

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### **AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MODELO EPANET**

*Maria Gabriele de Freitas Xavier Sobral<sup>1</sup> ; Mariele de Souza Parra Agostinho<sup>2</sup> & Cristovão  
Vicente Scapulatempo Fernandes<sup>3</sup>*

**Abstract:** The work addresses a case study of a water distribution network in which the aging of the pipes is simulated and monitored through the variation of the Hazen-Williams coefficient, related to roughness, and the pipe diameter, concerning incrustations caused by material accumulation on the conduit walls, both being essential characteristics for determining head losses, a crucial variable for this research. With the help of EPANET software, the network is modeled and future scenarios are created, where extended simulations and data generation on different pressures, flow rates and velocities, occur it is worth noting that demand remains the same regardless of the scenario, this enables analyzing the network's behavior considering the proposed time periods of 10 and 20 years. The network used is theoretical, looped and small in scale, this provides a better understanding of its operation and a potential application in more complex networks. Finally, an evaluation is performed through the calculation of indicators related to important properties in water supply networks, such as pressures and flow rates.

**Resumo:** O trabalho aborda um estudo de caso de uma rede de distribuição de água no qual é simulado e acompanhado o envelhecimento das tubulações através da variação do coeficiente de Hazen-Williams, referente a rugosidade, e do diâmetro do tubo, relativo às incrustações causadas pelo acúmulo de material nas paredes dos condutos, ambas são características essenciais para obtenção das perdas de carga, variável imprescindível para essa pesquisa. Com o auxílio do software EPANET, a rede é modelada e são criados cenários futuros, onde ocorrem simulações estendidas e gerações de dados sobre as diferentes pressões, vazões e velocidades, vale lembrar que o consumo permanece sendo o mesmo independentemente do cenário, isso possibilita analisar o comportamento da rede levando em consideração o passar do tempo proposto de 10 e 20 anos. A rede utilizada é teórica, malhada e de porte pequeno, isso proporciona uma melhor compreensão do funcionamento da mesma e uma possível aplicação em redes mais complexas. Por fim, uma classificação é realizada através do cálculo de indicadores que se relacionam com propriedades importantes presentes em redes de abastecimento de água, como pressões e vazões.

**Palavras-Chave** – Rede de abastecimento. Coeficiente de rugosidade. Pressão. Vazão. Cenário. Envelhecimento. Indicadores. Simulação. EPANET.

<sup>1</sup>) Universidade Federal do Paraná: maria.gabriele23@hotmail.com

<sup>2</sup>) Sanepar: marielespa@sanepar.com.br

<sup>3</sup>) Universidade Federal do Paraná: cris.dhs@ufpr.br

## INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de água, infraestrutura de Sistemas de Abastecimento de Água, são muito importantes para toda a sociedade, em função do fornecimento de água potável, desenvolvimento econômico, social e de cidadania no contexto de saúde pública. Um dos problemas mais relevantes, quer do ponto de vista hidráulico quer da reabilitação de redes, está associado ao entendimento do envelhecimento de tubulações (Orellana, 2011). Em geral, estas alterações são caracterizadas em função de determinados atributos que fazem parte desse tipo de sistema, como o coeficiente de rugosidade e o diâmetro útil da tubulação (Gomes e Alves, 2024).

Todas essas mudanças nas características de projeto que ocorrem com o tempo ocasionam em consequências prejudiciais para o sistema como um todo. A questão estrutural relevante é identificar trechos da rede que requerem medidas de intervenção corretivas para sua reabilitação, particularmente, nos trechos mais antigos. Tem-se, portanto, uma nova condição de impacto financeiro e de eficiência energética, o que demanda uma análise mais detalhada para sua eficácia. Contudo, inicialmente é necessária uma análise do comportamento da rede para auxiliar em tomadas de decisões (Bezerra, 2005).

Este estudo se justifica a partir da combinação de diferentes materiais e métodos como é o caso da aplicação da análise de sensibilidade para a variação do coeficiente de Hazen-Williams e apresentada em Gomes (2009), bem como, os indicadores de avaliação geral do comportamento de rede para identificação de vulnerabilidade hidráulica, econômica e de qualidade da água propostas por Marlim *et al.* (2019). Os indicadores propostos determinam um grau de prioridade nos componentes, assim, caracterizar qual elemento necessita de manutenção, no entanto sem considerar efeitos de simulação estendida. Os autores também usaram o modelo EPANET para a simulação hidráulica da rede estudada.

