

# Calibração do coeficiente de rugosidade C em redes de distribuição de água utilizando método iterativo com vazões

## *C roughness coefficient's calibration using flows iterative method on water distribution networks*


- **Data de entrada:**  
17/05/2022
- **Data de aprovação:**  
15/05/2023


Nathalia Francisca de Sousa Farias<sup>1\*</sup> | Alessandro de Araújo Bezerra<sup>1</sup> | Renata Shirley de Andrade Araújo<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.024>

### ORCID ID

Farias NFS  <https://orcid.org/0000-0003-3667-4026>

Bezerra AA  <https://orcid.org/0000-0002-9243-0731>

Araújo RSA  <https://orcid.org/0000-0002-5356-2723>

### Resumo

O uso de equações empíricas em redes de distribuição de água gera discrepâncias entre o projeto e a obra. Logo, a calibração dos parâmetros é importante e contribui para melhor manutenção e expansão da rede. Neste trabalho, por meio de um procedimento iterativo, foi desenvolvido um método para calibração do coeficiente de rugosidade C de Hazen-Williams, utilizando o Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool (Epanet) como ferramenta para simulação hidráulica, por meio de uma equação que relaciona as vazões da rede calibrada e da rede na qual as pressões mensuradas em campo dos com três valores iniciais de coeficiente C, além de demonstrarem como a escolha dos nós em que serão mensurados os dados impacta a calibração. Os resultados foram satisfatórios, alcançando pressões e coeficientes C próximos ao real na maior parte dos cenários. A calibração é mais eficaz ao se utilizarem número e distribuição de pressões mensuradas adequados.

**Palavras-chave:** Calibração. Coeficiente de rugosidade C. Hazen-Williams. EPANET. Rede de distribuição de água. Método iterativo.

### Abstract

*The use of empirical equations on water distribution network results in differences between project and completed work. Therefore, parameters calibration is crucial and contributes to better maintenance and expansion of network. In this work, with an interactive procedure, a method to calibrate Hazen-Williams' roughness coefficient C was developed, using the Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool (EPANET) software as a tool for hydraulic simulation and coefficient calculation, with an equation that relates flows from a calibrated network and a network where pressures measured in the field were fixed. Results from this calibration are presented using three initial values of coefficient C, also showing how the position of the nodes at which pressure was measured can affect the calibration. Results were satisfactory, reaching values of pressure and coefficient C close to real ones in most scenarios. Calibration is more effective when using appropriated numbers of measured pressures and distribution.*

**Keywords:** Calibration; Roughness coefficient C; Hazen-Williams; EPANET; Water Distribution Network; Iterative Method

<sup>1</sup> Universidade Federal do Piauí – Teresina – Piauí – Brasil.

\* **Autora correspondente:** [nathaliafarias@ufpi.edu.br](mailto:nathaliafarias@ufpi.edu.br); [nathaliafsf16@gmail.com](mailto:nathaliafsf16@gmail.com)

## 1 INTRODUÇÃO

Projetar redes de distribuição de água exige estimar diversos parâmetros que não podem ser mensurados com precisão, como os consumos nodais e as rugosidades das tubulações (Dini; Tabesh, 2014), resultando no uso de aproximações. Essas aproximações fazem com que, após sua execução, um cenário distinto do projetado seja encontrado.

Liou (1998) demonstrou que o coeficiente de rugosidade  $C$  da equação de Hazen-Williams, apesar de utilizado como uma constante que depende apenas do material, tem significativa variação em função do número de Reynolds, rugosidade relativa e diâmetros das tubulações. Christensen, Locher e Swamee (2000), em uma discussão do trabalho supracitado, indicaram que o diâmetro mínimo em que a utilização de Hazen-Williams é adequada varia de forma diretamente proporcional à rugosidade absoluta ( $\epsilon$ ) e, utilizando o valor de 0,06 mm (Tigres, 2015) para as tubulações de PVC, tem-se um diâmetro mínimo de aproximadamente 87 mm, o que exclui três diâmetros comerciais frequentemente adotados em projetos de redes de distribuição de água.

Ormsbee e Walski (2016) destacam que, apesar de ser comumente considerado que Hazen-Williams é aplicável em todos os escoamentos turbulentos, a equação original é na verdade aplicável para uma faixa dos turbulentos lisos. Isso pode se tornar um problema para sua utilização em projetos de redes de distribuição, dado que são projetos de vida útil relativamente longa e, com o passar do tempo, as tubulações envelhecem e se tornam cada vez mais rugosas. Além disso, incrustações nas tubulações, devido à presença de sais minerais, são problemas muito comuns que também aumentam significativamente as suas rugosidades, fato evidenciado no estudo de Yu *et al.* (2009), no qual a calibração baseada na equação de Chézy-Manning, mais adequada para tubulações mais rugosas, obteve melhores resultados. Jamil (2019) fez uma análise

entre a perda de carga por Hazen-Williams e Darcy-Weisbach, a última reconhecida como mais adequada (Christensen; Locher; Swamee, 2000; Nikola *et al.*, 2015), em tubos plásticos e metálicos de diâmetros menores. Apesar da semelhança na maioria dos resultados, observou-se uma diferença crescente em função do aumento da vazão na tubulação e da temperatura da água.

A despeito de todas essas evidências contra a utilização da equação de Hazen-Williams, esta continua sendo regularmente usada em projetos hidráulicos, apresentada em literatura e oferecida como opção nos softwares mais conhecidos. Essa insistência em escolhê-la ocorre, principalmente, devido à sua simplicidade de cálculo em relação às demais e ao fato de que há mais dados disponíveis sobre o coeficiente de rugosidade  $C$  das tubulações no mercado do que sobre as rugosidades absolutas (Travis; Mays, 2007), assim como a maior familiaridade dos engenheiros com o coeficiente de rugosidade  $C$  (Ormsbee; Walski, 2016). Reconhecendo ambos os lados da problemática, vários pesquisadores, como Torres *et al.* (2020) e Meirelles *et al.* (2017), dirigiram seus estudos a uma forma de calibrar o coeficiente de rugosidade  $C$ , a fim de minimizar as disparidades entre a rede projetada e a real e manter a utilização da fórmula popular.

