

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMA IOT PARA DETECÇÃO DO GOLPE DE ARÍETE EM PROJETOS HIDROSSANITÁRIOS

*Luize Baldoni de Oliveira¹; Fabiana Campos Pimentel²; Rutineia Tassi³; Daniel Gustavo Allasia Piccilli⁴; Leandro Conceição Pinto⁵; José Goes Vasconcelos Neto⁶;
Rodrigo Xavier Cabeda⁷; Rodrigo Girardon Della Pace⁸;*

Abstract: The occurrence of transient pressure waves in hydraulic systems, commonly known as water hammer, represents a significant risk to the integrity of sanitary systems under pressure. Real-time detection of these events is crucial for developing effective strategies for control and mitigation, preventing system damage. In the present work, a comparative analysis of local pressure variations between a low-cost sensor (MPX5050) and an industrial pressure transducer is carried out. The goal is to apply the Internet of Things (IoT) system to embedded monitoring systems. Experimental tests were conducted on a hydraulic bench module, representative of a home water supply network, installed at the Environmental Engineering Laboratory of UFSM. The system was subjected to induced hydraulic transients through the rapid opening of a solenoid valve. Local pressure signals were registered at two points on the utility room branch, which was instrumented with both sensors. The signals from the MPX5050 sensor and industrial transducer were acquired by an ESP32 microcontroller, operating at a 5 ms sampling rate. The results indicate a comparable performance between the devices in their ability to register rapid pressure variations associated with the hydraulic transient phenomenon. This demonstrates the potential for

¹) Curso de Graduação em Engenharia da Computação - Universidade Federal de Santa Maria: oliveira.luize@acad.ufsm.br

²) Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria: fabiana.pimentel@acad.ufsm.br

³) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria: ruti@ufsm.br

⁴) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria: dga@ufsm.br

⁵) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Maria: leandro.pinto@ufsm.br

⁶) Department of Civil and Environmental Engineering - Auburn University: jev0001@auburn.edu

⁷) Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária - Universidade Federal de Santa Maria: rodrigo.cabeda@acad.ufsm.br

⁸) Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Federal de Santa Maria: rodrigodellapace02@gmail.com

developing accessible and technically viable solutions for monitoring pressurized hydraulic networks.

Resumo: A ocorrência de ondas de pressão transitórias em sistemas hidráulicos, conhecidos como golpe de aríete, representa um risco significativo à integridade de sistemas hidrossanitários prediais. A detecção em tempo real desses eventos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle e mitigação de efeitos que danifiquem o sistema. Este trabalho propõe uma análise comparativa das variações de pressão pontuais entre um sensor de baixo custo (MPX5050) e um transdutor industrial de pressão, com foco na aplicação em sistemas embarcados de monitoramento baseados em Internet das Coisas (IoT). Os ensaios experimentais foram conduzidos em um módulo de bancada hidráulico representativo de uma rede hidrossanitária residencial, instalado no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da UFSM. O sistema foi submetido a transientes hidráulicos induzidos por meio da operação de abertura rápida de uma válvula solenóide, sendo registrados os sinais de pressão pontual em duas tomadas de pressão do ramal da área de serviço, instrumentada com os dois sensores. As leituras do sensor MPX5050 e do transdutor industrial foram adquiridas por um microcontrolador ESP32, operando com taxa de amostragem de 5 ms. Os resultados deste estudo apontam para um desempenho relativo dos dispositivos quanto à capacidade de registrar variações rápidas de pressão associadas ao fenômeno de transiente hidráulico, demonstrando a possibilidade do desenvolvimento de soluções acessíveis e tecnicamente viáveis no monitoramento de redes hidráulicas pressurizadas.

Palavras-Chave – Golpe de Aríete – Pressão – ESP32 – Módulos Hidrossanitários

INTRODUÇÃO

Sistemas hidráulicos sob pressão desempenham um papel fundamental no abastecimento e na distribuição de água. A operação eficiente e segura desses sistemas depende, em grande medida, do controle adequado das pressões internas nas tubulações. Alterações abruptas nas condições de escoamento, como a parada repentina de bombas ou a abertura e fechamento rápidos de válvulas, podem ocasionar ondas de pressão transitória, conhecidas como golpe de aríete (Sanders Neto *et al.* (2020)).

