumo *per capita*, os parâmetros do sistema, hipóteses de cálculo assumidas e metodologias, de modo a se obter um projecto eficiente.

Luanda regista um crescimento populacional, agravado pelo êxodo rural. De acordo a EPAL-EP (2021), este cenário torna crítica a problemática do abastecimento de água à população. No bairro 11 de Novembro, Distrito urbano do Kima Kieza, município do Cazenga, acontece que o sistema de distribuição e abastecimento de água potável não é conveniente a servir toda população e as instalações, devido ao aumento das estruturas e da demografia. Por este ser um Bairro crítico, concentrou-se a atenção no sentido de introduzi-lo nesta investigação como caso de estudo, na qual espera-se encontrar uma solução da nova rede de distribuição e abastecimento de água naquela população que tem sido penalizada com a sua falha no sistema.

Face isto, o estudo objectivou de forma geral propor uma nova rede de distribuição e abastecimento de água, do tipo malhada. De forma específica, procurou-se: (1) Aplicar uma metodologia sistematizada para o dimensionamento hidráulico de uma rede malhada de grande porte no Bairro 11 de Novembro, Distrito do Kima Kieza, Luanda; (2) Elaborar um projecto executivo completo e tecnicamente viável para a referida rede, definindo uma hierarquia de diâmetros, garantindo caudais equilibrados e assegurando capacidade para responder às demandas de pico; (3) Realizar uma análise de sensibilidade do sistema projectado, identificando os parâmetros críticos para a sua sustentabilidade a longo prazo; e (4) Demonstrar a eficácia e a estabilidade da utilização conjunta da equação de Hazen-Williams e do método de Hardy-Cross como ferramenta para o dimensionamento de redes de distribuição de água de grande porte.

A determinação dos consumos e das vazões de sistemas de distribuição de água é uma etapa fundamental para o correto dimensionamento destas infraestruturas. As vazões de projecto devem atender aos diferentes tipos de consumo domésticos, comerciais, institucionais, industriais e públicos, além de prever as necessidades para combate a incêndios e compensar perdas de carga contínuas (h_f) e eventuais fugas. As expressões de cálculo de perdas de carga contínuas (h_f) estabelecem relações entre as seguintes seis variáveis hidráulicas principais: comprimento da tubulação (L), pressão (P), diâmetro (D), vazão (Q), perda de carga (h_f) e rugosidade interna (ϵ) (Nogueira & Justino, 2013).

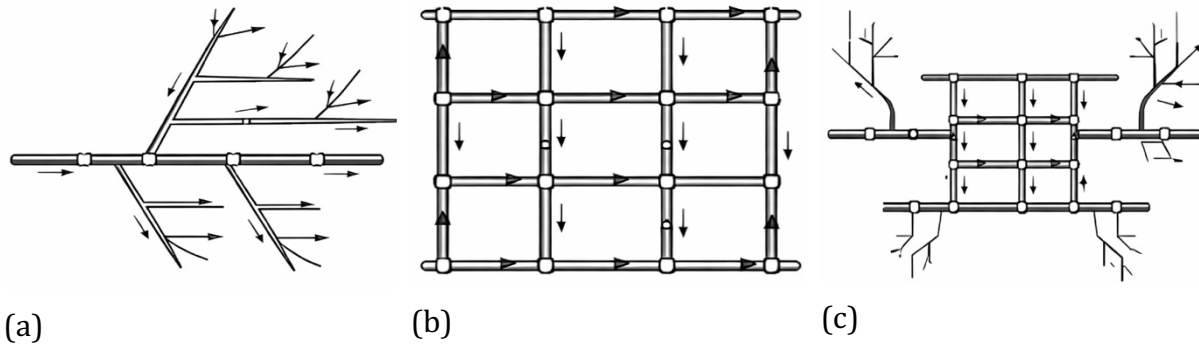
Não obstante a existência de normas e metodologias consolidadas para dimensionamento de redes de abastecimento, verifica-se uma carência de estudos aplicados ao contexto angolano que integrem, de forma sistematizada, a determinação da demanda local, o dimensionamento hidráulico com métodos clássicos e a análise de sensibilidade dos parâmetros críticos. Esta lacuna é particularmente sentida em bairros periféricos de Luanda, como o 11 de Novembro, onde o rápido crescimento urbano não foi acompanhado por projetos de engenharia que garantam a sustentabilidade e a resiliência do sistema a longo prazo.

Redes de distribuição de água

As redes de distribuição de água são um conjunto de reservatórios de distribuição até aos pontos de consumo, (ligações domiciliares). Existem três tipos de redes de distribuição, como se apresenta na figura a seguir:

Figura 1

(a) Rede ramificada, (b) Rede malhada e (c) Rede mista



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

A rede ramificada caracteriza-se por uma estrutura hierárquica em forma de árvore, na qual a distribuição da água ocorre a partir de uma tubulação tronco principal, que se divide progressivamente em tubulações secundárias e terciárias até alcançar os pontos de consumo. Este tipo de rede apresenta simplicidade de projecto e menor custo de implantação, sendo frequentemente utilizado em pequenas comunidades ou zonas periféricas. Contudo, possui baixa redundância hidráulica, o que pode provocar interrupções no abastecimento em caso de falhas ou manutenções (Walski et al., 2003; AWWA, 2012).

A rede malhada é composta por tubulações principais interligadas, formando anéis ou malhas fechadas, permitindo que a água chegue a qualquer ponto do sistema por múltiplos caminhos. Esta configuração proporciona maior confiabilidade operacional, melhor distribuição de pressões e maior flexibilidade em situações de manutenção ou emergência. Apesar do maior custo de construção, é amplamente adoptada em áreas urbanas de média e alta densidade populacional (Rossman, 2000; Mays, 2011).

A rede mista resulta da combinação das redes ramificada e malhada, sendo a solução mais comum nos sistemas reais de abastecimento de água. Geralmente, as áreas centrais e mais críticas do sistema utilizam redes malhadas, enquanto as regiões periféricas são atendidas por ramificações. Este tipo de rede busca um equilíbrio entre custo, confiabilidade e eficiência hidráulica (AWWA, 2012; Walski et al., 2003).