A calibração de modelos numéricos de redes de distribuição de água consiste em aumentar a exatidão dos valores de parâmetros estimados durante o projeto, como rugosidades (Alvisi; Franchini, 2010; Bezerra; Castro; Araújo, 2017), consumos (Sanz; Pérez, 2015) ou coeficientes de decaimento de cloro (Xie; Zeng; Nachabe, 2013), utilizando dados que podem ser mensurados na rede real. O procedimento tem importante aplicação, especialmente na manutenção da rede e em possíveis ampliações. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma nova forma de calibração do coeficiente  $C$  da fórmula de Hazen-Williams, com ênfase nas vazões calculadas e observadas nos trechos

analisados, utilizando as simulações hidráulicas do software Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool (EPANET) (Rossman, 2000) como ferramenta, em diversos cenários.

## 2 METODOLOGIA

Foi desenvolvido um novo método de calibração, codificado na linguagem computacional Python utilizando a *dynamic-link library* do Epanet<sup>2</sup>, para a realização das simulações hidráulicas, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 1.

No método desenvolvido, em cada nó com pressão dinâmica conhecida, são adicionados reservatórios de nível fixo, interligados aos respectivos nós, para fixar a carga hidráulica. A rede com as cargas hidráulicas fixadas é chamada de rede observada e seus resultados hidráulicos são iterados com os resultados da rede calculada. A Equação 1, proposta neste trabalho, realiza o ajuste no coeficiente C de rugosidade de Hazen-Williams por meio da relação entre as vazões calculadas e observadas para cada trecho a cada iteração.

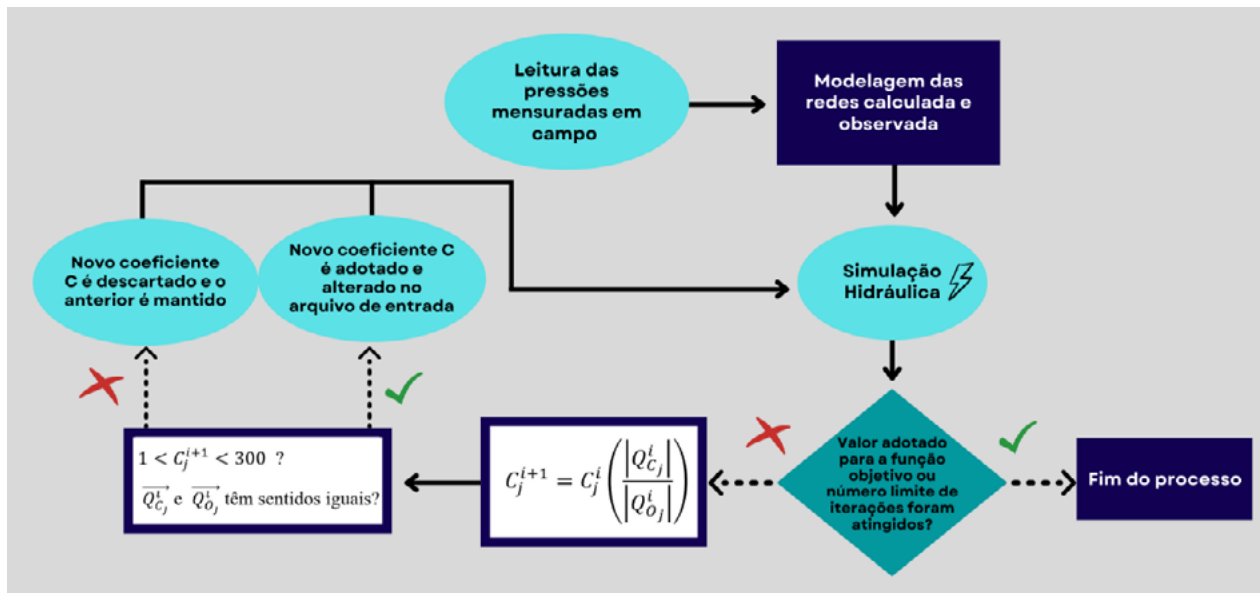


Figura 1 – Fluxograma geral do processo de calibração.

$$C_j^{i+1} = C_j^i \left( \frac{|Q_{c_j}^i|}{|Q_{o_j}^i|} \right) \quad (1)$$

Em que:

- $C_j^{i+1}$  = Novo valor de coeficiente de rugosidade calculado ( $m^{0,367} \cdot s^{-1}$ );
- $C_j^i$  = Coeficiente de rugosidade da iteração atual ( $m^{0,367} \cdot s^{-1}$ );

- $Q_{C_i}^i$  = Vazão na rede calculada ( $L \cdot s^{-1}$ );
- $Q_{O_j}^i$  = Vazão na rede observada ( $L \cdot s^{-1}$ );
- $i$  = Número da iteração;
- $j$  = Número do trecho.

Assim, um novo coeficiente de rugosidade (C) é encontrado para cada trecho ao fim de cada iteração. Caso um coeficiente de rugosidade

<sup>2</sup> Disponível em: <http://epanet.de/developer/64bit.html.en>. Acesso em: 19 jan. 2024.

esteja fora de um intervalo limite ( $1 < C < 300$ ) ou as vazões de um mesmo trecho nas redes calculadas e observadas tenham sentidos contrários, o valor da iteração anterior é mantido. Para a função-objetivo desse método, foi utilizada a Equação 2. Foi determinado como critério de parada o alcance da função-objetivo ao valor de 0,0001 ou o programa atingir um número limite de iterações.

$$f_{obj} = \sum_j (Q_{Cj} - Q_{Oj})^2 \quad (2)$$

Em que:

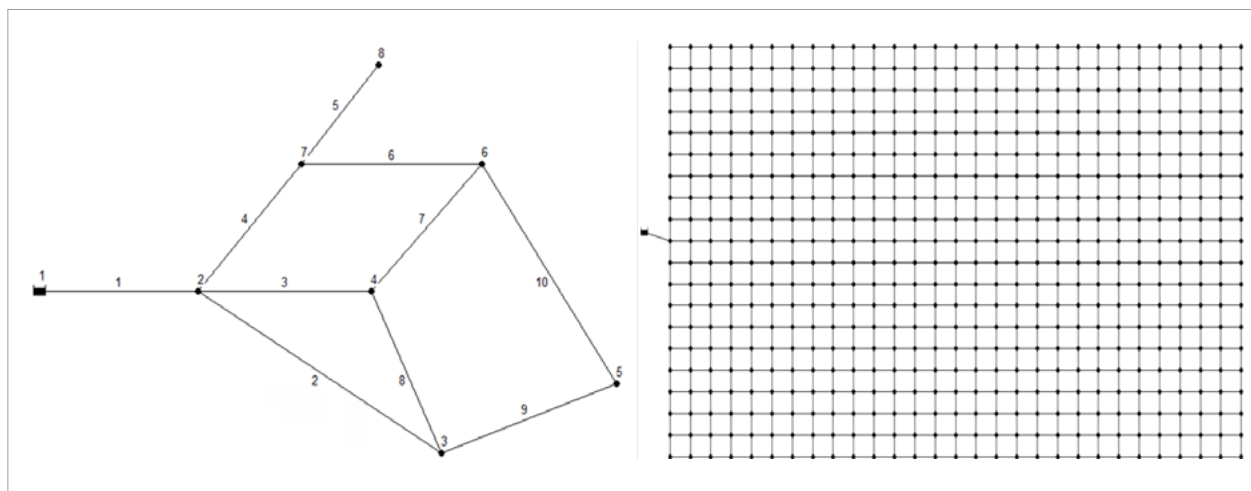
$$f_{obj} = \text{Função} - \text{objetivo}$$

Neste trabalho, foram calibradas duas redes: a primeira, apresentada por Walski (1983) e modificada por Gambale (2000), e a segunda, de maior porte, desenvolvida para este estudo. As pressões dinâmicas conhecidas foram distribuídas em cinco cenários: 100%, 80%, 60%, 40% e 20%. Os resultados de cada uma foram comparados com suas respectivas redes gabarito,

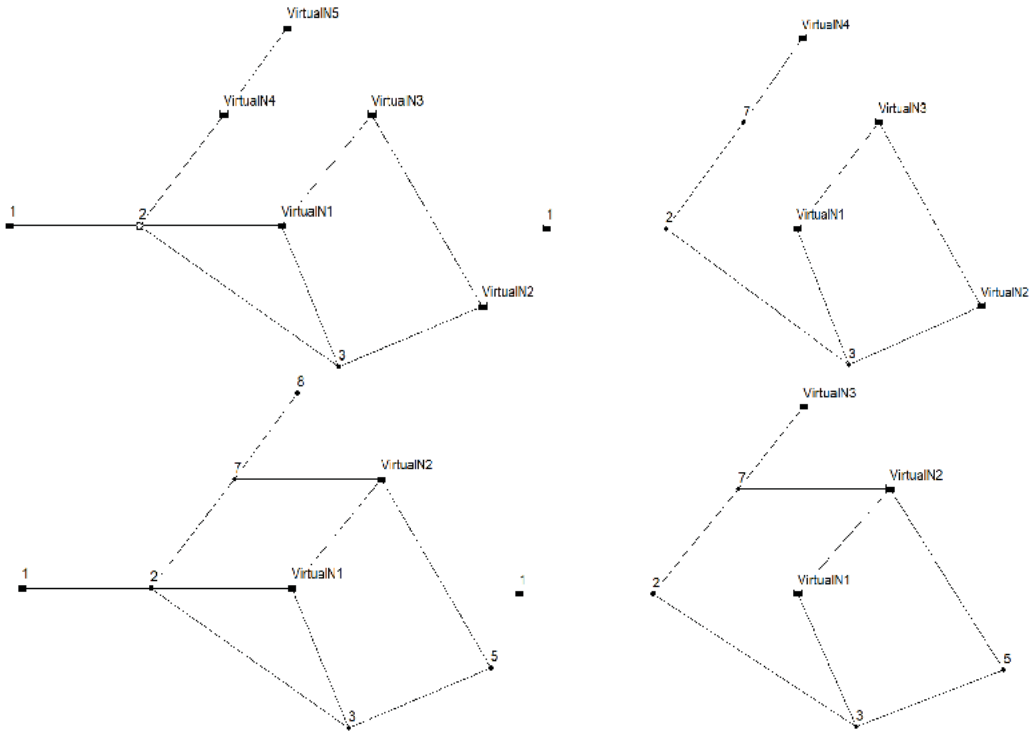
de onde foram retirados os valores de pressões dinâmicas. Ambas as redes foram calibradas utilizando três diferentes valores de coeficientes de rugosidade  $C$ :  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  e o valor médio dos coeficientes em suas respectivas redes gabarito.

A primeira rede é constituída por sete nós, dez trechos, um reservatório e 10.100 metros de comprimento. Já a segunda, é constituída por 580 nós, 1.112 trechos, um reservatório e 58.647 metros de comprimento. Ambas são apresentadas na Figura 2, enquanto a Figura 3 mostra a distribuição dos cenários com 80%, 60%, 40% e 20% das pressões conhecidas na rede Walski.

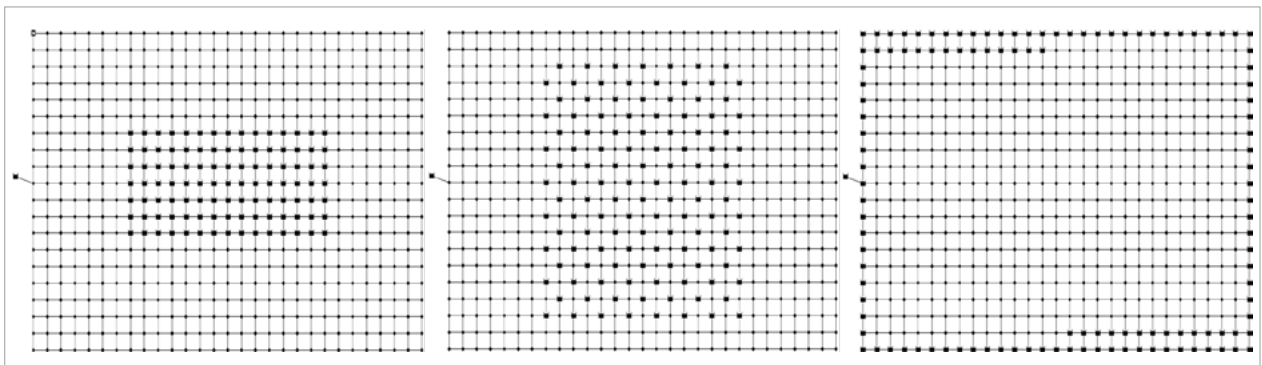
Para a rede de maior porte, foi feita uma discussão quanto ao modo de distribuição das pressões conhecidas. A rede foi calibrada com 20% das pressões conhecidas, distribuídas de forma centralizada e agrupada, centralizada e afastada, e periférica, como é mostrado, respectivamente, na Figura 4. Ao fim da análise, o modo que obter melhores resultados será utilizado para a distribuição das pressões nos cinco cenários supracitados.



