



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 2

SISTEMA DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA MONITORAMENTO E

CONSERVAÇÃO DO CONSUMO HÍDRICO EM SISTEMAS

METROFERROVIÁRIOS

INTRODUÇÃO

A escassez hídrica e o aumento da pressão regulatória e social sobre o uso racional da água têm colocado a gestão eficiente dos recursos hídricos como pauta prioritária para operadores de infraestrutura pública, entre eles os sistemas de transporte metroferroviário. Estações, edificações de apoio, pátios e áreas administrativas desses sistemas concentram consumo relevante de água para uso sanitário, irrigação e climatização, o que torna o monitoramento contínuo desse consumo uma necessidade tanto ambiental quanto econômica.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

No operador estudado, o acompanhamento do consumo hídrico era realizado por meio de leitura manual periódica dos hidrômetros instalados nas estações, prática que apresenta limitações operacionais relevantes: baixa frequência de leitura, elevada suscetibilidade a falhas humanas, ausência de série histórica granular e, sobretudo, incapacidade de identificar tempestivamente vazamentos ou consumos anômalos. Essas limitações comprometem o planejamento de ações preventivas e corretivas voltadas à conservação da água e geram risco de desperdício não detectado por períodos prolongados.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver, implantar e avaliar um sistema de sensoriamento remoto de baixo custo, elevada confiabilidade e alta resiliência operacional para o monitoramento em tempo quase real do consumo de água em instalações metroferroviárias. São objetivos específicos:

- (i) medir a vazão de água consumida com granularidade temporal adequada à identificação de padrões de uso;
- (ii) processar e armazenar os dados de forma resiliente a falhas de comunicação e de energia;
- (iii) subsidiar estratégias de racionamento por meio de visualização e análise dos dados coletados;
- e (iv) detectar precocemente discrepâncias de consumo compatíveis com vazamentos, por meio de um mecanismo automático de alerta.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

DIAGNÓSTICO

2.1 Diagnóstico situacional

O monitoramento do consumo de água nas estações do operador estudado era realizado exclusivamente por leitura manual de hidrômetros convencionais, sem qualquer automação. Essa condição gerava três riscos principais. Primeiro, a ausência de dados contínuos impedia a caracterização do perfil de consumo por estação, dificultando a priorização de ações de eficiência hídrica. Segundo, eventuais vazamentos — sobretudo os de baixa vazão, que não produzem sinais visíveis imediatos — poderiam permanecer não identificados por dias ou semanas, gerando desperdício acumulado e custo financeiro evitável. Terceiro, a inexistência de uma base histórica de dados impossibilitava a comparação objetiva entre estações e entre períodos, prejudicando o planejamento de investimentos em conservação hídrica.

A partir desse diagnóstico, definiu-se como requisito de projeto o desenvolvimento de uma solução de baixo custo de aquisição e implantação, elevada confiabilidade de transmissão de dados e resiliência a falhas de comunicação e de energia elétrica, de modo a viabilizar a futura replicação em escala para o conjunto de estações do sistema, sem exigir investimento comparável ao de soluções comerciais de telemetria hídrica de grande porte.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Nesse sentido, verificou-se que as soluções comerciais prontas de telemetria hídrica disponíveis no mercado, embora tecnicamente adequadas, apresentam custo de aquisição e implantação da ordem de alguns milhares de reais por ponto de medição, patamar que inviabilizaria economicamente a replicação da solução para o conjunto de estações da rede. Diante dessa constatação, optou-se pelo desenvolvimento de solução própria, cujo custo final estimado de implantação situa-se na faixa de duas a três centenas de reais por ponto de medição, valor compatível com a escala de replicação pretendida.

2.2 Fundamentação teórica

2.2.1 Gestão de recursos hídricos em infraestruturas de transporte público

A gestão eficiente da água em edificações públicas e sistemas de transporte de passageiros é reconhecida internacionalmente como componente relevante da sustentabilidade urbana. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 6 (ODS 6) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas estabelece, entre suas metas, o aumento substancial da eficiência do uso da água em todos os setores até 2030, incluindo a redução das perdas e do desperdício em atividades econômicas e institucionais (ONU, 2015; IPEA, 2024). No contexto brasileiro, a Lei nº 13.303/2016, que dispõe sobre o estatuto jurídico das empresas estatais, reforça a exigência de eficiência na gestão de recursos e de observância de práticas de sustentabilidade por



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

parte de companhias de capital público, o que inclui a racionalização do consumo de insumos como energia e água (BRASIL, 2016).