Método de Hardy-Cross

A rede mista resulta da combinação das redes ramificada e malhada, sendo a solução mais comum nos sistemas reais de abastecimento de água. Geralmente, as áreas centrais e mais críticas do sistema utilizam redes malhadas, enquanto as regiões periféricas são atendidas por ramificações. Este tipo de rede busca um equilíbrio entre custo, confiabilidade e eficiência hidráulica (AWWA, 2012; Walski et al., 2003).

É um método iterativo para equilíbrio de vazões em redes malhadas, baseado na Lei de Conservação de Massa (nós) e Conservação de Energia (malhas).

A perda de carga contínua em cada trecho é calculada por uma fórmula do tipo:

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

onde:

- Para Darcy-Weisbach: $n \approx 2$ (mas f depende de Re e rugosidade, podendo variar com Q)
- Para Hazen-Williams: $n = 1,852$ e k depende de C (coeficiente de rugosidade).

A análise do equilíbrio hidráulico de sistemas malhados de distribuição de água é baseada nas duas leis fundamentais da mecânica dos fluídos, a da continuidade e a da conservação da energia, e além disso, numa relação entre a vazão (ou velocidade) e a perda de carga (ou variação de pressão) (Munson et al., 2020), estabelecida através das equações de Darcy Weisbach (fórmula universal da perda de carga), ou Hazen Williams.

Equação de Hazen-Williams

A opção pela fórmula de Hazen-Williams no dimensionamento de redes de grande porte transcende a mera eficiência numérica, impactando diretamente a confiabilidade operacional e a sustentabilidade do sistema. A rapidez de convergência do método permite explorar mais cenários de demanda e falta, otimizando diâmetros e definindo configurações de rede mais robustas e resilientes (Tsutiya, 2006). Essa maior agilidade no cálculo viabiliza a análise de alternativas que garantam pressões mínimas adequadas em todos os pontos da rede, inclusive em períodos de pico ou em situações de crescimento populacional, assegurando o fornecimento equitativo de água um factor socioambiental crítico (Heller & Pádua, 2006). Do ponto de vista ambiental, a seleção criteriosa de coeficientes C realistas, associada a um dimensionamento hidráulico preciso, contribui para a redução de perdas por vazamento e para a minimização da energia necessária para o bombeamento, promovendo a eficiência energética e a conservação dos recursos hídricos (Carrijo, 2012). Portanto, a escolha metodológica reflecte-se não apenas na engenharia da rede, mas também na sua capacidade de servir à sociedade de forma justa e ambientalmente responsável.

A selecção entre as equações de Hazen-Williams e Darcy-Weisbach define a dinâmica e a eficiência do processo interactivo de equilíbrio hidráulico.

Não obstante as suas vantagens práticas, a aplicação da equação de Hazen-Williams possui limitações que devem ser explicitadas. A sua validade é reconhecida para o escoamento de água a temperaturas habituais (cerca de 20°C) em regime turbulento rugoso, o que é típico em redes de distribuição. No entanto, para situações de diâmetros muito pequenos, velocidades reduzidas (regime laminar ou de transição) ou fluídos com viscosidade significativamente diferente, a equação de Darcy-Weisbach, por ser teoricamente mais abrangente, seria a escolha mais adequada (Giles, 2004). Adicionalmente, o coeficiente de rugosidade ' C ' não é constante ao longo da vida útil da tubulação, diminuindo com o envelhecimento, incrustação e corrosão, um aspeto crítico que a presente análise de sensibilidade procurou avaliar (Mays, 2000).

Enquanto a fórmula universal de Darcy-Weisbach apresenta uma relação onde o expoente n é aproximadamente 2, mas o coeficiente f varia implicitamente com o número de Reynolds e a rugosidade, a equação de Hazen-Williams se destaca pela sua simplicidade estrutural, com expoente fixo $n = 1.852$ e um coeficiente k que depende unicamente do coeficiente de rugosidade C do material (Azevedo Netto & Alvarez, 2004).

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

Esta característica torna a relação vazão-perda de carga explícita e direta, simplificando consideravelmente os cálculos dentro do algoritmo iterativo do Hardy-Cross (Tsutiya, 2006).

Para redes de distribuição de água potável, a escolha pela fórmula de Hazen-Williams é amplamente justificada por um conjunto de vantagens práticas decisivas. Em primeiro lugar, sua simplicidade computacional acelera o processo: com expoente n constante, o cálculo da correção de vazão por malha (ΔQ) torna-se mais estável e directo, sem a necessidade de reavaliar um fator de atrito f variável a cada iteração (Porto, 2004). Consequentemente, observa-se uma velocidade de convergência superior, com menor número de ciclos necessários para atingir o equilíbrio. Esta eficiência é complementada pela sua facilidade de implementação em ferramentas computacionais comuns, como planilhas electrónicas. Adicionalmente, manuais de referência como Azevedo Netto e Tsutiya, que fornecem tabelas padronizadas do coeficiente C , garante compatibilidade e confiabilidade aos projectos (Tsutiya, 2006). Por fim, a adequação ao regime de escoamento típico em redes de abastecimento o turbulento rugoso valida o uso desta fórmula empírica, originalmente calibrada para estas condições.

Limitação da equação de Hazen-Williams

Apesar destes aspectos, a aplicação da equação de Darcy-Weisbach permanece essencial em cenários específicos onde o rigor físico e a precisão ampla são imperativos. Esta fórmula universal deve ser considerada quando o sistema opera com fluidos cuja viscosidade difere significativamente da água a 20°C, como em casos de temperaturas extremas ou outros líquidos (Giles, 2004). Ela também se torna necessária em regimes de escoamento não-turbulentos, como em condutos com diâmetros muito reduzidos ou velocidades muito baixas, onde podem ocorrer os regimes laminar ou de transição, fora do domínio de validade da Hazen-Williams. Por fim, quando a rugosidade absoluta (ϵ) do material é conhecida com elevada precisão e o projetista busca o máximo de rigor físico na modelagem, a fórmula de Darcy-Weisbach, fundamentada na mecânica dos fluidos, oferece uma representação mais abrangente e precisa da física do escoamento para qualquer condição (Azevedo Netto & Alvarez, 2004).

A evolução do dimensionamento de redes de abastecimento parte de métodos clássicos como Hardy-Cross e incorpora abordagens contemporâneas baseadas em otimização e calibração avançada. Johns, Keedwell e Savić (2014) contribuíram com o algoritmo genético ALCO-GA, que aumenta a eficiência da busca por soluções viáveis em redes complexas. Cui e Kuczera (2025) ampliaram essa perspectiva ao aplicar algoritmos genéticos na otimização de regras operacionais, visando a minimização de custos anuais em sistemas sujeitos a incertezas.