**Figura 2** – Rede Walski (1983), modificada por Gambale (2000), à esquerda e rede de maior porte à direita.



**Figura 3** – Modos de distribuição nos cenários com 80%, 60%, 40% e 20% das pressões conhecidas na rede Walski.



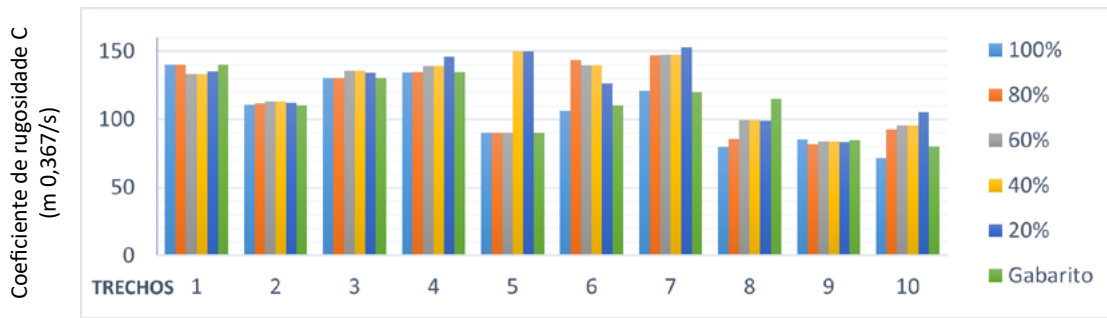
**Figura 4** – Modos de distribuição das pressões conhecidas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Rede Walski (1983) modificada por Gambale (2000)

Para a apresentação dos resultados, foi elaborado um gráfico (Figura 5), que apresenta os coeficientes

de rugosidade (C) da rede calculada e da rede gabarito, em cada trecho, nos cinco cenários diferentes: de 20% das pressões dinâmicas conhecidas até 100% das pressões dinâmicas conhecidas. Nessa primeira análise, o valor inicial utilizado para o coeficiente de rugosidade C foi de  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

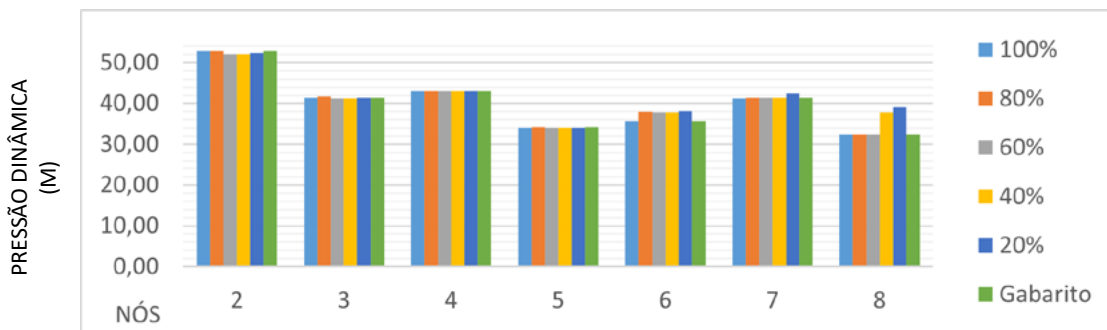


**Figura 5** – Coeficientes de rugosidade da rede gabarito, calculados em cinco cenários diferentes de pressões conhecidas com C inicial de  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

A calibração com 100% das pressões dinâmicas conhecidas não apresenta diferenças significativas, exceto no trecho oito.

À medida que o número de pressões conhecidas na rede diminui, outros trechos, exceto os mais próximos do reservatório, passam a apresentar diferenças um pouco mais significativas. Nos cenários de 20 e 40% das pressões conhecidas, o trecho cinco apresenta um aumento notável da diferença entre

o coeficiente calculado e o gabarito. Esse aumento aconteceu nos cenários em que nem a pressão do nó sete nem a do nó oito eram conhecidas – por ser um trecho com menor conexão com o resto da rede, a ausência de dados sobre os dois nós prejudicou os resultados de sua calibração. Na Figura 6, é apresentado um gráfico com as pressões dinâmicas da rede calculada e da rede gabarito em cada nó nos cinco cenários diferentes.



**Figura 6** – Pressões dinâmicas da rede gabarito, calculadas em cinco cenários diferentes de pressões conhecidas com C inicial de  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Em relação às pressões dinâmicas, as diferenças são pouco significativas, variando entre 1 e 6%, exceto no nó oito, que apresenta o erro máximo entre as pressões na rede de 20% no cenário com menos pressões conhecidas. Tal configuração é semelhante à apresentada nos resultados dos

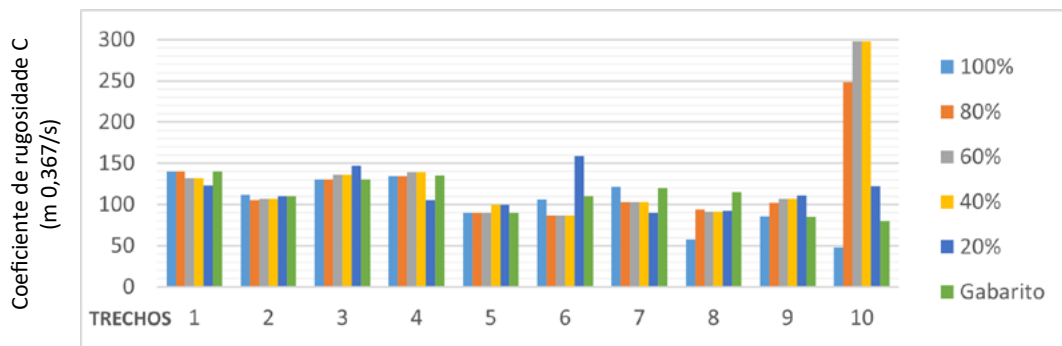
coeficientes, indicando que as demais variações foram consequência da diminuição do número de pressões conhecidas ao longo dos cenários.