Este artigo apresenta uma adaptação de uma rede de distribuição hipotética por meio de uma estratégia metodológica com o objetivo de identificar os pontos críticos do sistema considerando simulação estendida de 24h e variação diária da curva de consumo. As etapas abrangem tópicos como modelagem da rede usando o modelo EPANET (Rossman, 2009), com a proposição de cenários, simulações e cálculos de indicadores.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Rede e Simulação Hidráulica

A rede escolhida como estudo de caso desta pesquisa é a apresentada no Manual do EPANET 2.0 (Rossmann, 2009) (Figura 1). Esta rede é simples e do ponto de vista conceitual interessante para o objetivo de analisar o grau de sensibilidade para os efeitos de envelhecimento de tubulação.

A implementação considerou a definição dos componentes físicos (nós, trechos, reservatórios e bomba), Tabela 1, e os componentes não físicos (curva da bomba e padrão temporal de consumo), Figura 2. O consumo é o mesmo para todos os cenários, os fatores que impactam nessa variável é o próprio consumo do nó (L/s) e o padrão temporal, que será diferente dependendo do horário do dia, havendo hora pico e baixa demanda. A Figura 2 expõe as diferentes demandas nos nós de acordo com o horário. Neste estudo foi utilizada simulação hidráulica estendida.

## Cenários

O objetivo é identificar o impacto do envelhecimento nas propriedades hidráulicas da rede hipotética, que será denominado de Cenário Novo (CN). Duas referências de envelhecimento de tubos escolhidas são denominadas de Cenário 1 (C1), para variação do Coeficiente de Hazen Williams e Cenário 2 (C2), para uma combinação de variação de coeficiente de Hazen Williams e redução de Diâmetro. A referência usada é a proposta por Azevedo Netto e citada em Gomes (2009) para alteração do coeficiente. A mesma variação percentual foi aplicada para a redução de diâmetro. Esta hipótese foi adotada por não haver referências específicas sobre estas características. Dois cenários temporais foram utilizados, 10 e 20 anos de envelhecimento (Gomes, 2009). Assim, os resultados estão associados a cinco cenários. Os materiais usados durante o processo de modelagem foram ferro fundido para o trecho 2 e PVC para os demais trechos.

Figura 1 – Rede de Abastecimento de Água no EPANET

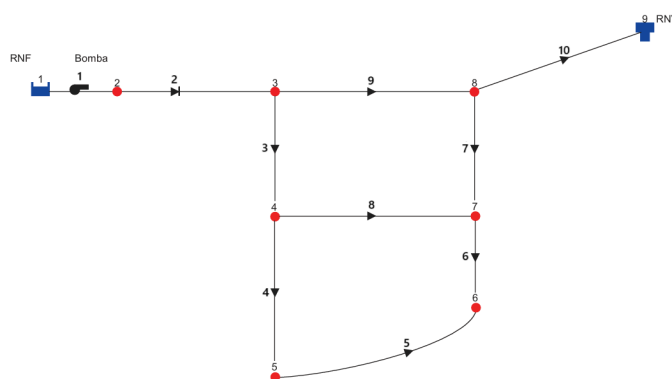
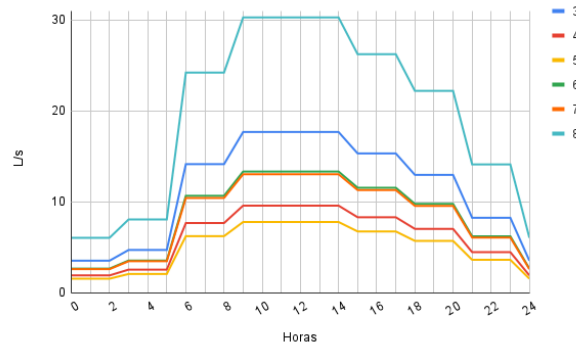


Tabela 1 – Síntese das propriedades aplicadas

Trecho	Material	Novo		10 anos		20 anos	
		C	D (mm)	C	D (mm)	C	D (mm)
2	FF	120	366,2	110	335,7	95	289,9
3	PVC	135	204,2	130	196,6	125	189,1
4	PVC	135	156,4	130	150,6	125	144,8
5	PVC	135	108,4	130	104,4	125	100,4
6	PVC	135	108,4	130	104,4	125	100,4
7	PVC	135	108,4	130	104,4	125	100,4
8	PVC	135	156,4	130	150,6	125	144,8
9	PVC	135	204,2	130	196,6	125	189,1
10	PVC	135	204,2	130	196,6	125	189,1