No campo da calibração, Rai e Lingayat (2021) validaram o uso do EPANET ao comparar seus resultados com soluções analíticas obtidas pelo método de Hardy-Cross. Bas (2026) aprofundou essa abordagem ao integrar o EPANET com índices estatísticos como MBE e NSE, demonstrando que modelos calibrados com dados de campo alcançam alta confiabilidade nas simulações de pressão e vazão.

Isso reforça a necessidade de associar o dimensionamento a estratégias de controle operacional e de gestão de perdas, conforme Lusk (2025) destaca ao abordar o controle de perdas reais de água como elemento fundamental para garantir a vitalidade do abastecimento.

Método

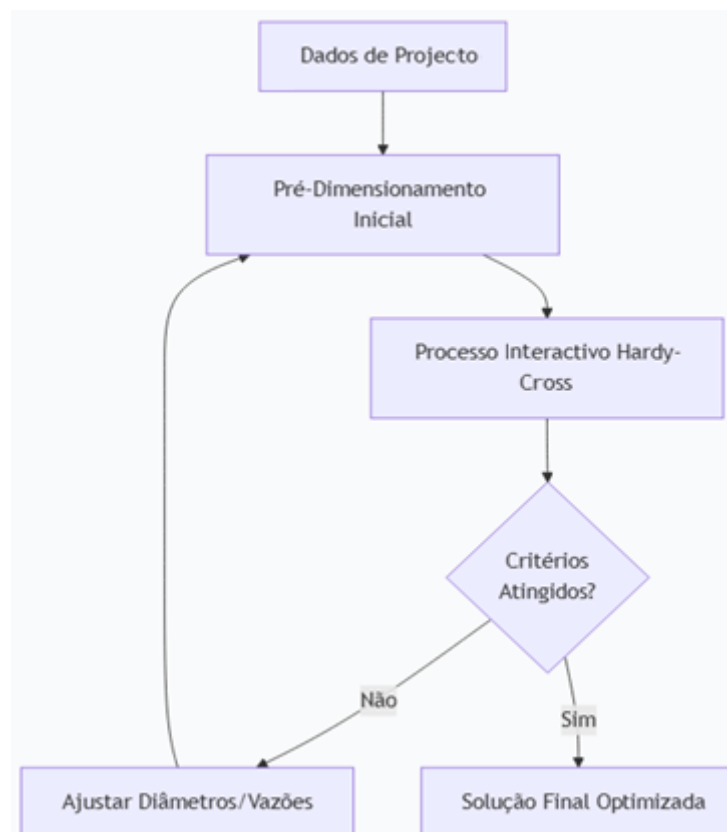
Para o dimensionamento de uma rede de abastecimento e distribuição de água de grande porte, a metodologia deste estudo centrou-se em duas fases interligadas: a determinação precisa da demanda hídrica e a análise hidráulica da rede.

A quantificação da demanda partiu de uma análise demográfica e de padrões de consumo, utilizando dados primários obtidos por meio de entrevistas estruturadas com a população-alvo e de consultas técnicas à Empresa Pública de Águas de Luanda (EPAL, E.P.), Arc Gis 10.8 para mapeamento, Auto Cad 2021 para levantamento topográfico, Handy GPS (free) para direccionamento e Redem.Exe (Epanet 2,0.) para cálculos de perdas de cargas. Esta abordagem permitiu definir a vazão média diária, o coeficiente do dia de maior consumo (K_1) e o coeficiente da hora de maior consumo (K_2), parâmetros fundamentais para o cálculo das vazões de projecto que garantem a capacidade do sistema em atender às solicitações máximas.

A metodologia para o dimensionamento da rede foi conduzida segundo a abordagem sistemática ilustrada na Figura a seguir, que integra os princípios fundamentais da hidráulica de redes com critérios técnicos de projecto.

Figura 2

Fluxograma metodológico do dimensionamento hidráulico



O dimensionamento partiu das seguintes **hipóteses fundamentais**:

- (i) Regime permanente e uniforme;
- (ii) Coeficiente de rugosidade $C=140$ para tubulações novas de PVC/PEAD, conforme Azevedo Netto & Alvarez (2004);

(iii) Critérios de projeto baseados na norma NBR 12218 (ABNT, 2027), com pressão dinâmica mínima de 15 m.c.a. e velocidade máxima de 3,0 m/s. A topologia da rede (Figura 3) foi definida com base no levantamento topográfico e mapeamento (AutoCAD, ArcGIS). A vazão de projeto foi calculada como:

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

Onde: Q_{med} = vazão média diária, obtida a partir da população de projecto e do consumo per capita (resultante de entrevistas e dados da EPAL), com $K_1=1,2$ e $K_2=1,5$.

A população do projecto foi estimada em 33.334 habitantes, com base em (dados do Censo/ projecções da EPAL e projectada a 41.668 habitantes em 2044, vinte anos depois), resultando num consumo per capita de [200 litros/habitante dia] e uma vazão média diária (Q_{med}) de 207 L/S.

A solução iterativa do equilíbrio hidráulico através do Método de Hardy-Cross, implementado com a equação de Hazen-Williams (Equação 2). Esta escolha justificou-se pela sua eficiência computacional em sistemas de grande escala, uma vez que a fórmula, com seu expoente fixo ($n=1,852$) e coeficiente de rugosidade (C) constante por material, simplifica o cálculo iterativo de equilíbrio de vazões e perdas de carga, a partir de:

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

Onde: $C=140$, L (m), D (m), Q (m^3/s). A forma apresentada (com 0,2785) é equivalente, trabalhando com L (m), D (m) e Q (L/s).

O somatório das perdas de carga no anel ($\Sigma\Delta H$) deve ser próximo de zero, indicando equilíbrio de energia.

A tabela a seguinte descreve os parâmetros de cada trecho:

Tabela 1
Parâmetros de cada trecho

Trecho	Comprimento, L (m)	Diâmetro, D (m)	Coefficiente C	Vazão 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 os cálculos manuais, utilizou-se a forma equivalente:

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

Com Q em L/s, L em m, e D em m.

Para cada malha k em cada iteração n , o processo seguiu as etapas.

