DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA SOB ABORDAGEM DE PREVISÃO DE SINAIS DE CARGA DE PRESSÃO

Fabrizio Silva Campos [(1)]
Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade do Vale do Itajaí (2020), mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP) (2023), atua como especialista técnico em NRW em SmartAcqua Soluções Tecnológicas, com forte atuação na aplicação de tecnologias na eficiência operacional da gestão das perdas de água.

Endereço[(1)]: Av. Trabalhador São Carlense, 400 – Centro – São Carlos – São Paulo - CEP: 13566-590 - Caixa Postal 359- Brasil - Tel: +55 (16) 3373-9552- Fax: +55 (16) 3373-8269 - e-mail: **engfabrizio.campos@gmail.com**

RESUMO

Os altos índices de perdas de água em sistemas de distribuição representam um desafio significativo para as companhias de saneamento, impulsionando a busca por soluções tecnológicas que melhorem a eficiência operacional. Uma grande parte dessas perdas ocorre devido a vazamentos e rompimentos de tubulação, muitas vezes não visíveis, levando a uma atuação majoritariamente reativa. O presente estudo apresenta uma solução tecnológica avançada para a gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento, utilizando modelagem de séries temporais de carga de pressão para detecção de vazamentos em tempo próximo ao real. Através do modelo GARMA (modelo autorregressivo e de médias móveis generalizado), supera-se limitações prévias, permitindo predições confiáveis e a identificação eficaz de vazamentos. O trabalho, fundamentado em dados de monitoramento reais e experiências em escala prática, demonstra a eficácia da abordagem na otimização da resposta a vazamentos, direcionando equipes de campo com precisão e contribuindo para a sustentabilidade ambiental, econômica e social. A metodologia proposta oferece uma alternativa econômica e prática às companhias de saneamento, evidenciando avanços significativos na detecção precoce de vazamentos e na gestão inteligente de recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência Operacional, Detecção de Vazamentos, Previsão de Pressão

INTRODUÇÃO

No Brasil, a perda de água é um problema persistente e crescente que afeta diretamente a disponibilidade de água para consumo humano e para realização de atividades produtivas. De acordo com dados oficiais, mais de 40% da água tratada é perdida antes de chegar às torneiras das residências (BRASIL, 2022). Assim, a análise das perdas de água é importante para o planejamento adequado dos recursos hídricos, bem como para garantir a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água. Desta forma as companhias de saneamento tendem a dedicar seus esforços em busca de melhorar seus processos operacionais de gestão do combate às perdas de água. Um dos aspectos a serem considerados quando se fala em eficiência operacional é o controle de vazamentos.

Diversas publicações trazem o esquema da IWA (*International Water Association*) que apresenta quatro componentes básicos do controle de perdas reais, sendo eles, o controle de pressão e de nível de reservatório, melhoria dos materiais e da manutenção, remanejamento e reabilitação das tubulações, rapidez e qualidade dos reparos e o controle ativo de vazamentos (TARDELLI FILHO, 2006; LAMBERT, 2001). Por um lado, o gerenciamento de pressões sozinho não elimina totalmente as perdas, e a rapidez e qualidade dos reparos pode ser resolvida com ações de cunho administrativo, por outro lado as tarefas de detecção e de localização de vazamentos incluem desafios técnicos ainda em aberto (GAMBOA-MEDINA, 2017).

O controle ativo de vazamentos é o modo operacional em que a companhia de saneamento emprega esforços e recursos para detectar vazamentos ocultos, ou vazamentos não visíveis. A detecção proativa de vazamentos apresenta diversos benefícios, como a redução de custos de produção de água, bem como a possibilidade de evitar ou adiar investimentos de capital necessários para buscar novas fontes de abastecimento de água. Além disso, ajuda a prevenir danos à infraestrutura, caso os vazamentos sejam encontrados e reparados antes de causar uma falha catastrófica (STURM et al., 2008).

Por parte das companhias de saneamento, a realidade atual possui diversas limitações que afetam os serviços de controle de vazamentos, como a falta de recursos para compras de equipamentos, ausência de modelos hidráulicos completos, atualizados e calibrados (GAMBOA-MEDINA, 2017), além de centros de controle operacional (quando possuem) com baixo nível de maturidade, que ainda dependem de profissionais habilitados analisando visualmente gráficos nas telas para operar o sistema com base em sua experiência (HAMILTON et al., 2021). Ou seja, há muita informação escondida nos próprios históricos de dados que não são aproveitadas.