A rede também foi calibrada adotando  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  como os valores iniciais do coeficiente de rugosidade C. Os coeficientes encontrados em

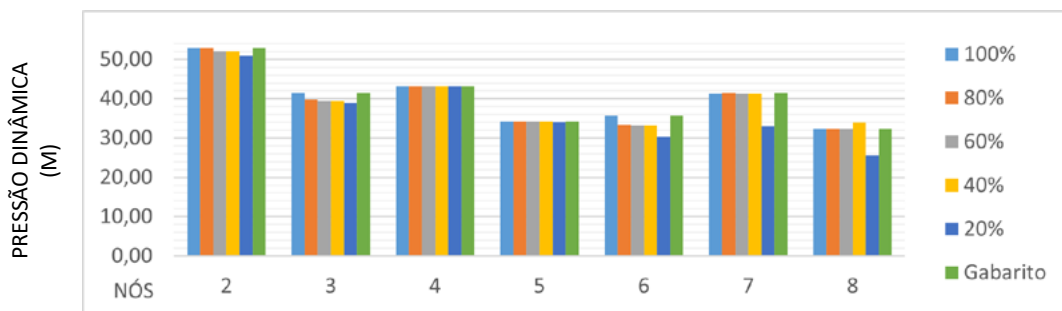
cada cenário e a comparação com a rede gabarito são mostrados na Figura 7.

Na calibração utilizando  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  como valor inicial para o coeficiente C de rugosidade, nota-se erros muito altos no trecho dez, nos cenários de 80%, 60% e 40% das pressões conhecidas. Nesses cenários, juntamente com o de 20%, a pressão no nó seis não era conhecida e o valor encon-

trado pelo método foi menor do que o valor de pressão desse nó na rede gabarito. Assim, a carga hidráulica do nó cinco se sobressaiu e o sentido do escoamento do trecho foi invertido. O sentido da vazão do trecho na rede calculada e observada coincidem, porém não é igual ao da rede gabarito. As pressões dinâmicas de cada nó nos cenários e na rede gabarito são mostradas na Figura 8.



**Figura 7** – Coeficientes de rugosidade da rede gabarito, calculados em cinco cenários diferentes de pressões conhecidas com C inicial de  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Figura 8** – Pressões dinâmicas da rede gabarito, calculadas em cinco cenários diferentes de pressões conhecidas com C inicial de  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Utilizando  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  como valor inicial para o coeficiente C de rugosidade, nota-se que há uma dificuldade maior em alcançar as pressões da rede gabarito. Além de apresentar uma maior quantidade de erros do que a calibração anterior, as pressões encontradas são mais baixas que as da rede gabarito,

ao contrário da calibração iniciada com  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , que apresenta variações positivas em relação às pressões da rede gabarito. Nos quatro primeiros cenários, os erros relativos variam de 0 a 7%. No entanto, no cenário de 20% das pressões conhecidas, essas porcentagens aumentam e atingem 21% no nó oito.



Por fim, para essa rede, utilizou-se o valor inicial de  $112 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  para as rugosidades dos trechos, tratando-se da média dos coeficientes da rede

gabarito. Os coeficientes de rugosidade C encontrados em cada cenário e a comparação com a rede gabarito são mostrados na Figura 9.

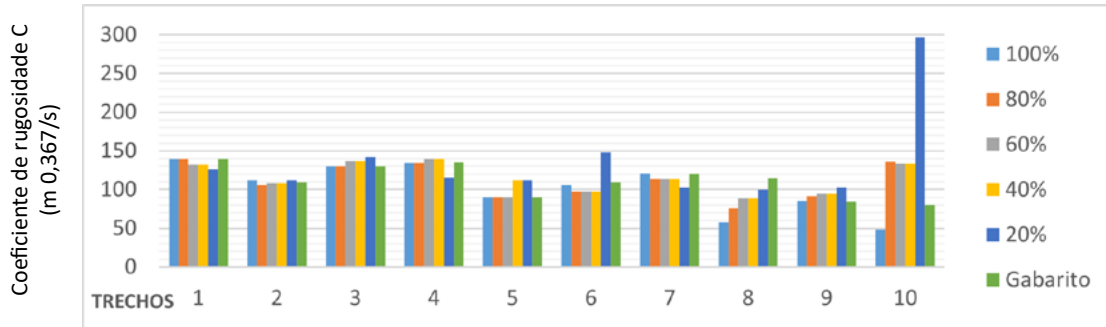


Figura 9 – Coeficientes de rugosidade da rede gabarito, calculados em cinco cenários diferentes de pressões conhecidas com C inicial de  $112 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

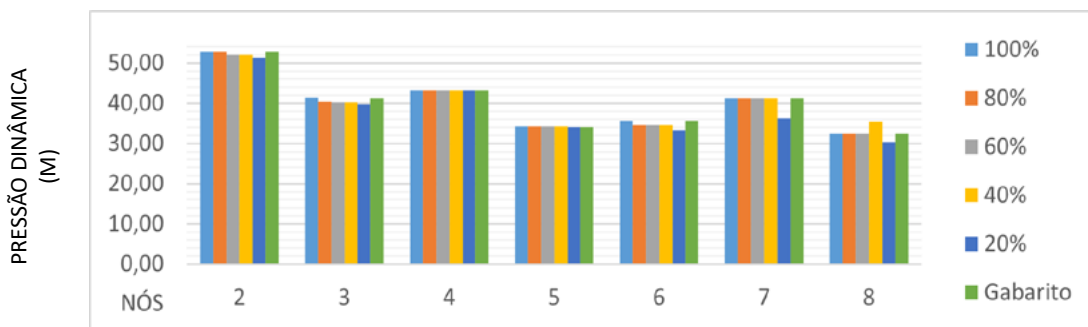


Figura 10 – Pressões dinâmicas da rede gabarito e calculada em cinco cenários diferentes de pressões conhecidas com C inicial de  $112 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Na calibração utilizando coeficiente de rugosidade C inicial de  $112 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , nota-se a mesma inversão de sentido do escoamento no trecho 10. Porém, nessa calibração, a inversão só aconteceu no cenário com 20% das pressões conhecidas. O gráfico com as pressões de cada nó nos cenários e na rede gabarito é mostrado na Figura 10.