Esse fenômeno caracteriza-se pela propagação de ondas de pressão ao longo da tubulação, podendo causar vibrações, ruídos intensos e até mesmo danos estruturais, como fissuras ou rupturas, em função das sobrepressões e depressões geradas (Mendes (2011)). Segundo Chaudhry (2014), essas oscilações podem ultrapassar significativamente a pressão de projeto do sistema, exigindo a adoção de dispositivos mitigadores, como válvulas de alívio, ventosas e reservatórios hidropneumáticos.

O monitoramento em tempo real dessas variações surge como uma estratégia eficaz para prevenir danos e garantir a integridade do sistema. A medição contínua da pressão possibilita a detecção precoce de problemas hidráulicos, bem como a atuação automática de mecanismos de controle. Além disso, esses dados são essenciais para a calibração de modelos computacionais preditivos — como os baseados no método das características —

que simulam os efeitos dinâmicos do golpe de aríete e apoiam o desenvolvimento de soluções mitigadoras (Roy *et al.* (2022); Chaudhry (2014)).

Estudos recentes indicam que a combinação entre sensores eletrônicos de pressão e simulações computacionais contribui para a identificação de pontos vulneráveis nas redes hidráulicas, facilitando o dimensionamento de dispositivos de proteção, como válvulas de alívio, câmaras de ar e sistemas de bypass automático (Iancu *et al.* (2019)). Ferramentas especializadas, como o Bentley HAMMER e o ALLIEVI (El-Hazek (2024); Del Teso (2024)) permitem analisar o comportamento do escoamento e das pressões durante eventos transitórios, auxiliando tanto no projeto quanto na manutenção preventiva das instalações (Wang *et al.* (2022)).

Nesse cenário, a Internet das Coisas (IoT) desponta como uma tecnologia estratégica, ao permitir a conexão em rede de sensores, atuadores e microcontroladores capazes de coletar, processar e transmitir dados de forma automatizada. Embora o conceito de dispositivos interconectados antecede a formalização do termo, foi em 1999 que Kevin Ashton cunhou “Internet of Things” ao propor a integração de sistemas RFID (*Radio Frequency Identification* (Identificação por Radiofrequência)) à internet para fins logísticos. Desde então, a IoT tem evoluído rapidamente, impulsionada por avanços nas redes sem fio, na miniaturização de sensores, na computação em nuvem e nos algoritmos de processamento distribuído.

A aplicação da IoT em sistemas hidrossanitários possibilita o monitoramento contínuo de variáveis hidráulicas, com destaque para a pressão interna nas tubulações. A integração entre sensores inteligentes e conectividade em tempo real permite detectar com agilidade variações indesejadas, como as causadas pelo golpe de aríete, e acionar automaticamente mecanismos de proteção. Essa abordagem não apenas aumenta a segurança operacional, mas também reduz o tempo de resposta e viabiliza estratégias de manutenção preditiva.

Ao estender essa conectividade à infraestrutura urbana, a IoT transforma a forma como redes hidráulicas são gerenciadas. A presença de sensores em pontos críticos, como válvulas de controle, reservatórios e trechos pressurizados, permite a identificação imediata de anomalias e a execução de ações corretivas de maneira precisa. Assim, a incorporação da IoT representa um avanço relevante para a engenharia sanitária, contribuindo para a operação segura, a minimização de perdas e a longevidade dos sistemas hidrossanitários. Portanto, o teste de dispositivos de baixo custo em escala de bancada pode contribuir para o avanço na implementação de sistemas de medição e monitoramento de redes hidráulicas em escala real.