Diante da complexidade que envolve o gerenciamento e operação de um sistema de abastecimento de água, contar com modelos capazes de extrair informações de qualidade dos dados monitoradas e que sejam capazes de compor suporte ao processo de tomada de decisão, tornando-o mais rápido e assertivo, tende a colaborar com o aumento da eficiência operacional por parte das companhias de saneamento. Neste sentido, diversas são as iniciativas por parte da academia na construção desses modelos, seja para séries de vazão ou pressão, com objetivos diversos como previsão da demanda de água, detecção e localização de vazamentos, preenchimento de falhas em séries de monitoramento ou otimização de conjuntos moto bombas. Contudo, essas iniciativas em sua maioria foram desenvolvidas sobre sistemas teóricos, e encontram limitações que impedem a aplicação e escalabilidade em sistemas reais.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar solução tecnológica de sistema de suporte à decisão, que auxilie companhias de saneamento a aumentar sua eficiência operacional na gestão dos processos de controle ativo de vazamentos, através da modelagem de dados de carga de pressão em tempo próximo ao real. Para isso, foram utilizados dados do monitoramento de um sistema real de abastecimento de água, sob abordagem da modelagem estatística de séries temporais, capaz de superar limitações antes encontradas no referencial teórico, possibilitando maior confiabilidade na previsão do comportamento da rede, constituindo arcabouço técnico para detectar vazamentos através do desvio entre observação e previsão de carga de pressão.

MODELAGEM DE SÉRIES TEMPORAIS DE CARGA DE PRESSÃO

Como parte da caracterização do comportamento da série temporal de pressão em uma rede de abastecimento é importante levar em consideração características de seu mecanismo gerador. De acordo com Tsutiya (2006), para economias de água residenciais, “a quantidade de água consumida varia continuamente em função do tempo, das condições climáticas, hábitos da população, etc”. Para o abastecimento de água de uma forma geral ocorrem variações em escala anual, mensal, diária, horária e instantânea do consumo de água.

Sendo o consumo de água o fator que influencia na dinâmica operacional da rede de abastecimento, é esperado encontrar os efeitos das variações de consumo também nos sinais de pressão. Em geral, inversamente proporcionais às variações de consumo na rede, ou seja, quando a vazão de consumo aumenta em determinada hora do dia a pressão tende a decrescer, e quando a vazão é mínima, a pressão na rede é máxima. Assim, analogamente ao estudo de séries temporais, os dados de pressão na rede de abastecimento foram entendidos em suas componentes de tendência, sazonalidade e ruídos.

Os autores Yipeng et al. (2017) em sua revisão de métodos de aplicação para detecção de vazamentos, classificaram abordagens baseadas em dados em três categorias distintas, entre elas os métodos de previsão-classificação. Sendo essa a abordagem a aplicada nessa pesquisa, detalha-se que, segundo os autores, os métodos de previsão-classificação podem ser entendidos como abordagens em que, quando ocorre um vazamento em um setor de abastecimento de água, os valores medidos pelos sensores irão divergir significativamente dos valores previstos pelos modelos, porque a previsão é baseada em dados sob condições normais.

Notadamente, cada método possui suas limitações. Entre as limitações encontradas para o método de previsão-classificação pode-se citar resultados errôneos de detecção de eventos em função de saídas dos modelos previsão determinísticas, pois diversos estudos não apresentam informações sobre os resíduos dos modelos. Diversas outras limitações são encontradas em pesquisas que aplicaram modelos para prever pressões, mas não avançaram na detecção de vazamentos com os mesmos modelos dadas as limitações (MASON, 2019; BAKKER et al., 2014; ADACHI et al., 2017).

Para lidar com as limitações encontradas nesta abordagem, estratégias para assegurar estacionariedade histórica da série devem ser empregadas, tanto para tendência quanto para sazonalidade. Quanto à confiança na previsão, devem ser desenvolvidos modelos capazes expressar graus de confiança nos valores previstos, através de métodos probabilísticos, empregando-se melhores funções de densidade de probabilidade (YIPENG et al., 2017). Assim, foi aplicado neste trabalho a modelagem das séries de carga de pressão usando modelo GARMA (*generalised autorregressive and moving average model*) desenvolvido por Benjamin et al. (2003), que

propuseram uma nova abordagem para o problema da extensão dos modelos gaussianos autorregressivos e de médias móveis para uma estrutura não gaussiana, e que foi aplicada à dados de monitoramento de pressão em redes de abastecimento de água por CAMPOS (2023).

