

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

PRIORIZAÇÃO DE MANUTENÇÃO DO MONITORAMENTO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA VIA XAI: UMA INTEGRAÇÃO COM O CONCEITO DE GÊMEOS DIGITAIS

Bruno Brentan¹, Jordana Alaggio², Daniel Bezerra³ e Gustavo Meirelles⁴

INTRODUÇÃO

A crescente digitalização dos sistemas de abastecimento de água (SAA), impulsionada pela expansão de sensores e pela disponibilidade de dados em alta frequência, tem favorecido a adoção de modelos baseados em inteligência artificial (IA) para apoiar o monitoramento, a operação e a tomada de decisão em tempo real (Rapp et al, 2023). A manutenção de sensores é um desafio recorrente em SAA, especialmente em redes extensas e sujeitas a variações operacionais. Este trabalho contribui para esse campo ao propor o uso do Integrated Gradients como ferramenta de explicação aplicada a metamodelos de previsão hidráulica, com o objetivo de apoiar a priorização de manutenção de sensores em sistemas operacionais inteligentes. O foco está na análise contextual e temporal da importância dos sensores, permitindo identificar aqueles que mais impactam a acurácia do modelo sob diferentes condições operacionais. A partir disso, busca-se promover estratégias de manutenção mais eficazes e confiáveis, contribuindo para a resiliência e a sustentabilidade dos sistemas urbanos de água.

METODOLOGIA

O estudo de caso utiliza a rede de distribuição de água de Modena, um sistema real amplamente adotado como benchmark na literatura técnica. A base de dados é composta por 10 anos de dados sintéticos de operação, com resolução horária, gerados com base na metodologia de Menapace et al. (2020), que simula demandas sazonais e variações operacionais realistas. O metamodelo é baseado em uma rede neural do tipo Multilayer Perceptron (MLP), treinada para estimar estados hidráulicos a partir de leituras de sensores de pressão e vazão, baseando-se no trabalho de Meirelles et al, (2018).

A interpretabilidade de modelos baseados em redes neurais profundas é um desafio central na sua aplicação em sistemas de abastecimento de água, especialmente quando se deseja compreender a contribuição de cada entrada (sensor) para uma determinada predição do modelo. Nesse contexto, o método Integrated Gradients (IG) (Sundararajan et al., 2017) estima a contribuição de cada entrada do modelo (neste caso, vazões e pressões de sensores da rede) ao longo de um caminho interpolado entre uma entrada de referência e a entrada real. Valores altos (positivos ou negativos) indicam forte influência do sensor no resultado do modelo.

RESULTADOS

Os resultados médios para o conjunto de teste foram MAE de 0,75m para carga de pressão e de 0.15L/s para vazão. Esses valores indicam que o metamodelo obteve bom desempenho, com erro compatível com incertezas operacionais reais em medições de campo, especialmente considerando a ausência de informações em alguns nós e tubulações da rede. Figura 1a apresenta a comparação entre

1) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Hydro-UAI, brunocivil08@gmail.com

2) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Hydro-UAI, jordanaalaggio@gmail.com

3) Universidade Federal do Tocantins, Escola de Engenharia Civil, Hydro-UAI, danielbezerrab@gmail.com

4) Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Hydro-UAI, limameirelles@gmail.com

valores simulados pelo EPANET e os valores estimados pelo metamodelo em diferentes pontos da rede, bem como a distribuição estatística do erro de carga de pressão e vazão.

Figura 1 – Resultados da aplicação da metodologia no sistema de abastecimento de água Modena

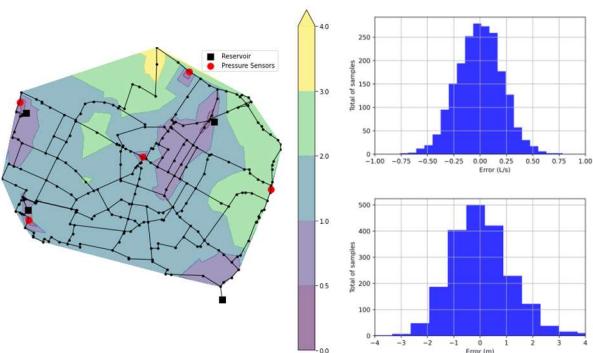


Figura 1a: resultados do metamodelo

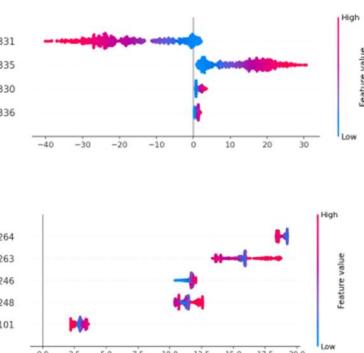


Figura 1b resultados da IG

Com o metamodelo treinado, aplicou-se o método Integrated Gradients para interpretar a influência relativa de cada sensor de entrada nas previsões geradas. A análise global considerou a média dos valores absolutos de IG ao longo de todas as amostras de teste. Os resultados revelaram que o sensor de vazão F331 apresentou elevada importância negativa, indicando que sua ausência ou distorção comprometeria significativamente as previsões, especialmente nas regiões a jusante. O sensor de vazão F335 foi o mais consistentemente positivo, sugerindo uma influência direta e robusta sobre múltiplas saídas do modelo. Entre os sensores de pressão, os destaques foram P263 e P264, ambos com valores de IG acima da média da rede, reforçando sua relevância para a estabilidade da modelagem. Esses resultados sugerem que tais sensores têm papel central no aprendizado da rede neural, sendo prioritários em estratégias de manutenção e calibração.

CONCLUSÃO

A aplicação do IG revelou que determinados sensores, como F331, F335, P263 e P264, exercem influência significativa no desempenho do metamodelo, e devem ser priorizados em planos de manutenção preditiva. A análise também evidenciou que a importância dos sensores varia ao longo do ciclo diário, indicando que a confiabilidade do gêmeo digital está fortemente atrelada à disponibilidade e qualidade dos dados dos sensores mais influentes.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações importantes devem ser reconhecidas. Em termos computacionais, o método apresenta custo considerável para aplicações em tempo real, especialmente quando a análise é aplicada de forma recorrente a todas as saídas do modelo. Além disso, por se tratar de um método baseado em gradientes, o IG pode ser sensível à saturação de ativação nas camadas internas da rede, o que pode afetar a confiabilidade das atribuições em determinados casos.

REFERÊNCIAS

- LIMA, G. F. et al. Metamodel for nodal pressure estimation at near real-time in water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, v. 20, n. 1, p. 111–124, 2018.
- RAPP, K. et al. Adoption of artificial intelligence in drinking water operations. *Water Research*, v. 244, p. 120570, 2023.
- AGRADECIMENTOS** Esse projeto foi parcialmente financiado pela FAPEMIG (PCE-00429-25) e CNPq Bolsa Produtividade PQ-2 306087/2022-7.