MATERIAIS E MÉTODO

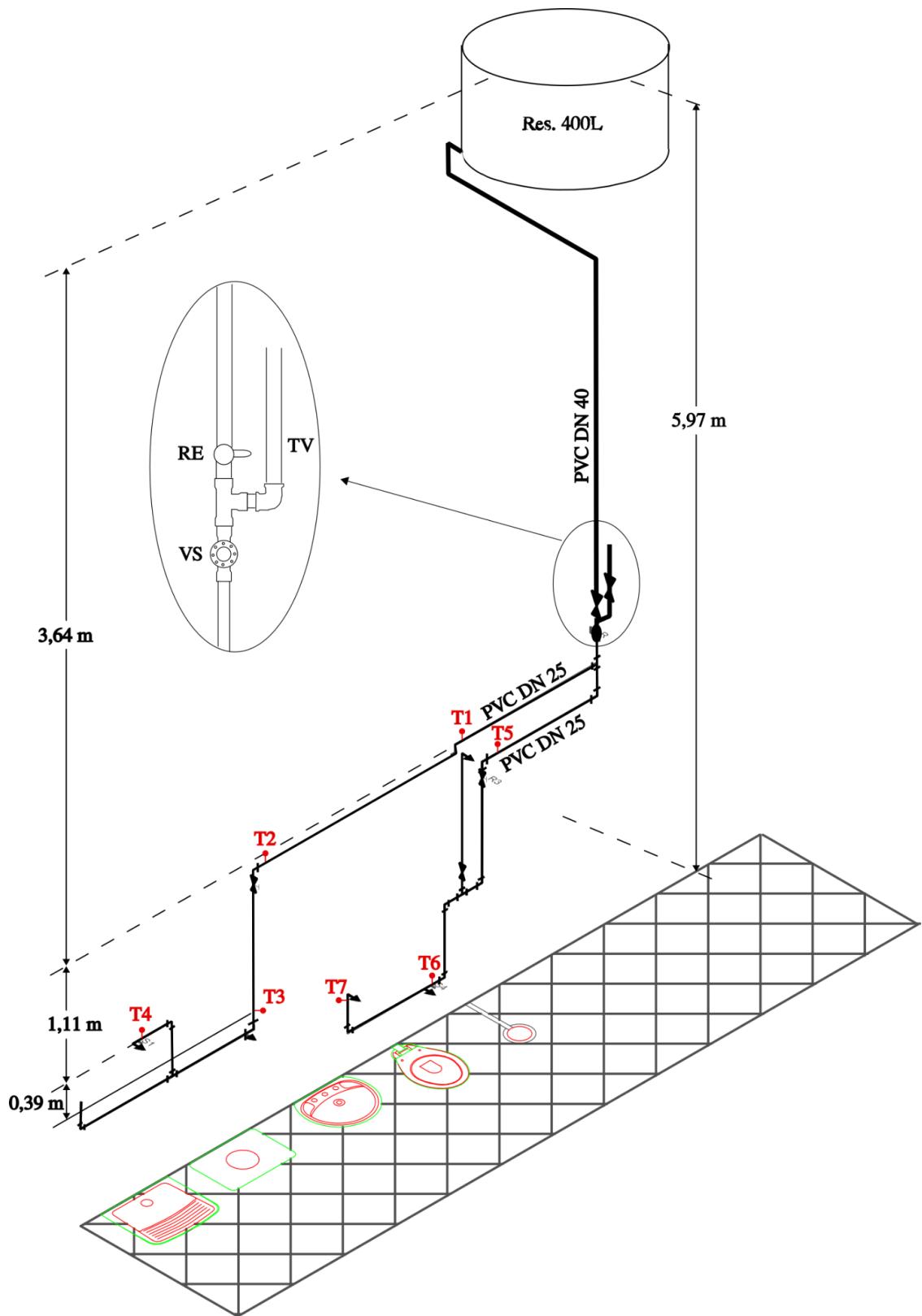
Aparato experimental

As rodadas experimentais foram conduzidas em um módulo hidráulico de bancada que simula um sistema hidrossanitário de distribuição de água residencial (Figura 1), sendo composto por dois ambientes a serem abastecidos, uma área de serviço e um banheiro. Este módulo está instalado no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Santa Maria (LEMA/UFSM) e é alimentado por um reservatório de 400L situado

numa cota 6,60 m acima do piso do laboratório. O sistema de distribuição é composto por tubulações de policloreto de vinila (PVC) tipo soldável, sendo que a coluna de alimentação tem diâmetro nominal (DN) de 40 mm enquanto os ramais possuem diâmetro nominal de 25 mm. No final da coluna de alimentação foram instalados um conjunto de acessórios compostos por um registro esfera (RE), um tubo de ventilação (TV) e uma válvula solenoide (VS), como pode ser verificado no detalhe da Figura 1. O registro esfera tem a função de interromper o fluxo de água, possibilitando a liberação pelo tubo ventilador das bolhas de ar presas no sistema. A válvula solenoide é um dispositivo fundamental do aparato, sendo responsável por controlar o fluxo de fluidos, abrindo ou fechando em frações de segundos, permitindo a realização dos protocolos experimentais.

Além dos ramais estarem divididos por ambientes, por meio de registros gerais (RG's), os mesmos possuem tomadas de pressão instaladas em todos os trechos do sistema (T1-T7). No presente trabalho, as tomadas de pressão T1 e T3, localizadas no ramal terminal da área de serviço, foram conectadas aos sensores MPX e industrial em rodadas experimentais sobre as mesmas condições iniciais, permitindo a posterior comparação entre os sinais dos dois tipos de sensores.