Chamado de GARMA, ou modelo generalizado autorregressivo e de médias móveis, este modelo combina a capacidade de lidar com diversas covariáveis dos modelos lineares generalizados e a modelagem dos erros por processo autorregressivos, com a possibilidade de usar uma distribuição da família exponencial para determinar a probabilidade da observação de um valor futuro dado observações passadas. Assim o modelo é composto pelas equações 1 e 2 na seguinte forma:

$$f(y_t|H_t) = \exp\left\{\frac{y_t v_t - b(v_t)}{\varphi} + d(y_t, \varphi)\right\} \quad \text{Eq. 1}$$

A equação 1 define a função de densidade condicional onde é representada a probabilidade de observar y_t, dado H_t. Essa função depende de parâmetros chamados v_t e φ bem como de funções específicas $b(.)$ e $d(.)$ que variam de acordo com o tipo de distribuição a ser usada. No modelo GARMA o cálculo da média condicional μ_t é relacionado com o preditor linear η_t por meio de uma função de ligação chamada $g(.)$. Além de levar em consideração os termos autorregressivos e de médias móveis, logo temos a equação 2:

$$g(\mu_t) = \eta_t = \underline{\boldsymbol{x}_t'\boldsymbol{\beta}} + \sum_{j=1}^{p} \phi_j \left\{ g(y_{t-j}) - \underline{\boldsymbol{x}_{t-j}'\boldsymbol{\beta}} \right\} + \sum_{j=1}^{q} \theta_j \{ g(y_{t-j}) - \eta_{t-j} \} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, $\underline{\boldsymbol{x}_t}$ é um vetor de r variáveis explicativas e $\underline{\boldsymbol{\beta}'} = (\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_r)$. Os parâmetros autorregressivos são $\underline{\boldsymbol{\phi}'} = (\phi_1, \ldots, \phi_p)$. Os parâmetros de médias móveis são $\underline{\boldsymbol{\theta}'} = (\theta_1, \ldots, \theta_q)$. Os termos de resíduos considerados pela função de médias móveis podem ser de diferentes tipos como desvios resíduos de *Pearson*, resíduos na escala original dos dados ou na escala do preditor como na equação 1 (exemplo $g(y_{t-j}) - \eta_{t-j}$). Um modelo GARMA(p,q) é definido pelas equações 1 e 2. Em resumo, os parâmetros do modelo são $\underline{\boldsymbol{\beta}'}$, $\underline{\boldsymbol{\phi}'}$ e $\underline{\boldsymbol{\theta}'}$, estimados a partir do método da máxima verossimilhança condicional em um processo iterativo de mínimos quadrados ponderados.