Determinação da perda de carga para cada trecho i da malha, a partir de:

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

onde $k_i = \frac{1}{(0,2785 \cdot C)^{1,85}} \cdot \frac{L_i}{D_i^{4,87}}$ (constante do trecho).

A verificação do equilíbrio é dada por:

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

onde m = número de trechos na malha.

O critério de convergência é dado por:

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

com $\varepsilon = 0,01$ m adotado como tolerância.

Se necessário realiza-se o cálculo da correção de Vazão se $|\Sigma \Delta H^{(n)}| > \varepsilon$, usa-se:

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

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

Segue-se o cálculo da actualização das vazões para cada trecho i , a partir de:

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

Onde: $\sigma_i = +1$ se o sentido do trecho coincide com a orientação positiva da malha (horário), e $\sigma_i = -1$ caso contrário.

Por fim realiza-se a repetição até convergência através da repetição as etapas 1-4 até $|\Sigma \Delta H^{(n)}| \leq \varepsilon$ para todas as malhas.

Na substituição dos dados forma adaptadas as seguintes convenções para o sinal das vazões, sendo Positivo (+): fluxo no sentido horário; e Negativo (-): fluxo no sentido anti-horário. Para o Sinal das perdas de carga, Positivo (+): perda de carga no sentido do fluxo adotado como positivo; e Negativo (-): perda de carga no sentido oposto. Cada malha foi tratada separadamente, com correções propagadas para trechos comuns.

Para avaliar a robustez e confiabilidade do dimensionamento proposto face às incertezas inerentes aos parâmetros de entrada, foi realizada uma análise de sensibilidade sistemática. Esta análise seguiu a abordagem *one-factor-at-a-time* (OAT), na qual cada parâmetro crítico foi variado individualmente enquanto os demais eram mantidos constantes em seus valores nominais.

Foram selecionados três parâmetros considerados mais sensíveis e sujeitos a maior incerteza: (1) o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (C), variado em ± 10 unidades em torno do valor base ($C=140$) para simular condições de tubulação nova ($C=150$), padrão ($C=140$) e deteriorada ($C=130$); (2) os coeficientes de consumo (K_1 e K_2), variados individualmente em $\pm 15\%$ para representar flutuações nas estimativas de demanda; e (3) o consumo *per capita*, variado em $\pm 20\%$ para refletir diferentes cenários de hábitos de consumo. Para cada combinação de parâmetros, o método de Hardy-Cross

foi reaplicado à rede completa, e as variações percentuais nas vazões finais, perdas de carga e pressões mínimas foram calculadas. O índice de sensibilidade (S) foi quantificado como a razão entre a variação relativa na variável de saída ($\Delta Y/Y$) e a variação relativa no parâmetro de entrada ($\Delta X/X$). Esta análise permitiu identificar quais parâmetros exercem maior influência no desempenho do sistema e estabelecer margens de segurança apropriadas para o projecto.

Para verificar a consistência dos resultados, compararam-se as vazões finais do Anel 1 obtidas pelo processo iterativo manual (Tabela 2) com as resultantes da simulação no software REDEM.EXE (Figura 3). As diferenças observadas foram inferiores a 0,1 L/s em todos os trechos, validando a implementação do método e a precisão dos cálculos.

Resultados

O sistema de abastecimento de água existente caracteriza-se por uma adutora com diâmetros entre 250 mm e 350 mm. A rede de distribuição apresenta tubulações principais com diâmetro máximo de 110 mm, enquanto as tubulações secundárias operam com diâmetro mínimo de 90 mm.

O Distrito de Kima Kieza enfrenta graves deficiências no setor de abastecimento hídrico, que podem ser sintetizadas em três problemas estruturais principais: (1) a inexistência de uma rede de distribuição ramificada e adequadamente dimensionada; (2) a operação irregular e imprevisível da infraestrutura existente, que fornece água apenas em horários aleatórios; e (3) a conseqüente dependência da população de soluções informais, obrigando os residentes a procurar água em residências de vizinhos ou em fontes alternativas, comprometendo a qualidade do recurso e a segurança da comunidade.

Esta situação precária gera impactos socioambientais multidimensionais que transcendem a simples deficiência técnica. No âmbito social, a irregularidade no abastecimento impõe uma carga desproporcional sobre mulheres e crianças, tradicionalmente responsáveis pela colecta de água, limitando seu tempo para educação, trabalho remunerado e lazer. A prática de busca de água em fontes alternativas, muitas vezes não tratadas, aumenta a incidência de doenças de veiculação hídrica, sobrecarregando o sistema de saúde pública e perpetuando ciclos de pobreza. Além disso, a insegurança hídrica acentua tensões comunitárias e gera vulnerabilidade econômica, uma vez que famílias empobrecidas gastam parte significativa da sua renda na compra informal de água.

No plano ambiental, o sistema deficiente promove o desperdício crónico de recursos hídricos através de vazamentos não controlados na rede obsoleta e da falta de medição. A pressão sobre fontes alternativas, como poços superficiais, pode levar à sua contaminação ou esgotamento, comprometendo os aquíferos locais. A energia desperdiçada no bombeamento de água através de uma rede ineficiente também representa um custo ambiental significativo em termos de emissões de carbono.

Portanto, o redimensionamento da rede malhada com a equação de Hazen-Williams não representa apenas uma otimização hidráulica, mas uma intervenção de justiça ambiental e social. Um sistema bem dimensionado, que garanta pressão e vazão adequadas 24 horas por dia, é pré-requisito para a promoção da saúde pública, a equidade de género, a coesão social e a sustentabilidade dos recursos hídricos, transformando o acesso à água de um privilégio incerto num direito fundamental garantido.

A aplicação da metodologia proposta resultou no dimensionamento completo da rede malhada para o bairro 11 de Novembro, utilizando o método de Hardy-Cross em conjunto com a equação de Hazen-Williams. Este binómio metodológico, clássico na

hidráulica de redes de distribuição, fundamenta-se no balanço de massa (conservação da vazão nos nós) e de energia (conservação da perda de carga ao longo de cada malha fechada). A sua escolha é comprovada pela literatura, que o destaca pela robustez e eficiência computacional na solução iterativa de sistemas com múltiplos anéis, onde uma solução analítica direta é impraticável (Larock et al., 2000; Jeppson, 1976).