Obs: FF – Ferro fundido

Figura 2 – Variação horária de consumo



### Indicadores

Os indicadores utilizados foram propostos por Marlim *et al.* (2019) que identificam: (i) o SS (%) (Supply Shortage) (equação 1), que avalia o potencial de não atendimento da demanda; (ii) o EVL (%) (Economic Value Loss) (equação 2), avalia o prejuízo financeiro acarretado pela falha das tubulações; (iii) e PD (%) (Pressure Decline) (equação 4), que analisa a redução de pressão nos nós.

$$SS_i = \frac{\sum_{j=1}^N 1 - \frac{Q_{e,j}}{Q_{n,j}}}{N} \quad (1)$$

$$EVL_i = \frac{\sum_{j=1}^N Q_{e,j} \times Tr_i \times u_j}{\sum_{j=1}^N Q_{n,j} \times Tr_i \times u_j} \quad (2)$$

$$Tr_i = 6,5 \times D_i^{0,285} \quad (3)$$

$$PD_i = \frac{\sum_{j=1}^N \left[ \left( 1 - \frac{P_{e,j}}{P_{n,j}} \right) \times Q_{n,j} \right]}{\sum_{j=1}^N Q_{n,j}} \quad (4)$$

$$IV = \sum_{j=1}^N SS_i + EVL_i + PD_i \quad (5)$$

onde:  $N$ : número total de nós da rede;  $Q_{e,j}$ : vazão fornecida ao nó  $j$  após a falha do tubo, em  $m^3/s$ ;  $Q_{n,j}$ : vazão do cenário novo fornecida ao nó  $j$ , em  $m^3/s$ ;  $Tr$ : tempo médio de reparo do tubo  $i$  (equação 3);  $D_i$ : diâmetro do tubo em polegadas;  $u_j$ : valor econômico da água para o nó  $j$ , por exemplo, \$0,1577/ $m^3$  para uso municipal;  $P_{e,j}$ : pressão no nó  $j$  após a falha do tubo, em m;  $P_{n,j}$ : pressão do cenário novo fornecida ao nó  $j$ , em m.

O Indicador IV, equação 5, é denominado de Indicador de Vulnerabilidade (%), e apresenta o grau variação de risco de não atendimento às condições iniciais (Cenário Novo). Quanto maior o indicador maior a vulnerabilidade ao envelhecimento.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Hidráulicos

Os resultados das simulações hidráulicas para os cenários estão indicados nas figuras 3 a 7 a seguir.