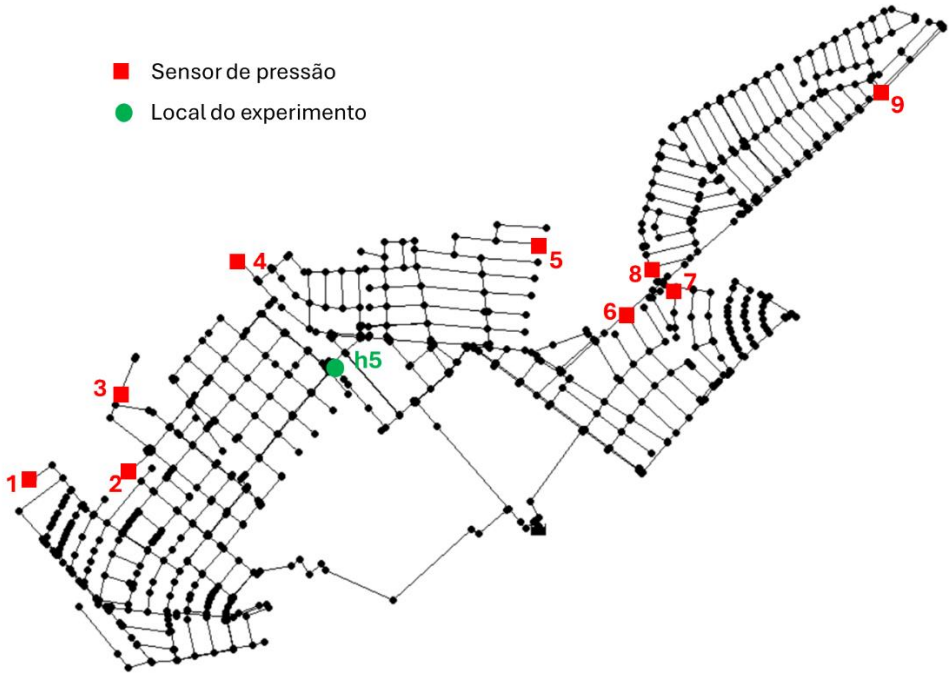
ESTUDO DE CASO

A base de dados deste estudo provém dos ensaios de campo realizados por Gamboa-Medina (2017), a qual monitorou por 357 dias as cargas de pressão da rede de abastecimento de água de um setor no município de Araraquara, SP – Brasil, com resolução temporal de 1 dado a cada 2 minutos. Como características do setor tem-se uma área de 2,75 km², com aproximadamente 6 mil ligações, sendo 90% de categoria residencial. A extensão da rede é de aproximadamente 57 km, formada principalmente por tubulações de PVC, com diâmetros de 50 mm (72%) até 250 mm (7%). Alguns trechos de rede mais antigos possuem cerca de 20 anos e diversos são os chamados para reparo de vazamentos no local feitos para a companhia de saneamento local (DAAE – Departamento Autônomo de Água e Esgoto da cidade de Araraquara).

Ao todo, 9 sensores foram utilizados por Gamboa-Medina (2017), os quais sua localização foi determinada por processo de otimização de modo a representar a melhor cobertura do monitoramento. Durante o período de monitoramento, foram realizadas diversas simulações de vazamentos na rede, com o objetivo de analisar posteriormente o impacto destas simulações na série de dados. A Figura 1 apresenta o esquema do modelo hidráulico da rede de abastecimento estudada com a localização dos sensores e dos pontos em que foram realizadas simulações de vazamentos. A simulação de vazamento foi realizada mediante abertura controlada de hidrante na rede, identificados na Figura 1 através do círculo verde seguido da nomenclatura específica “h5”.

De posse desses dados, foram aplicados o modelo GARMA e calculadas as métricas de acurácia de previsão (RMSE e MAPE) para cada um dos 9 sensores, nos horizontes de previsão de 24 e 48 horas, para cada um dos 12 meses do ano. Para isso, foram utilizadas janelas de análise, onde se utilizava 14 dias de dados observados para treinar o modelo, e com isso se fazia previsão de 24 e 48 horas a frente.

Figura 1 - Esquema do modelo hidráulico da rede de abastecimento estudada com a localização dos sensores de pressão e do ponto de simulação dos vazamentos. Fonte: Gamboa-Medina (2017)



Uma vez realizada a previsão, com seu respectivo intervalo de confiança, pode-se desenvolver sistema de suporte à decisão para detecção de vazamentos. Assim, selecionou-se um evento onde foi simulado um vazamento no setor monitorado através da abertura de um hidrante. O evento ocorreu em 28/10/2015 a partir das 22:00h, e teve duração de 30 minutos, localizado no nó h5 do modelo hidráulico, conforme a Figura 1. A vazão simulada foi de 28 l/s.