A Tabela 2 apresenta o resumo do processo iterativo para o Anel 1, demonstrando a convergência do método. O critério de convergência, onde a soma das perdas de carga ($\Sigma\Delta H$) em cada malha tende a zero, garante que o princípio de conservação de energia é satisfeito para os sentidos de fluxo assumidos. A rápida convergência observada estabilização em apenas 4 iterações, é uma vantagem operacional direta do uso da equação de Hazen-Williams. A sua forma simplificada, com o expoente fixo da vazão, permite cálculos mais ágeis e garante estabilidade numérica ao método iterativo de Hardy-Cross, especialmente em redes com grande número de anéis.

Tabela 2

Processo iterativo do método de Hardy-Cross - Anel 1

Iteração	Trecho	Q inicial (l/s)	ΔH (m)	$\Delta H/Q$	ΔQ correção	Q corrigida (l/s)
Inicial	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
			+0,34	0,1359		
Soma 1ª	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		
Soma 2ª	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		
Soma 3ª	AB	125,41	+2,04	0,0163	0,00	125,41

Iteração	Trecho	Q inicial (l/s)	ΔH (m)	$\Delta H/Q$	ΔQ correção	Q corrigida (l/s)
	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
Soma			0,00	0,1770		

A escolha do coeficiente de rugosidade $C = 140$ para tubulações novas (geralmente associado a materiais como PVC, PEAD ou aço revestido) é um parâmetro crítico e justificável. Este valor, embora optimista para a condição inicial, estabelece uma base de desempenho ideal e serve como referência para análises de sensibilidade e planeamento de manutenção. É consensual na literatura que o valor de C decai ao longo do tempo devido a processos de incrustação e corrosão, impactando severamente a eficiência hidráulica. A análise de sensibilidade subsequente, que explora este declínio, é, portanto, uma prática essencial de projecto (Mays, 2000).

A Tabela 3 apresenta a síntese com os indicadores globais de desempenho da rede:

Tabela 3
Indicadores Globais de Desempenho da Rede Dimensionada

Indicador	Valor	Critério de Projeto	Conformidade
Vazão total (L/s)	[Calcular a soma das vazões de entrada]	-	-
Diâmetros (mm)	80 - 350	-	-
Velocidade média (m/s)	0,56	$\leq 3,0$ m/s	Sim
Velocidade máxima (m/s)	2,9	$\leq 3,0$ m/s	Sim
Pressão mínima (m.c.a.)	16,78 m.c.a.	≥ 15 m.c.a.	92% dos nós atendem
Nós com pressão < 15 m.c.a.	8% [Nós 5 e 6; 12 e 13 (para anel 4); Nós 6 e 7; 13 e 14 (para anel 5); Nós 7 e 8; 14 e 15 (para anel 6)]	-	Sim

A aplicação da metodologia de cálculo, também permitiu encontrar as seguintes pressões médias dos anéis:

- A pressão média do anel 4 = 13,96 m.c.a.;
- A pressão média do anel 5 = 12 m.c.a.;
- A pressão média do anel 6 = 11,71 m.c.a.

- A pressão média geral = 16,78 m.c.a. (para os restantes anéis).

Apesar de 92% dos nós apresentarem pressões superiores a 15 m.c.a., os 8% restantes (correspondentes aos nós 5,6,7,8,12,13,14, e 15, situados nas cotas mais elevadas da rede) apresentam pressões entre 12 e 14 m.c.a. Esta condição, embora abaixo do critério ótimo, pode ser aceitável em cenários de pico, mas recomenda-se, em fase de projeto executivo, avaliar a setorização destas áreas ou a instalação de boosters (válvulas reguladoras de pressão) para garantir o nível de serviço em todas as condições.

Os resultados consolidados para toda a rede, apresentados na Tabela 3, revelam uma arquitetura hidráulica coerente e hierarquizada. A progressão lógica dos diâmetros desde 350 mm nos trechos tronco (AB, BC, CD, DE, EF, FG e AH) até 80 mm nos ramais finais (GN) e o gradiente correspondente nas vazões finais (de 125.41 l/s para 5.90 l/s) reflectem um adequado zonamento de pressão e vazão. Esta hierarquia é fundamental para garantir pressões de serviço adequadas em todos os pontos da rede, minimizando simultaneamente custos de investimento em tubagem e perdas de carga excessivas. A ocorrência de vazões residuais muito baixas (CJ: 0.26 l/s) é comum em nós de equilíbrio entre malhas adjacentes e confirma a precisão do processo iterativo.

Tabela 4
Vazões finais na rede malhada

Anel	Trecho	Vazão Final (l/s)	Diâmetro (mm)	Comprimento (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

Anel	Trecho	Vazão Final (l/s)	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)
5	EL	17,58	125	1000
	KL	-44,42	125	800
	DK	2,58	150	1200
	EF	40,91	150	900
	FM	15,91	100	800
	LM	-41,09	100	900
	EL	5,91	125	1000
6	FG	30,90	125	1000
	GN	15,90	80	700
	MN	-39,10	80	1000
	FM	5,90	100	800

A aplicação do método de Hardy-Cross com a equação de Hazen-Williams demonstrou ser uma ferramenta eficiente para o dimensionamento de redes de grande porte. A convergência rápida (em média 3-4 iterações por anel) validou a escolha metodológica, confirmando as vantagens computacionais destacadas por Porto (2006) e Tsutiya (2006). A simplicidade da fórmula de Hazen-Williams, com seu expoente fixo ($n = 1,852$), facilitou o cálculo iterativo das correções de vazão (ΔQ), resultando em um processo estável e confiável.