Apesar de apresentar uma menor dificuldade para alcançar as pressões dinâmicas da rede gabarito do que a calibração iniciada com coeficiente de rugosidade igual a  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , a calibração uti-

lizando o valor médio também apresenta pressões menores do que o gabarito, além de mais erros que a calibração utilizando  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  como valor inicial. Os erros relativos variam entre 0 e 3% nos cenários com 100%, 80%, 60% das pressões conhecidas, 0 e 9% no cenário de 40% das pressões conhecidas, e 0 a 12% no cenário de 20% das pressões conhecidas, com o erro máximo da rede ocorrendo no nó sete.

Na Tabela 1, podem ser vistos os erros médios de pressão e coeficiente C para cada cenário de pressões conhecidas e de C inicial.



**Tabela 1** – Média dos erros absolutos dos trechos em relação à pressão dinâmica e coeficiente C para todos os cenários e coeficientes C iniciais.

	100%		80%		60%		40%		20%	
	C	P (m)	C	P (m)	C	P (m)	C	P (m)	C	P (m)
150 m0,367. s-1	5,12	0,03	10,76	0,39	10,88	0,44	16,88	1,21	17,47	1,55
100 m0,367. s-1	9,77	0,04	25,26	0,56	32,55	0,76	33,55	0,97	24,44	3,56
112 m0,367. s-1	9,77	0,04	12,6	0,31	13,1	0,45	15,3	0,88	37,43	1,84

### 3.2 Análise da distribuição de pressões conhecidas da rede de maior porte

A Tabela 2 foi elaborada para os resultados dessa análise, com a média dos erros absolutos dos trechos em relação ao coeficiente C, à vazão e à pressão dinâmica para cada um dos nós nos modos de distribuição.

Por ser uma rede maior e mais complexa, os erros nela são mais significativos do que na rede anterior. Como é mostrado na Tabela 2, a forma centralizada

e espalhada teve resultados melhores, tanto em relação às pressões dinâmicas quanto ao coeficiente C. Essa forma também apresentou um maior percentual de trechos com erro absoluto abaixo ou igual a  $10 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  em relação ao coeficiente C – com 22,48% da rede –, contra 20,14% da forma centralizada e agrupada e 22,12% da forma periférica. Erros absolutos entre 10 e 30 foram observados nas seguintes porcentagens: 39,03% na forma centralizada e espalhada, 34,44% na forma centralizada e agrupada e 35,52% na forma periférica.

**Tabela 2** – Média dos erros absolutos dos trechos para cada modo de distribuição.

	Erro absoluto médio		
	Pressão dinâmica (m)	Coeficiente C (m0,367. s-1)	Vazão (L.s-1)
Centralizado e agrupado	0,82	35,45	0,33
Centralizado e espalhado	0,42	29,96	0,34
Periférico	0,58	32,13	0,34

Quanto à pressão dinâmica, 42,07% da rede em que foi aplicada a forma centralizada e espalhada apresentou erro absoluto menor ou igual a 0,1 metro, contra 21,55% da forma centralizada e agrupada e 26,21% da forma periférica. Além disso, em relação aos erros absolutos entre 0,1 e 0,5 metro, foram observadas as seguintes porcentagens: 30,34% na forma centralizada e espalhada, 23,28% na forma centralizada e agrupada e 25,86% na forma periférica. Desse modo,

foi concluído que a forma centralizada e espalhada apresentou melhores resultados, sendo este o modo de distribuição das pressões utilizado para a calibração da rede.

### 3.3 Rede de maior porte

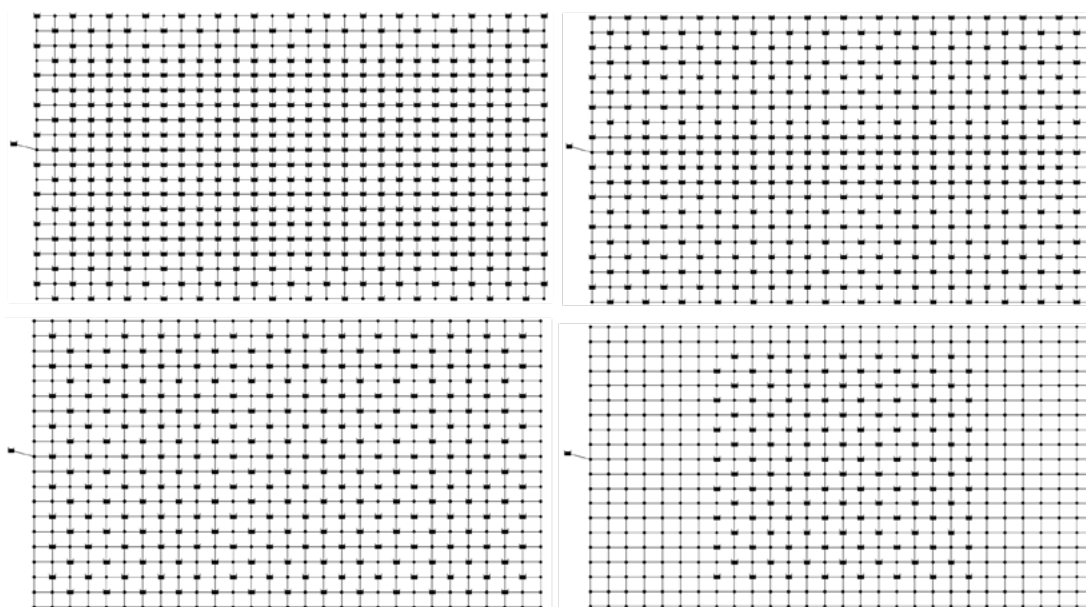
A Tabela 3 foi elaborada com a média dos erros absolutos dos trechos, em relação ao coeficiente C, à vazão e à pressão dinâmica para cada um dos nós nos cenários com 20% até 100% das pressões

conhecidas. Nessa primeira análise, o valor inicial utilizado para o coeficiente de rugosidade C foi de  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na Figura 11, são mostradas as

disposições dos cenários com 80%, 60%, 40% e 20% das pressões conhecidas, de acordo com a metodologia de distribuição escolhida.