Figura 1 - Desenho esquemático do aparato experimental.



Transdutor Industrial de Pressão

Os transdutores industriais de pressão são dispositivos destinados à conversão de uma variável física, neste caso, a pressão, em um sinal elétrico proporcional, viabilizando sua leitura por sistemas microcontrolados e sua integração ao controle de processos operando sob condições críticas. O modelo adotado neste trabalho apresenta saída analógica de 0 a 5 V, compatível com entradas analógicas de microcontroladores comerciais, e requer alimentação externa de 24V, fornecida por fonte dedicada.

Com faixa de medição de -100 kPa a 100 kPa, o sensor é capaz de operar em condições de vácuo parcial e sob pressão moderada, atendendo a uma ampla gama de aplicações. Destaca-se por sua confiabilidade operacional, superior à de sensores convencionais, sendo projetado principalmente para ambientes industriais com elevada exigência de robustez. Apresenta baixa dissipação de potência, característica essencial em sistemas embarcados, além de estabilidade térmica e linearidade que garantem medições precisas e consistentes ao longo do tempo. Essas qualidades tornam o transdutor especialmente adequado para aplicações de monitoramento e automação que exigem desempenho estável diante de variações significativas de carga e temperatura.

Sensores MPX

Os sensores MPX5050 e MPX5100, pertencentes à família de transdutores piezo resistivos MPX desenvolvida pela *NXP Semiconductors*, constituem soluções amplamente utilizadas em aplicações de instrumentação industrial, automação, controle pneumático e monitoramento biomédico. Baseados em tecnologia monolítica de silício e técnicas de micro usinagem, esses sensores operam a partir da deformação de um diafragma sensível à pressão, o qual incorpora uma ponte de *Wheatstone* composta por *strain gauges*. A deformação mecânica induzida pela pressão resulta em variações proporcionais de resistência elétrica, as quais são amplificadas e convertidas em um sinal analógico de tensão contínua.

O *MPX5050* mede até 50 kPa, com sensibilidade de 90 mV/kPa e erro de $\pm 2,5\%$, mantendo estrutura similar e compensação térmica, sendo ideal para aplicações intermediárias e robustas. O *MPX5100* amplia a medição para até 100 kPa, com sensibilidade de 45 mV/kPa, erro de $\pm 2,5\%$ e tempo de resposta inferior a 1 ms. Está disponível nas versões *gauge*, diferencial e absoluta, adaptando-se a diversas configurações de projeto (NXP Semiconductors (2023)).

Em síntese, os sensores da família MPX, nas variantes MPX5050 e MPX5100, apresentam arquitetura compatível com sistemas microcontrolados e facilidade de integração em diferentes aplicações. A seleção do modelo mais adequado deve considerar parâmetros como a faixa de pressão a ser monitorada, a sensibilidade requerida e a margem de erro tolerável.

Desenvolvimento e implementação do Sistema Embarcado

O sistema embarcado foi desenvolvido com o microcontrolador *ESP32-WROOM-32*, baseado na arquitetura *Xtensa® dual-core* de 32 bits, com frequência de operação de até 240 MHz (Espressif Systems (2023)). Essa configuração oferece desempenho elevado para aplicações em tempo real, especialmente devido à sua capacidade de processamento paralelo e ao suporte a múltiplas entradas analógicas de 12 bits (Maier (2017)), permitindo medições com até 4096 níveis discretos de resolução. Essa resolução é particularmente adequada para sensores de pressão com saída analógica contínua. A escolha pelo *ESP32* deve-se à sua

superior taxa de leitura e processamento em comparação a microcontroladores de menor porte, tornando-o apropriado para sistemas que demandam aquisição rápida e precisa de dados.

A montagem do circuito eletrônico foi realizada de forma direta, com os sensores *MPX5050* conectados aos pinos analógicos do microcontrolador e alimentados pela saída VIN do próprio *ESP32*, conforme as exigências de alimentação do sensor. Para a conversão do sinal analógico em valores de pressão, foi utilizada uma biblioteca externa, que realiza a transposição dos valores de tensão para unidades físicas, expressando diretamente a pressão em cmH_2O . As medições são enviadas continuamente por meio da interface serial e visualizadas em tempo real no monitor serial.