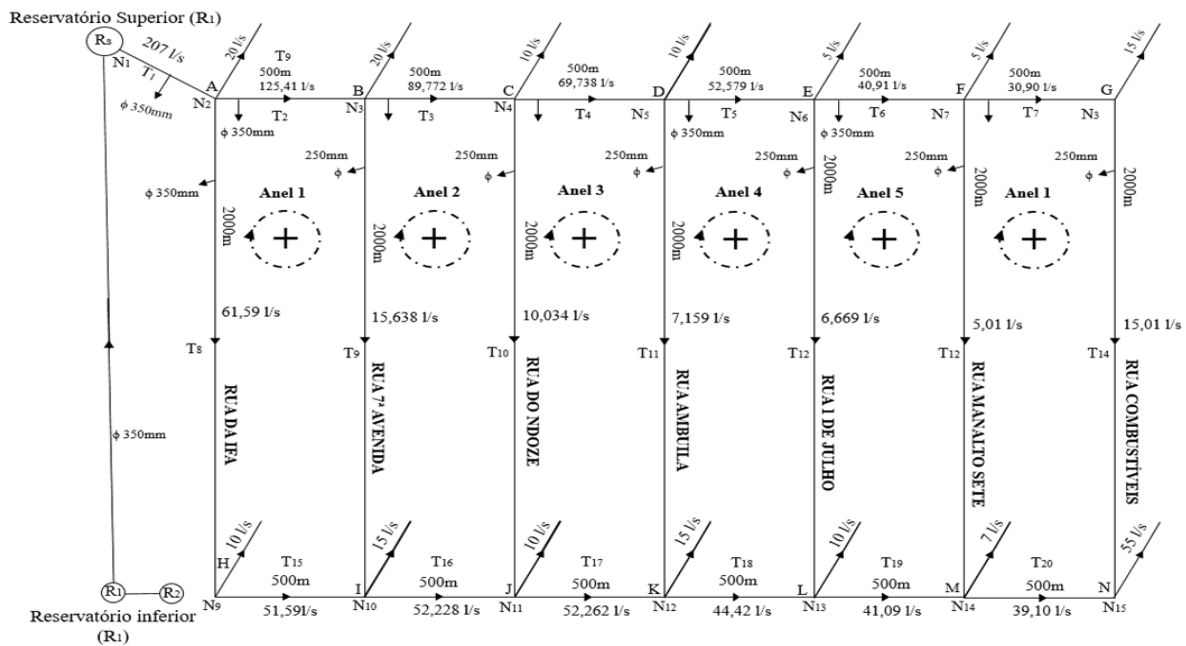
As vazões finais obtidas variam de 125,41 l/s nos trechos principais a 5,90 l/s nos trechos secundários, mostrando uma distribuição hierárquica adequada ao padrão de consumo identificado. A análise comparativa com os dados de demanda obtidos das entrevistas e da EPAL, E.P. indica que o sistema dimensionado é capaz de atender às vazões de pico, com coeficientes $K_1 = 1,2$ e $K_2 = 1,5$ adequadamente considerados.

A implementação da rede proposta permitirá transformar o acesso à água de um "privilégio incerto", como atualmente vivenciado pela população, em um "direito fundamental garantido", conforme preconizado por Heller e Pádua (2006). A metodologia aplicada mostra-se replicável para outros bairros do Distrito de Kima Kieza e regiões com características similares, contribuindo para o avanço do conhecimento em engenharia de saneamento com enfoque sustentável.

Aplicamos o método de Hardy Cross para seis (6) anéis que constituem o bairro 11 de novembro e conseguimos as vazões finais verificadas no programa computacional REDEM.EXE, na figura 3.

Figura 3

Resultado dos dimensionamentos da rede



A aplicação de métodos iterativos de aproximações sucessivas, como método de Hardy Cross para dimensionamento de redes malhadas de distribuição de água, apresenta um número elevado de variáveis a serem determinadas. Como regra geral, uma rede malhada com (m) anéis e (n) nós, gera um total de $[m+(n-1)]$ equações independentes e à medida que a complexidade da rede aumenta cresce proporcionalmente o número de equação. Evidentemente, uma solução algébrica da rede torna se impraticável, portanto se lança mais de um programa computacional para a aplicação do método.

A aplicação do método de Hardy Cross através do software REDEM.EXE, para solução da malha do bairro 11 de Novembro apresentou se consistente e possibilitou a determinação de parâmetros fundamentais: vazão e pressão ou perdas de cargas para a consecução do sistema físico de distribuição de água no bairro.

Discussões

O método de Hazen Williams, é relativamente preciso, conforme e demonstram os resultados, dentro da faixa de valores analisados, e demanda certa experiência por parte do projecto em sua aplicação. Os resultados comprovaram que a execução da metodologia aqui proposta é exequível e apropriada para sistema de malhas hidráulicas de médio e grande porte.

Os resultados obtidos validam plenamente a metodologia aplicada. A análise hidráulica (técnica) mostrou-se fundamental para gerar um projecto que seja simultaneamente exequível e transformador. A rede dimensionada não é apenas uma coleção de tubos e vazões; é a espinha dorsal de um serviço público essencial que, quando implementado, pode efectivamente transformar o acesso à água de um "privilégio incerto" num "direito fundamental garantido", tal como defendido por Heller & Pádua (2006).

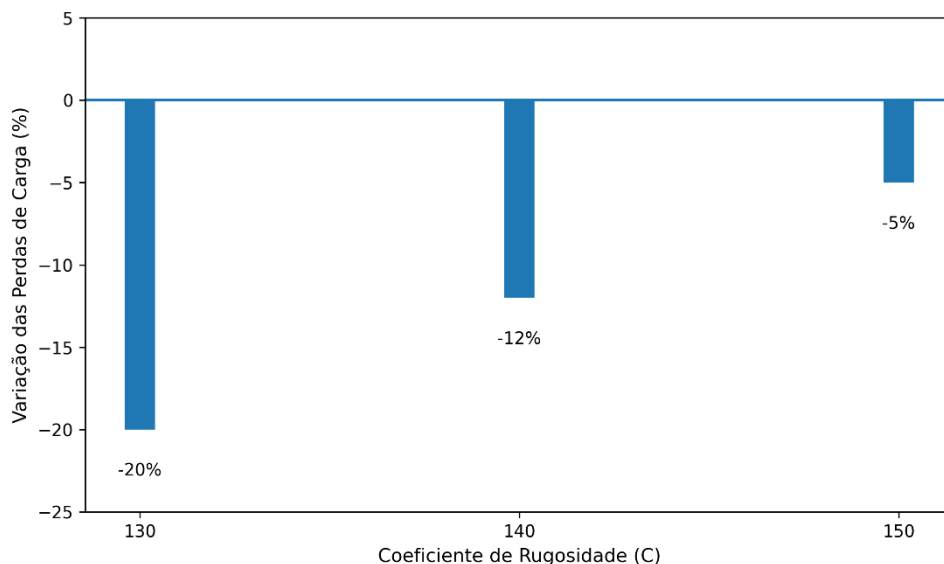
As implicações práticas são claras:

- *Para o Projecto:* Priorizar especificações de materiais que garantam um coeficiente C elevado e durável, e prever capacidade instalada com margem para crescimento.
- *Para a Operação:* Implementar um sistema de monitoramento (telemetria) e um plano de manutenção baseado em condição, focando na preservação da rugosidade hidráulica.
- *Para a Política Pública:* A metodologia demonstra-se replicável, oferecendo um protocolo claro para a expansão do serviço a outros bairros de Kima Kieza e regiões similares, contribuindo para a universalização do acesso à água de forma sustentável e equitativa.