Figura 3 – Simulação Hidráulica (Pressão e Vazão) – CN

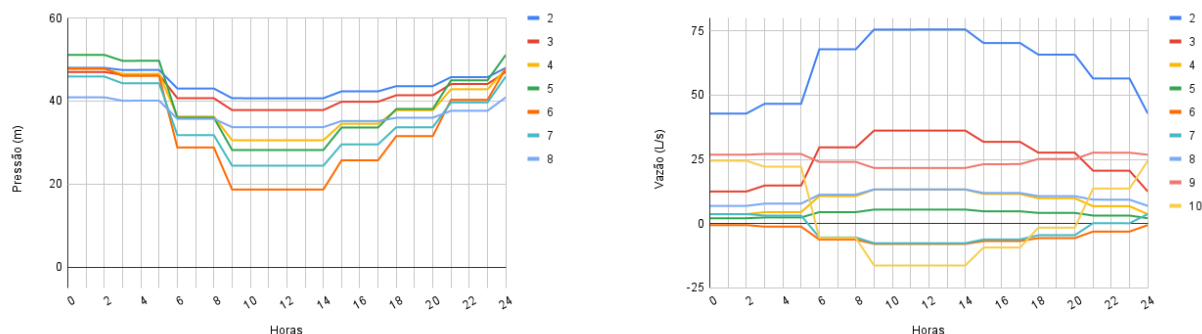


Figura 4 - Simulação Hidráulica (Pressão e Vazão) - C1 – 10 anos

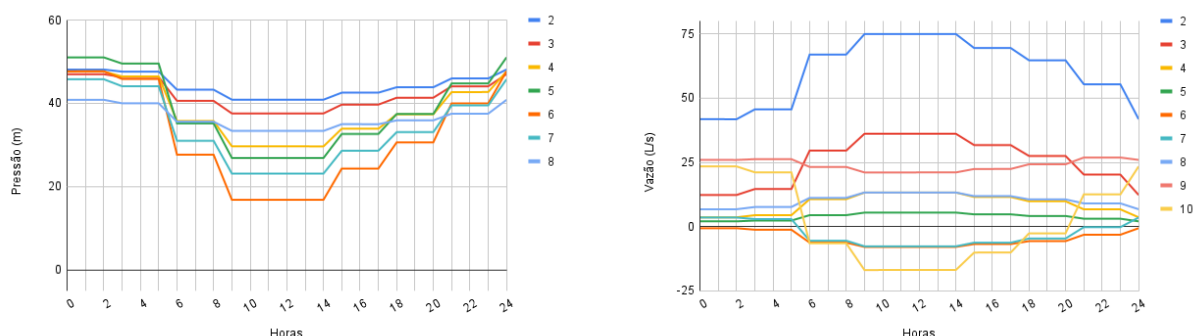


Figura 5 - Simulação Hidráulica (Pressão e Vazão) - C1 – 20 anos

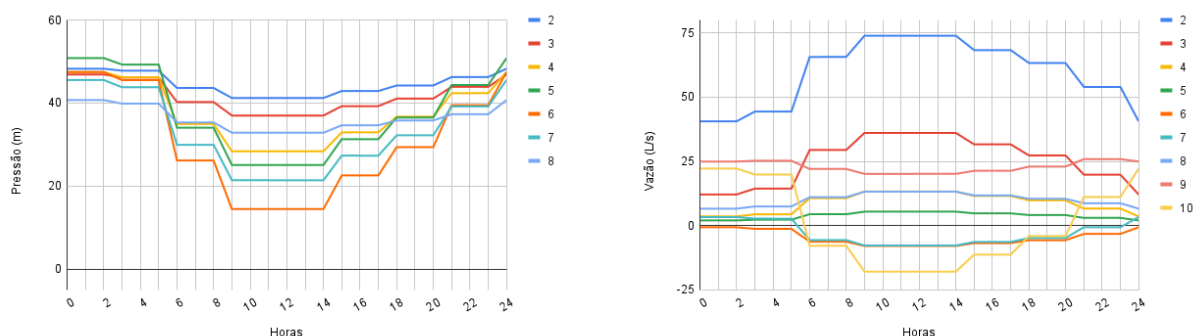


Figura 6 - Simulação Hidráulica (Pressão e Vazão) - C2 – 10 anos

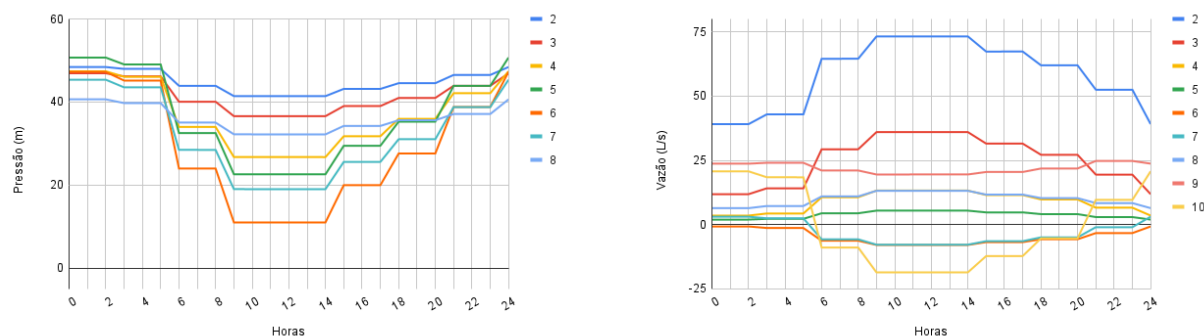
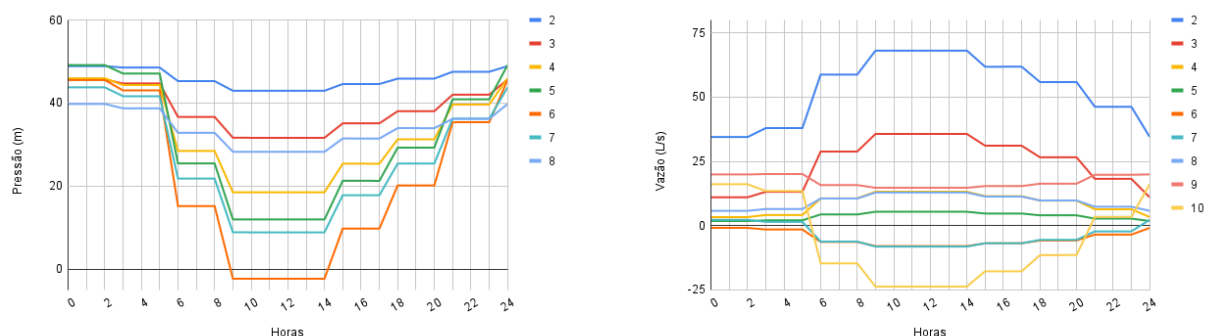