**Tabela 3** – Média dos erros absolutos dos trechos com C inicial de  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

	Erro absoluto médio	
	Pressão dinâmica (m)	Coefficiente C ( $\text{m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ )
100% das pressões conhecidas	0,01	24,01
80% das pressões conhecidas	0,02	24,84
60% das pressões conhecidas	0,04	25,48
40% das pressões conhecidas	0,06	27,49
20% das pressões conhecidas	0,42	29,96



**Figura 11** – Modos de distribuição nos cenários com 80%, 60%, 40% e 20% das pressões conhecidas na rede de maior porte.

Apesar de suas dimensões, a calibração da rede de maior porte pelo método proposto obteve bons resultados, visto que mais da metade dos trechos apresentam erro absoluto menor que  $20 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  nos três primeiros cenários (100, 80 e 60% das pressões conhecidas). As porcentagens encon-

tradas são, respectivamente, 63,30%, 61,24% e 52,79%. Nos últimos dois cenários de pressão, as porcentagens caem para um pouco menos da metade, chegando a 48,92% no cenário de 40% das pressões conhecidas e 43,08% no cenário de 20% das pressões conhecidas.

Os resultados também foram satisfatórios quanto à pressão dinâmica. No cenário com 100% das pressões conhecidas, como esperado, não houve diferenças significativas, com o erro absoluto máximo em toda a rede sendo de 0,02 metro. No cenário com 80% das pressões conhecidas, 97,59% dos nós apresentaram erro absoluto menor que 0,10 metro, seguido por 87,41% no cenário com 60% das pressões conhecidas e 79,46% no cenário com 40%. No cenário com 20% das pressões conhecidas, o erro médio

aumentou de forma significativa e o percentual de nós com erro absoluto abaixo de 0,10 metro caiu para 42,07%.

A rede também foi calibrada adotando os valores iniciais do coeficiente de rugosidade C como  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , sendo o último a média dos coeficientes da rede gabarito. A Tabela 4 mostra o resumo dos resultados utilizando  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  como coeficiente de rugosidade C inicial e a Tabela 5 mostra os erros médios para o valor de  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Tabela 4** – Média dos erros absolutos dos trechos com C inicial de  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

	Erro absoluto médio	
	Pressão dinâmica (m)	Coefficiente C ( $\text{m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ )
100% das pressões conhecidas	0,01	23,88
80% das pressões conhecidas	0,01	23,78
60% das pressões conhecidas	0,04	25,14
40% das pressões conhecidas	0,06	25,42
20% das pressões conhecidas	0,24	24,1

Os erros médios encontrados no caso de  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  foram menores que no caso anterior, com exceção das vazões, que mantiveram erros médios absolutos entre 0,32 e 0,34. Além de médias menores, a porcentagem de trechos da rede com erros menores que  $20 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  subiu, apresentando as porcentagens para os cenários de 100%, 80%, 60%, 40% e 20% respectivamente como: 62,50%, 59,80%, 53,51%, 50,09% e 47,12%.

Quanto à pressão dinâmica, novamente o cenário de 100% de pressões apresentou erros não significativos, com erro absoluto máximo de 0,02 metro. As porcentagens de nós com erro médio absoluto menor que 0,1 metro nos cenários de 80%, 60%, 40% e 20% foram, respectivamente, 97,07%, 87,76%, 77,93% e 44,48%, semelhantes às atingidas na configuração anterior.

A calibração com o coeficiente de rugosidade C inicial de  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  alcançou erros médios menores do que a com  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  e semelhantes às com  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ . As porcentagens dos trechos com erro médio absoluto inferior a  $20 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  foram 61,33% no cenário com 100% das pressões conhecidas, 60,16% no cenário com 80%, 53,87% no cenário com 60%, 50,45% no cenário com 40% e 48,02% no cenário com 20%. As últimas duas calibrações (coeficiente de rugosidade C inicial de 100 e  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ ) apresentaram resultados semelhantes. No entanto, a calibração utilizando a média dos coeficientes da rede gabarito como coeficiente inicial conseguiu atingir tanto um erro absoluto menor no cenário com o menor número de pressões conhecidas como também conseguiu um maior número de trechos com erro absoluto menor do que  $20 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  nesse mesmo cenário.

**Tabela 5** – Média dos erros absolutos dos trechos com C inicial de  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

	Erro absoluto médio	
	Pressão dinâmica (m)	Coefficiente C ( $\text{m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ )
100% das pressões conhecidas	0	24,02
80% das pressões conhecidas	0,01	24,04
60% das pressões conhecidas	0,04	24,73
40% das pressões conhecidas	0,06	25,12
20% das pressões conhecidas	0,22	23,64

Em relação à pressão dinâmica, o cenário de 100% apresentou erro absoluto máximo de 0,01 metro. Já os cenários de 80%, 60%, 40% e 20% das pressões conhecidas apresentaram, respectivamente, 97,07%, 87,59%, 78,10% e 43,62% dos nós com erro absoluto menor que 0,1 metro.