O firmware foi desenvolvido em linguagem *C++*, utilizando o ambiente de desenvolvimento *PlatformIO* integrado ao *Visual Studio Code*. O programa implementa três instâncias da classe *Pressure*, cada uma associada a um pino analógico específico. A inicialização de cada sensor é realizada por uma função dedicada, enquanto a leitura da pressão é obtida por meio de um método *GET*. Os dados são transmitidos em intervalos regulares de 5 ms, garantindo alta frequência de amostragem e monitoramento contínuo no terminal serial.

Durante os experimentos, os dados exibidos foram copiados manualmente a partir do terminal e organizados em planilhas do *Microsoft Excel*, com cada aba representando uma tomada de teste distinta. Essa abordagem permitiu uma separação das séries temporais de medição, facilitando o posterior tratamento, análise e comparação dos resultados obtidos.

Protocolo estabelecido para os ensaios experimentais

A condução de ensaios experimentais envolvendo sistemas hidráulicos demanda a adoção de uma rotina metodológica rigorosa, pautada na ordem sequencial das ações e na precisão da operação dos dispositivos de medição e controle. O sucesso da investigação está intrinsecamente associado à eliminação de interferências físicas, como a presença de ar nas tubulações, e ao correto funcionamento dos elementos sensores. Dentre os aspectos operacionais relevantes, destaca-se a necessidade de garantir a estabilidade do sistema antes do início das medições, exigindo ações específicas voltadas à pressurização gradual, remoção de ar residual e verificação da funcionalidade dos sensores.

Para tal, opera-se o sistema inicialmente com registros, drenos e válvula solenóide abertos, permitindo a expulsão do ar presente no interior das tubulações. Além disso, a tubulação de ventilação superior do sistema é ativada, garantindo que a água transborde e substitua completamente o ar, até o enchimento integral da rede.

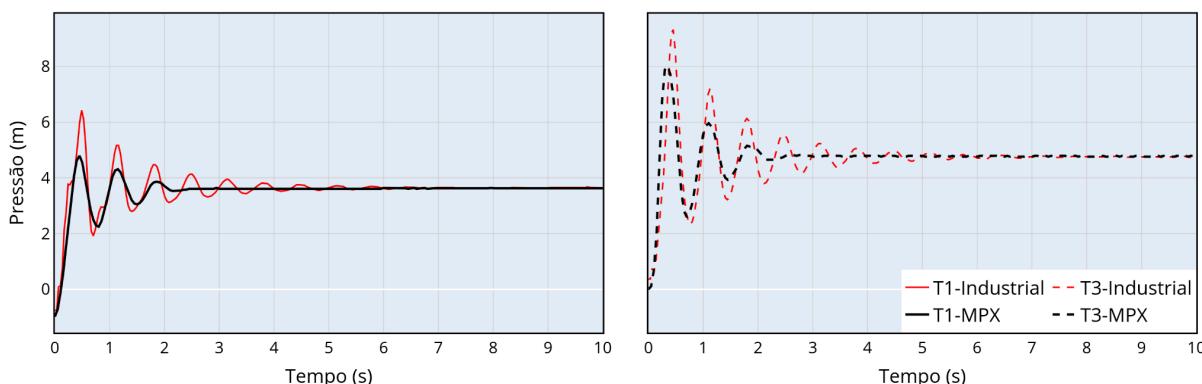
Uma vez confirmada a ausência de bolhas e o completo preenchimento hidráulico, os registros são fechados e a válvula solenóide desativada, estabelecendo-se as condições para a coleta de dados. Em seguida procede-se à retirada do volume de água remanescente do ramal terminal a montante da saída da pia da área de serviço. O volume de água coletado é medido e anotado para verificar a consistência da repetição dos ensaios.

Após os passos anteriores a válvula solenoide é acionada e o escoamento entra em regime transitório pelo efeito da compressão do ar confinado no ramal terminal a montante da saída da pia da área de serviço. A observação da estabilização das leituras, o registro das variáveis monitoradas e o desligamento ordenado dos equipamentos completam o ciclo experimental, respeitando os critérios técnicos que asseguram a repetibilidade dos ensaios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados dos ensaios realizados com os dois tipos de sensores propostos. Os sensores se mostraram eficientes na representação do fenômeno físico, registrando as oscilações ao longo do tempo de forma contínua e sem falhas de aquisição. Observa-se que ambos os modelos de sensores conseguiram capturar o fenômeno transitório com frequência de oscilação muito próximas, porém o sensor Industrial apresentou maiores valores de amplitude de variação da pressão, bem com um menor efeito dissipativo da onda de pressão ao longo do tempo.

Figura 2 - Comparaçao dos sinais de pressão dos transdutores MPX (linha preta) e Industrial (linha vermelha) nas tomadas de pressão T1 (linha contínua) e T3 (linha tracejada).