Figura 7- Simulação Hidráulica (Pressão e Vazão) - C2 – 20 anos



Levando em conta os resultados de pressões obtidas em todas as simulações testadas, observa-se que quando ocorre a mudança somente no coeficiente de Hazen Willians, as pressões se alteram indicando a resposta hidráulica de diminuição de pressão particularmente entre 9h e 14h (C1). Para o C2 os efeitos são amplificados significativamente na pressão com pressões negativas, especialmente em C2 – 20 anos.

Uma característica que chama atenção nos gráficos de vazão é a presença de valores negativos em todos os casos, isso ocorre devido ao equilíbrio do balanceamento entre vazões (equação 6), o sinal significa a mudança no sentido do fluxo. (Salvino, 2012).

$$\sum_{i=1}^n (Q_{entra})_i - \sum_{j=1}^m (Q_{sai})_j - d = 0 \quad (6)$$

onde:  $n$ : número de trechos chegando no nó;  $m$ : número de trechos saindo do nó;  $(Q_{entra})_i$ : vazão do trecho  $i$  que entra no nó, em  $m^3/s$ ;  $(Q_{sai})_j$ : vazão do trecho  $j$  que sai do nó, em  $m^3/s$ ;  $d$ : demanda do nó, em  $m^3/s$ .

### Indicadores

Os resultados dos indicadores estão apresentados nas figuras 8 a 10, respectivamente para SS, EVL e PD. A fórmula do indicador PD combina tanto pressão quanto vazão, porém são fenômenos de elementos distintos, portanto, a correlação selecionada para determinar quais

pressões e vazões seriam usadas em conjunto partiu da correspondência da vazão de entrada de cada nó, representada na Figura 1 é sintetizada na Tabela 3.

Tabela 3– Correlação entre nós e trechos

Nó	Trecho
2	Bomba
3	2
4	3
5	4
6	5 + 6
7	8
8	7 + 9

Em casos de nós em que há duas ou mais vazões de entrada, considera-se o somatório como uma vazão total.

Figura 8: Indicador SS

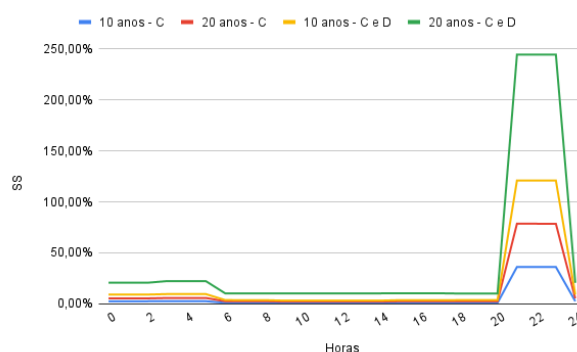


Figura 9: Indicador EVL

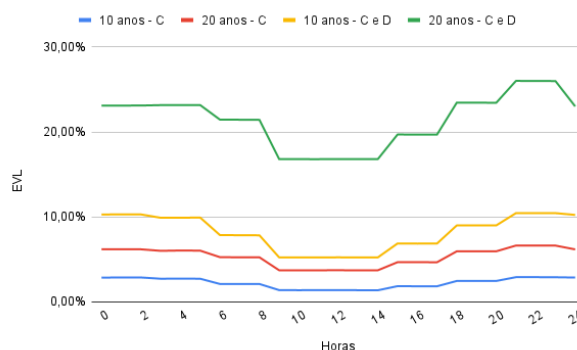
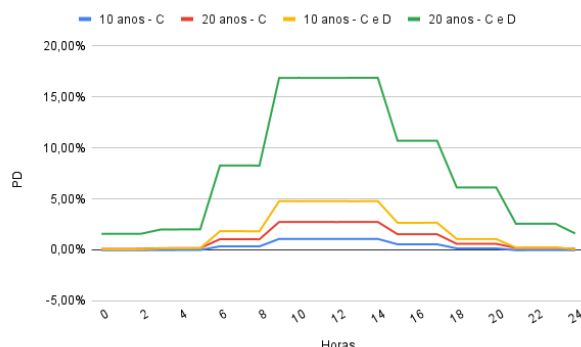