No que tange às vazões, o comportamento observado em todas as calibrações e cenários foi semelhante: Pouca variância entre as porcentagens de cada cenário, mantendo o valor entre 47 e 50% dos trechos com erro absoluto menor que  $0,15 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 4 CONCLUSÃO

A utilização da equação proposta para calibração de redes apresentou aderência nos valores encontrados no modelo e seus parâmetros conhecidos, conseguindo alcançar pressões sem discrepâncias significativas, com erro médio relativo de todos os nós em todos os cenários igual a 2,06%, na rede Walski e nos coeficientes de rugosidade C, com diferença média percentual entre os valores encontrados pelo modelo e o gabarito igual a 11,71% utilizando  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  como valor inicial para o coeficiente de rugosidade. Já nas calibrações utilizando 100 e  $112 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , houve dificuldades em atingir as pressões da rede gabarito, visto que o uso de rugosidade menores resultava em uma maior perda de carga. Devido a essa dificuldade, ocorreu uma inversão do sentido do escoamento do trecho dez em quatro dos cinco cenários na calibração iniciada com  $100 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$

e em um dos cinco cenários na calibração iniciada com  $112 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Na rede de maior porte, notou-se um erro médio entre as pressões variando de 0,03% a 0,16% em três dos cinco cenários. Além disso, essa rede conseguiu com que mais da metade dos trechos apresentassem erro absoluto menor que  $20 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  em relação ao coeficiente de rugosidade C em três dos cinco cenários na calibração iniciada com  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ . Nas calibrações utilizando 100 e  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , os resultados foram semelhantes, melhores tanto em pressão quanto em coeficiente de rugosidade C. Quanto aos erros em relação à vazão, foi possível concluir que, contanto que não aconteça inversões no escoamento, estes são indiferentes ao coeficiente de rugosidade inicial e ao número de pressões conhecidas na rede.

Apesar dos resultados melhores na rede de maior porte com as calibrações iniciadas com coeficiente de rugosidade de 100 e  $108 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ , visto que a diferença entre estas e a iniciada com  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$  é pequena e que coeficientes de rugosidades menores são mais suscetíveis a apresentar problemas nas pressões dinâmicas, os autores consideram mais adequada a utilização do valor inicial de  $150 \text{ m}^{0,367} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Além disso, foi demonstrado que um nó com pressão fixada tem influência nos nós ao seu redor, aumentando as chances de alcançarem pressões

próximas às reais. É recomendada a mensuração de pressões nos nós centrais e não tão próximos entre si, pois foi possível reduzir o erro médio em até 95,23% na pressão e em até 18,32% na calibração do coeficiente de rugosidade C, mesmo no pior cenário de pressões conhecidas.

## 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Conceitualização:** Farias NFS; **Metodologia:** Farias NFS, Bezerra AA, Araújo RSA; **Investigação:** Farias NFS; **Redação – Primeira versão:** Farias NFS; **Redação – Revisão & Edição:** Bezerra AA, Araújo RSA; **Supervisão:** Bezerra AA, Araújo RSA.

## 6 AGRADECIMENTOS

Agradecimento aos apoiadores do projeto: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI).

## 7 REFERÊNCIAS

ALVISI, S.; FRANCHINI, M. Pipe roughness calibration in water distribution systems using grey numbers. **Journal of Hydroinformatics**, Londres, v. 12, n. 4, p. 424-445, 2010. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.089>

BEZERRA, A. de A.; CASTRO, M. A. H. de; ARAÚJO, R. S. de A. Absolute roughness calculation by the friction factor calibration using the alternative hydraulic gradient iterative method on water distribution networks. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, p. e24, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160018>.

CHRISTENSEN, B. A.; LOCHER, F. A.; SWAMEE, P. K. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation – Discussion. **Journal of Hydraulic Engineering**, Nova York, v. 126, n. 2, p. 167-170, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:2\(167\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:2(167))

DINI, M.; TABESH, M. A new method for simultaneous calibration of demand pattern and Hazen-Williams coefficients in water distribution systems. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 28, p. 2021-2034, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0592-4>

GAMBALE, S. R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de rede de água**. 2000. Dissertação (Mestrado em

Recursos Hídricos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JAMIL, R. Frictional head loss relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for various water supply pipe materials. **International Journal of Water**, Olney, v. 13, n. 4, p. 333-347, 2019. <https://doi.org/10.1504/IJW.2019.10027784>

LIOU, C. P. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, Nova York, v. 124, n. 9, p. 951-954, 1988. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:9\(951\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:9(951))

MEIRELLES, G. *et al.* Calibration model for water distribution network using pressures estimated by artificial neural networks. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 31, p. 4339-4351, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1750-2>

NIKOLA, J. *et al.* A novel method for the inclusion of pipe roughness in the Hazen-Williams equation. **FME Transactions**, Belgrado, v. 43, n. 1, p. 35-39, 2015. <https://doi.org/10.5937/fmet1501035J>

ORMSBEE, L.; WALSKI, T. Darcy-Weisbach versus Hazen-Williams: no calm in West Palm. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2016, 2016, West Palm Beach. **Anais [...]**. Reston: American Society of Civil Engineers, 2016. p. 455-464. <https://doi.org/10.1061/9780784479865.048>

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 User's manual**. Washington, D.C.: United States Environmental Protection Agency, 2000.

SANZ, G.; PÉREZ, R. Sensitivity analysis for sampling design and demand calibration in water distribution networks using the singular value decomposition. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 141, n. 10, e04015020, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000535)

TIGRES. **Linha infraestrutura**: catálogo técnico e produtos. Joinville: Tigres, 2015.

TORRES, L. *et al.* A state observer for the calibration of the Hazen-Williams equation. In: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE) CONFERENCE ON CONTROL TECHNOLOGY AND APPLICATIONS, 4., 2020, Montreal. **Anais [...]**. Piscataway: IEEE, 2020. p. 917-921. <https://doi.org/10.1109/CCTA41146.2020.9206329>

TRAVIS, Q. B.; MAYS, L. W. Relationship between Hazen-Williams and Colebrook-White roughness values. **Journal of Hydraulic Engineering**, Nova York, v. 133, n. 11, p. 1270-1273, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:11\(1270\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:11(1270))

WALSKI, T. M. Technique for calibrating network models. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1983\)109:4\(360\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1983)109:4(360))

XIE, X.; ZENG, B.; NACHABE, M. Sampling design for water distribution network chlorine decay calibration. **Urban Water Journal**, Londres, v. 12, n. 3, p. 190-199, 2015. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.831911>

YU, Z. *et al.* Calibration of pipe roughness coefficient based on manning formula and genetic algorithm. **Transactions of Tianjin University**, Tianjin, v. 15, p. 452-456, 2009. <https://doi.org/10.1007/s12209-009-0078-2>