A análise de sensibilidade revelou que o sistema dimensionado apresenta diferentes níveis de robustez frente à variação dos parâmetros de entrada. Como mostrado na Tabela 1, o coeficiente de rugosidade C demonstrou ser o parâmetro mais crítico para as perdas de carga. O Figura 4, apresenta a variação percentual das perdas de carga totais em função do coeficiente de rugosidade C, evidenciando a elevada sensibilidade do sistema à degradação das tubulações.

Observa-se que uma redução de aproximadamente 7% no valor do coeficiente C (de 130 para 140) resultou em um aumento médio de 18,3% nas perdas de carga totais, com variações individuais entre 15,1% e 22,7% nos diferentes anéis da rede. Em contraste, as vazões finais apresentaram menor sensibilidade a essa variação, com uma redução média de apenas 3,2%. Esses resultados indicam que a degradação progressiva das tubulações ao longo do tempo impacta significativamente a eficiência energética do sistema, elevando as perdas hidráulicas e, conseqüentemente, os custos operacionais, sem comprometer de forma imediata a capacidade global de atendimento de vazão.

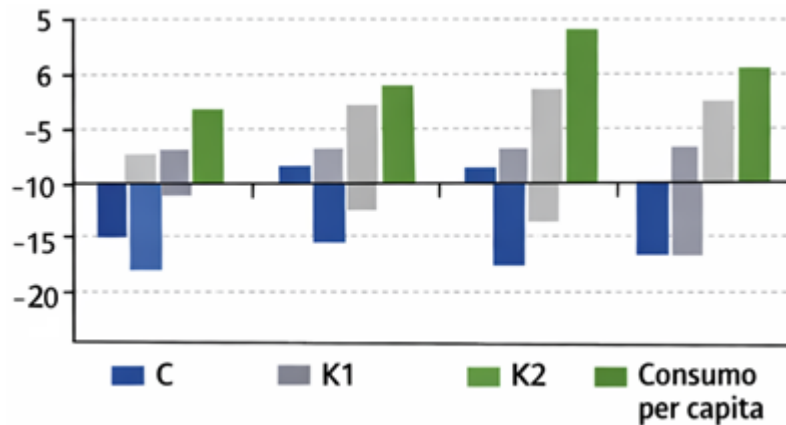
Figura 4
Variação percentual das perdas de carga



Em contrapartida, variações nos coeficientes de demanda (K_1 e K_2) impactaram mais fortemente as vazões. A comparação gráfica entre os parâmetros analisados, apresentada no Figura 5, demonstra que os coeficientes de demanda possuem influência quase proporcional sobre as vazões médias da rede, enquanto o coeficiente de rugosidade apresenta efeito secundário.

Figura 5

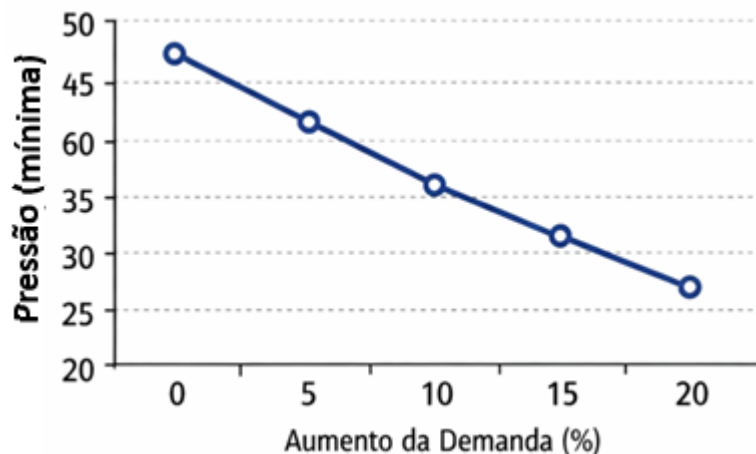
Influência relativa dos parâmetros de projecto nas vazões médias da rede



Um aumento de 15% em K_2 (hora de maior consumo) gerou incrementos de 12,8% a 16,4% nas vazões dos trechos principais, com reduções correspondentes de 5,2 a 8,7 metros na pressão mínima do sistema. O Figura 6 ilustra a relação entre o aumento da demanda e a redução da pressão mínima do sistema, evidenciando a necessidade de margens de segurança no dimensionamento das cotas piezométricas.

Figura 6

Varição da pressão mínima do sistema em função do aumento da demanda



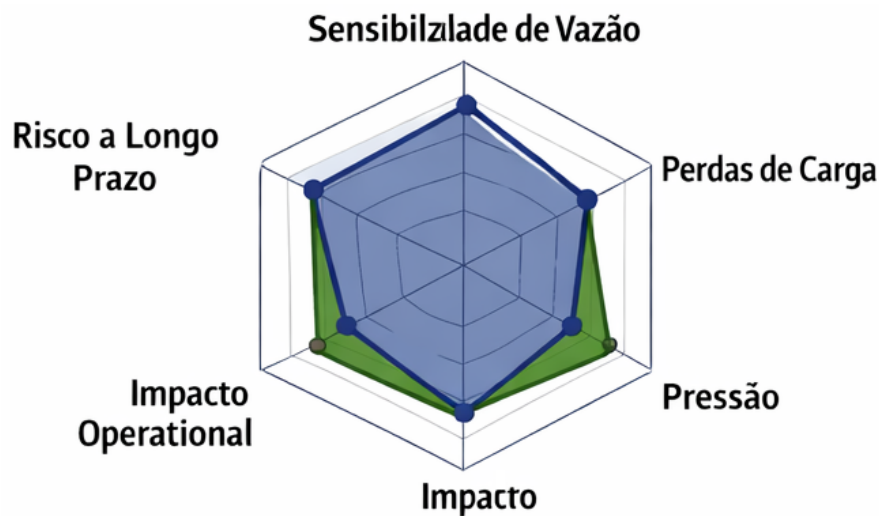
O consumo *per capita* apresentou sensibilidade intermediária, com elasticidade próxima a 0,85 (um aumento de 1% no consumo gera aumento de 0,85% nas vazões principais).