Figura 10: Indicador PD

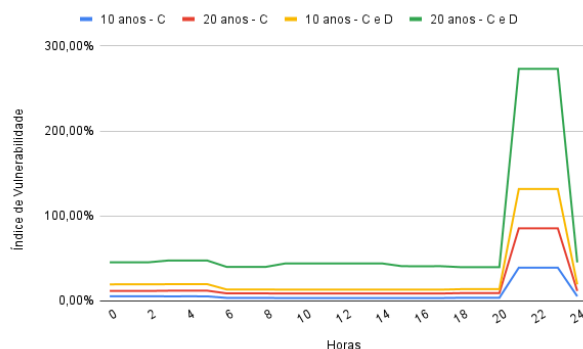


Os resultados mostram que o indicador mais significativo, considerando a simulação estendida, é o SS a partir das 20h até às 24h. O EVL apresenta uma leve redução originada às 8h e volta a crescer às 14h, até que às 23h novamente ocorre outra atenuação. Já o PD exibe um comportamento parecido com o consumo durante todo o dia. Entre as 9h e 14h o indicador permanece praticamente constante.

### Índice de Vulnerabilidade

A Figura 11 apresenta os resultados de todos os cenários combinados. Como esperado, os maiores indicadores se encontram no cenário C2 de 20 anos, com alterações tanto no coeficiente C e no diâmetro.

Figura 11 – Índice de Vulnerabilidade



Os resultados mais expressivos foram gerados entre as 20h e 24h em todos os casos, sendo que o indicador SS o que produziu variações mais significativas, na parcela da razão entre as vazões de após a falha. A diferença é expressiva entre ambas, alavancando os resultados e destacando que para permanecer em equilíbrio a vazão fornecida no nó 6 é altamente reduzida comparativamente com a inicial. No restante do dia os indicadores permanecem baixos e estáveis, mantendo-se todos menores que 50%. Isto reforça a relevância de revisar a configuração hidráulica da rede para cenários de envelhecimento de tubulações.

## CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, apresenta-se uma abordagem para análise de vulnerabilidade de redes de distribuição de água utilizando uma visão mais abrangente do que a apresentada por Marlim et al

(2019). O indicador global de vulnerabilidade é significativamente influenciado pelo balanço de vazões em cenários de envelhecimento de tubos.

Como esperado, os cenários com maiores indicadores são os que incluíram a variação do diâmetro nas simulações, logo, a influência dessa medida cria um efeito relevante nos resultados, sendo o cenário que mais se aproxima com a realidade, pois as duas variáveis sofrem transformações simultâneas.

Nesta pesquisa, a ênfase é dada no sentido de ter uma percepção global do sistema. A próxima etapa é a avaliação por trechos e a identificação daqueles mais críticos.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa produtividade do terceiro autor.

## **REFERÊNCIAS**

BEZERRA, S. D. T. M. (2005). Método de Otimização para Reabilitação de Redes de Distribuição de Água. UFPB Campina Grande – PB, 125 p.

GOMES, H. P. (2009). Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias. Editora Universitária/UFPB João Pessoa – PB, 277 p.

GOMES, R. S.; ALVES, W. F. (2024). Utilização da Modelagem Hidráulica Computacional na Proposição de Melhorias de um Sistema de Distribuição de Água com Ênfase na Prevenção de Vazamentos. IFES Vitória - ES, 54 p.

KELLNER, E. (2022). Introdução ao EPANET: Simulação e Dimensionamento dos Sistemas de Abastecimento de Água. UFSCar São Carlos – SP, 168 p.

MARLIM, M. S.; JEEONG, G.; KANG, D. (2019). “Identification of Critical Pipes Using a Criticality Index in Water Distribution Networks”. Applied Sciences 9(19), pp. 4052.

ORELLANA, A. (2011). Contribuição ao Estudo do Planejamento de Reabilitação de Redes de Distribuição de Água. UNICAMP Campinas – SP, 128 p.

ROSSMAN, L. A. (2009). EPANET 2.0: Manual do Usuário. Tradução do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento/UFPB João Pessoa – PB, 197 p.

SALVINO, M. M. (2012). Modelagem Computacional Visando a Reabilitação de Redes Hidráulicas. UFPB João Pessoa – PB, 148 p.