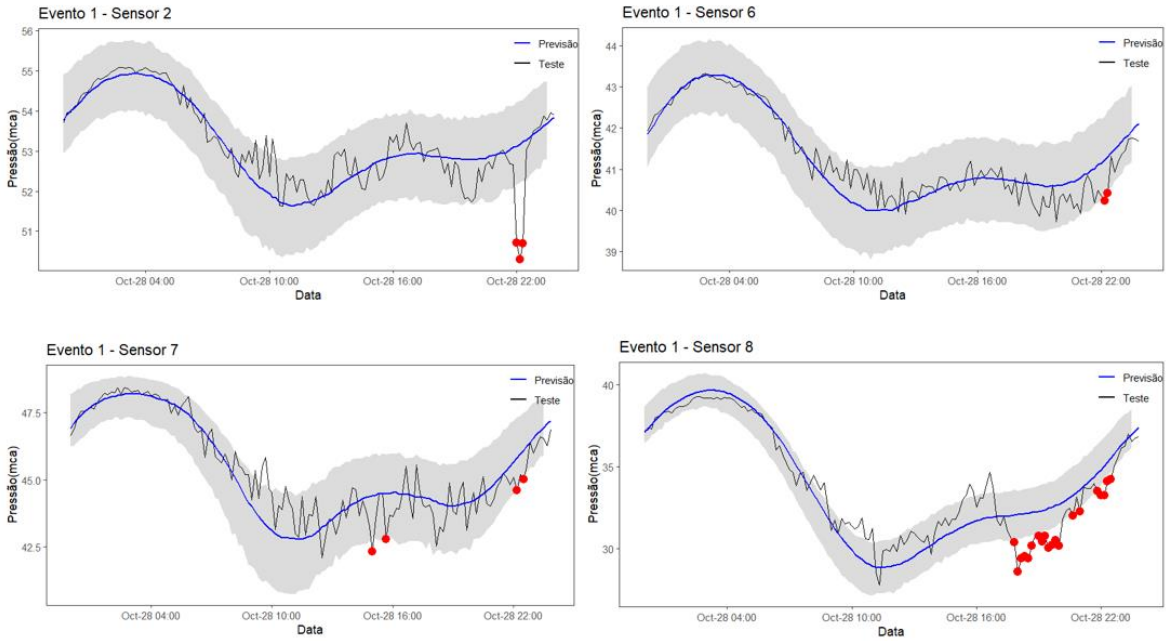
Então, a partir do modelo treinado com dados de 14 dias anteriores ao dia do evento, faz-se previsão e analisa-se a detecção do vazamento. Uma vez que vazamentos impactam o comportamento dos dados com quedas de pressão, criou-se função para destacar a partir de gráficos os pontos cujo valor observado estivesse abaixo do intervalo de confiança mínimo. Assim, foi possível avaliar dentre os nove sensores quais aqueles que conseguiram detectar o evento, para que se pudesse explorar a resposta dos sensores em cenários de vazamentos.

RESULTADOS

O processo de aplicação do modelo GARMA se caracteriza com a definição da função de densidade de probabilidade gama, o uso das variáveis exógenas que melhoram a modelagem de dias atípicos de comportamento da rede como sábado e domingo, além dos termos que modelam a sazonalidade determinística da série. A avaliação das diferentes combinações de ordem dos parâmetros autorregressivos e de médias móveis, em conjunto com análise de resíduos, apontaram para o melhor ajuste do modelo. O resultado da acurácia de previsão média do modelo GARMA foi de 0,97 para RMSE (mca), e de apenas 1,59 para MAPE (%), demonstrando precisão do modelo em prever o comportamento da rede. Somando essa precisão com a capacidade de oferecer intervalo de confiança na previsão, o modelo se mostra como sendo base para detecção de vazamentos.

Neste sentido, uma verificação da aplicabilidade do método de acordo com o estudo de caso proposto, onde através da abertura de hidrantes simulou um evento de 28 l/s de vazão no dia 28/10/2015 às 22:00h. Os resultados apontam que todos os sensores detectaram pontos fora do intervalo de confiança no momento da simulação, desde os primeiros 10 minutos de ocorrência do vazamento. Isso pode ser observado através dos pontos vermelhos nos gráficos que marcam todos os pontos de pressão observada que extrapolou o limite de "normalidade" prevista pelo modelo. Exemplos de comportamentos diferentes entre os sensores podem ser observados na Figura 2, onde a distância entre o valor observado e a previsão varia em cada sensor.

Figura 2 – Figura da detecção de vazamento ocorrida na cidade de Araraquara através do modelo de previsão. Fonte: o autor.



Foram detectadas anomalias nos sinais com desvios no horário relativo à simulação indicando que a abordagem previsão e controle proposta foi efetiva na detecção de vazamentos através da comparação com a previsão do comportamento da rede de abastecimento de água. O sensor s2 por exemplo, detectou os três pontos referentes aos 30 minutos de simulação, e por estar próximo ao ponto simulado, fez isso com certa facilidade, pois o evento gerou uma queda brusca na pressão no nó monitorado por este sensor. Assim como o que aconteceu com os sensores s6, s7 e s8 que, mais distantes, tiveram menor influência do evento, e mesmo assim foram efetivos em detectar o evento, em seus primeiros 10 minutos de ocorrência.