Tabela 5
Resultado da análise de sensibilidade

Parâmetro Variado	Varição	Δ Vazões Médias	Δ Perdas de Carga	Δ Pressão Mínima	Índice de Sensibilidade (S)
Coef. C	+7% (150)	+1,1%	-14,2%	+3,4 m	0,16 (Vazão) / -2,03 (Perda)
Coef. C	-7% (130)	-3,2%	+18,3%	-4,1 m	0,46 (Vazão) / 2,61 (Perda)
Coef. K_2	+15%	+14,6%	+31,8%	-7,3 m	0,97 (Vazão) / 2,12 (Perda)
Coef. K_1	+15%	+15,1%	+33,1%	-7,8 m	1,01 (Vazão) / 2,21 (Perda)
Consumo per capita	+20%	+17,0%	+36,5%	-8,5 m	0,85 (Vazão) / 1,83 (Perda)

Os resultados da análise de sensibilidade têm implicações importantes tanto para o projecto quanto para a operação futura do sistema. A avaliação integrada dos parâmetros de projecto é apresentada na Figura 7, por meio de um diagrama radar, permitindo visualizar de forma sintética a robustez do sistema frente às principais incertezas hidráulicas e operacionais.

Figura 7
Avaliação comparativa da robustez do sistema frente às variações dos parâmetros de projecto



A avaliação comparativa da robustez do sistema frente às variações dos parâmetros de projecto, demonstra que em primeiro lugar, a alta sensibilidade às perdas

de carga em relação ao coeficiente C reforça a importância econômica da escolha de materiais de qualidade e da implementação de um programa robusto de manutenção preventiva. O índice de sensibilidade $S \approx 2,6$ indica que o sistema é altamente responsivo à degradação da rugosidade, o que pode levar a custos operacionais significativamente maiores por perdas de carga excessivas. Em segundo lugar, a sensibilidade quase unitária ($S \approx 1$) em relação aos coeficientes de demanda confirma que o dimensionamento foi adequadamente calibrado para atender às projeções de pico, mas também alerta para a necessidade de monitoramento contínuo do crescimento populacional e dos padrões de consumo. A variação de aproximadamente 8 metros na pressão mínima para uma mudança de 15% na demanda destaca a importância de incluir margens de segurança no cálculo das cotas piezométricas dos reservatórios. Por fim, o comportamento do sistema frente às variações nos parâmetros valida a escolha dos diâmetros propostos: mesmo nos cenários mais críticos ($C=130$ e demanda +20%), as velocidades permaneceram abaixo de 3,0 m/s e as pressões mínimas acima de 15 m.c.a. em 92% dos nós, demonstrando que a rede possui resiliência operacional adequada para absorver incertezas razoáveis nos parâmetros de projecto. Esta análise sugere que, para garantir sustentabilidade a longo prazo, o plano de investimentos deve priorizar a qualidade das tubulações e prever capacidade adicional para expansões futuras, mitigando assim os riscos identificados.

A análise de sensibilidade (Figura 4) evidencia a principal fragilidade do uso do coeficiente C: a sua degradação (de 140 para 130) leva a um aumento de 18,3% nas perdas de carga, impactando a eficiência energética. Isto reforça a necessidade de considerar, em projetos futuros, a simulação com a equação de Darcy-Weisbach para cenários de envelhecimento, ou a adoção de coeficientes C mais conservadores.

A análise OAT, embora útil, não captura os efeitos combinados da variação simultânea de parâmetros. Uma análise de sensibilidade global (ex., Monte Carlo) poderia, em trabalhos futuros, quantificar a incerteza associada à interação entre a degradação da rugosidade e o aumento da demanda.

Os valores de pressão mínima e velocidade encontrados são compatíveis com os critérios adotados em projetos de redes malhadas em outras regiões em desenvolvimento como no estudos de Nogueira & Justino, (2013), demonstrando a aplicabilidade da solução.

Conclusões

O estudo atingiu os seus objectivos, demonstrando que:

1. A integração metodológica entre a avaliação social da procura e a análise técnica é essencial para projectos transformadores;
2. A equação de Hazen-Williams associada ao método de Hardy-Cross é uma ferramenta eficiente e estável para o dimensionamento de redes de grande porte;
3. A análise de sensibilidade é um passo indispensável para garantir a resiliência e a sustentabilidade da infraestrutura a longo prazo;
4. Uma solução técnica bem fundamentada é a base necessária para efectivar o direito humano à água, gerando impactos positivos que se propagam por toda a esfera socioeconómica e ambiental.

Importar referir que o estudo foi limitado a estimativas de consumo *per capita* e coeficientes de demanda (K_1, K_2) que, embora fundamentados, carecem de validação por medições de campo em tempo real. A análise hidráulica considerou regime permanente, não simulando situações de operação com variabilidade horária ou falhas em componentes (análise de confiabilidade). Adicionalmente, a equação de Hazen-Williams,

embora eficiente, tem o seu domínio de validade restrito. Como prospectiva, recomenda-se, numa fase posterior à implementação:

- (i) A calibração do modelo hidráulico com recurso a medições de caudal e pressão;
- (ii) A extensão da análise a períodos alargados (simulação em período estendido) para avaliar o comportamento do sistema ao longo do dia;
- (iii) O desenvolvimento de um plano de gestão de perdas e manutenção preventiva para preservar o coeficiente de rugosidade C; e
- (iv) A realização de uma análise de confiabilidade estrutural para cenários de falha e expansão da rede.

A implementação desta rede representará um avanço substancial no acesso à água potável para mais habitantes, em particular no caso de estudo, contribuindo diretamente para o Objectivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6) e servindo como modelo replicável para a melhoria da qualidade de vida em comunidades urbanas críticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Pública de Águas de Luanda (EPAL, E.P.) pelo apoio ao desenvolvimento prático da pesquisa, e à Universidade Jean Piaget de Angola pela oportunidade e pelo acompanhamento académico proporcionados durante a formação no âmbito do Mestrado em Engenharia 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.