CONCLUSÃO

A análise comparativa entre o sensor MPX5050 e o transdutor industrial de pressão, aplicada às tomadas de pressão T1 e T3 em um sistema hidrossanitário experimental, evidenciou o desempenho relativo de dispositivos com diferentes graus de precisão, robustez e custo na detecção de eventos transitórios, com ênfase na caracterização do golpe de aríete.

O transdutor industrial, comumente utilizado para aplicações críticas, apresentou respostas mais próximas dos valores teóricos esperados, com elevada acurácia, linearidade e estabilidade. O sensor MPX5050, apesar de apresentar menor precisão absoluta, demonstrou resposta compatível com as exigências do fenômeno analisado, registrando com nitidez os picos de pressão e suas oscilações subsequentes, validando sua aplicabilidade em sistemas embarcados de menor custo.

O sistema de aquisição permitiu o registro contínuo e sem perdas dos dados experimentais, captando com clareza os eventos hidráulicos de curta duração. Sensores de baixo custo, quando corretamente integrados e calibrados com sistemas embarcados, podem

desempenhar papel relevante no monitoramento em tempo real de sistemas hidrossanitários, sobretudo em soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT).

Em síntese, os resultados demonstram que a instrumentação com sensores de baixo custo, aliada a plataformas embarcadas de alto desempenho, é tecnicamente viável para aplicações de monitoramento hidráulico, com potencial de uso em contextos urbanos, acadêmicos e de pesquisa. Embora os sensores industriais continuem sendo indispensáveis em cenários de alta exigência, a utilização de sensores da linha MPX, quando devidamente calibrados, configura uma alternativa eficiente, econômica e replicável para a detecção precoce de anomalias e para a otimização da operação de sistemas prediais de abastecimento de água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Santa Maria através do Centro de Tecnologia, juntamente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, além do esforço de todos e apoio dos membros do grupo de pesquisa em Modelagem HidroAmbiental e Ecotecnologias.

REFERÊNCIAS

CHAUDHRY, M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. 3. ed. Springer Science & Business Media, New York, 523 p.

IANCU, I.; DIMACHE, A.-N.; GEORGESCU, A.-M. (2019). “Aspects of Water Hammer Design and Protection Measures Modeling in a Water Supply Adduction”. In: Anais do IEEE 2019 International Conference on Hydraulics and Environmental Protection, Bucareste, Romênia. IEEE, pp. 1–6.

MENDES, F.H. (2011). *Instalações hidráulicas prediais: projeto, execução e manutenção*. 2. ed. LTC, Rio de Janeiro, 210 p.

ROY, J.K.; ROY, P.K.; BASAK, P. (2022). “Water hammer protection in water supply system: A new approach with practical implementation”. In: Anais do IEEE 2022 International Conference on Water Infrastructure, Kolkata, Índia. IEEE, pp. 1–12.

SANDERS NETO, V.C.; COSTA BARBOSA, J.M.; HOLANDA DE CASTRO, M.A. (2020). “Análise do efeito do golpe de aríete numa adutora com uma junção de ramificação”. *Revista DAE*, 68(225), pp. 135–148. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.058>.

WANG, C.; WU, L.; GAO, J.; LIU, B.; DANG, X.; SHAO, C. (2022). “Simulation and Analysis of Water Hammer Effect in Water Pipeline”. In: Anais do IEEE International Conference on Fluid Mechanics and Infrastructure Systems, Pequim, China. IEEE, pp. 1–8.

JAMALUDIN, H. (2020). “Designing ESP32 Base Shield Board for IoT Application”. In: *Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Engineering and Technology*, pp. 130–137.

NXP SEMICONDUCTORS (2023). “MPX5050, MPXV5050, MPVZ5050: Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated Data Sheet”. In: *Data Sheet Técnica*, NXP Semiconductors.

DEL TESO, R.; GÓMEZ, E.; ESTRUCH-JUAN, E.; SORIANO, J. (2024). “ALLIEVI as a Tool for Simulating Hydraulic Transients in Energy Recovery Systems”. In: *Engineering Proceedings*, v. 69, p. 131. MDPI.

EL-HAZEK, A. N.; HALAWA, M. A. E. (2024). “Optimum Hydropneumatic Tank Sizing to Protect Transmission Pipelines Supply System against Water Hammer”. In: *Engineering Research Journal (ERJ)*, v. 53, n. 1, pp. 212–221.