CONCLUSÕES

Através da pesquisa provou-se que a utilização do modelo GARMA foi capaz de superar limitações encontradas por outras abordagens propostas na literatura da área de detecção de vazamentos, uma vez que tem capacidade de representar adequadamente o comportamento da rede de abastecimento de água, quanto à variável carga de pressão, em todas suas componentes de tendência, sazonalidade e ruído. Por essa característica, o modelo foi capaz de fornecer intervalo de confiança de previsão adequado, provando-se como abordagem de previsão-classificação que pode ser aplicada de forma efetiva na detecção de vazamentos.

Os resultados operacionais obtidos, com a detecção do vazamento nos primeiros 10 minutos de sua ocorrência, fundamentados em experiências em escala real, evidenciam a eficácia do sistema proposto na otimização da resposta a vazamentos, direcionando de forma eficiente as equipes de campo para intervenções rápidas e precisas. Dessa forma, é possível para uma companhia de saneamento adicionar tecnologia em seu processo decisório, otimizando seus processos de controle ativo de vazamentos, com impacto direto em seus indicadores de perdas de água e operacionais.

Este estudo demonstra significativos avanços no campo da gestão de perdas de água através da implementação de sensores de pressão, que possuem menor custo e fácil instalação em relação aos tradicionais medidores de vazão, nas estratégias de detecção de vazamentos, proporcionando uma solução econômica e prática para as companhias de saneamento. A adoção desta metodologia que supera limitações antes encontradas, aliada a um sistema de suporte à decisão que automatiza a análise de dados e gera alertas de anomalias em tempo próximo ao real, representa um passo importante no avanço da detecção precoce de vazamentos.

A contribuição deste trabalho para o campo do saneamento ambiental é clara, abrangendo desde a redução de perdas físicas de água até a promoção de uma gestão mais inteligente e sustentável dos recursos hídricos.

Portanto, os benefícios reais relatados neste estudo não apenas atestam a viabilidade da sua aplicação em diferentes contextos, como também oferecem um caminho promissor para futuras pesquisas e implementações práticas no setor. Por fim, este estudo, ao combinar inovação, aplicabilidade prática e contribuições significativas ao conhecimento e à prática operacional no manejo de perdas de água, destaca-se como um importante passo adiante na busca por sistemas de saneamento mais eficientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADACHI, S., TAKAHASHI, S., & TAKEMOTO, T. Online burst detection in water networks with an ensemble of flow prediction models. CCWI2017 - Computing and Control for the Water Industry Conf., 2017.
2. BAKKER, M. et al. Detecting pipe bursts using Heuristic and CUSUM methods. Procedia Engineering, v. 70, p. 85-92, 2014.
3. CAMPOS, F. S. Previsão de séries temporais de pressão em redes de distribuição de água aplicando modelos generalizados autorregressivos de médias móveis (GARMA). 2023. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. DOI: 10.11606/D.18.2023.tde-08012024-111307
4. GAMBOA-MEDINA, M. M. Detecção de vazamentos e alterações em redes de distribuição de água para abastecimento, durante a operação, usando sinais de pressão. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
5. LAMBERT, A. What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. In: IWA Conf. n Systems approach to leakage control and water distribution system management. 2001.
6. MASON, B. A. G. Generalized Additive Model and Artificial Neural Networks for Water Demand. Dissertação. Técnico Lisboa, 2019.
7. MORETTIN, P.A.; TOLOI, C.M.C. Análise de séries temporais. 2 ed. São Paulo: Egard Blucher, 2006.
8. STURM, Reinhard; THORNTON, Julian; KUNKEL, George. 2008. “Controlling Real Losses in the Field—Proactive Leak Detection.” Water Loss Control. 2° ed. Nova Iorque, 2008. Disponível em: https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071499187. Acesso em: 15 de dezembro de 2022.
9. TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. Capítulo de livro. In: TSUTIYA, MT. Abastecimento de água, v. 3, p. 457-526, 2006.
10. TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 643p. São Paulo, p. 42, 2006.
11. YIPENG, W.; SHUMING, L. A review of data-driven approaches for burst detection in water distribution systems, Urban Water Journal, 2017. DOI: 10.1080/1573062X.2017.1279191