Iniciativas de telemetria hídrica aplicadas a grandes complexos edificadas têm demonstrado que o monitoramento remoto contínuo, associado a alertas automáticos, reduz de forma significativa o tempo de detecção de vazamentos em comparação à leitura manual periódica, o que se traduz em economia direta de água e de recursos financeiros (SEMTECH, [s.d.]). Este trabalho se insere nessa linha de aplicação, adaptando-a às particularidades operacionais de um sistema metroferroviário, ambiente caracterizado por instalações distribuídas geograficamente, presença de estruturas subterrâneas e restrições de acesso decorrentes da operação contínua do sistema.

2.2.2 Tecnologia de sensoriamento de vazão por efeito Hall

Sensores de vazão baseados em efeito Hall utilizam um rotor interno que gira proporcionalmente à velocidade do fluido em escoamento; um ímã acoplado ao rotor induz pulsos elétricos captados por um sensor de efeito Hall, cuja frequência é proporcional à vazão instantânea. Trata-se de tecnologia amplamente empregada em aplicações de medição de fluidos de baixo custo, por não possuir partes eletrônicas em contato direto com o fluido e por apresentar boa relação entre precisão, robustez e custo de aquisição, características que a tornam adequada a implantações distribuídas em grande número de pontos de medição.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

2.2.3 Redes de longo alcance e baixo consumo (LoRa/LoRaWAN) aplicadas à gestão hídrica

O protocolo LoRa (Long Range) e o padrão de rede LoRaWAN foram desenvolvidos para aplicações de Internet das Coisas que demandam longo alcance de comunicação associado a baixíssimo consumo energético, características que os tornam adequados a implantações de telemetria distribuída em ambientes com infraestrutura de rede limitada. Soluções comerciais de telemetria hídrica baseadas nesse protocolo já são empregadas em aplicações de medição de consumo, monitoramento de qualidade da água e detecção de vazamentos (SEMTECH, [s.d.]).

Foi escolhida a adoção de uma arquitetura mestre-escravo baseada em LoRa, devido a uma limitação de infraestrutura observada em campo: os pátios de estacionamento e manutenção de trens não possuem, em geral, edificações de apoio nas proximidades onde seria possível instalar facilmente um ponto de rede ou roteador Wi-Fi capaz de transmitir diretamente os dados do dispositivo medidor ao banco de dados central. Por permitir comunicação sem fio de longo alcance, a tecnologia LoRa possibilita que o dispositivo medidor instalado em um pátio de trens envie os dados via rádio a um dispositivo coordenador instalado em um prédio administrativo ou de apoio, ainda que este esteja localizado a uma distância considerável do ponto de medição — da ordem de centenas de metros a cerca de um quilômetro. Por estar instalado dentro de uma



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

edificação, o dispositivo coordenador tem acesso facilitado à rede Wi-Fi administrativa, viabilizando o encaminhamento dos dados ao banco de dados central.



Figura 1 – Dispositivo medidor sendo desenvolvido em laboratório. Fonte: Arquivo Pessoal

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO

3.1 Arquitetura geral do sistema

A solução desenvolvida é composta por três classes de componentes: (i) sensores de vazão de efeito Hall, instalados diretamente na tubulação hidráulica junto aos pontos de medição de interesse; (ii) dispositivos medidores, baseados em microcontrolador



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de baixo custo com módulo de comunicação de longo alcance, responsáveis pela leitura dos pulsos do sensor, pelo processamento local do sinal e pelo envio periódico dos dados; e (iii) um dispositivo coordenador, também baseado em microcontrolador, responsável por receber os dados de todos os medidores de uma mesma instalação e encaminhá-los à rede administrativa da companhia para armazenamento em banco de dados centralizado.



Figura 2 – protótipo de dispositivo coordenador. Fonte: Arquivo Pessoal

Cada dispositivo medidor e o dispositivo coordenador possuem identificação única por meio de código numérico, o que permite rastreabilidade individual dos dados na base



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

centralizada e facilita a expansão futura do sistema para múltiplos pontos de medição por estação e para múltiplas estações da rede.

Além da arquitetura mestre-escravo via LoRa descrita acima, e conforme os desafios de alcance detalhados na Seção 3.7, foram desenvolvidas e testadas em campo duas arquiteturas alternativas: um dispositivo repetidor LoRa (Figura 3), mais indicado a pátios e a áreas com poucos obstáculos, e um dispositivo medidor com comunicação cabeada direta ao servidor (Figura 4), que elimina o problema de alcance da comunicação sem fio ao custo de maior complexidade de instalação.



Figura 3 – Dispositivo repetidor instalado na estação piloto. Fonte: Arquivo Pessoal



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 4 – Dispositivo medidor cabeado sendo testado em laboratório. Fonte: Arquivo Pessoal

3.2 Pontos de medição do piloto

No piloto implantado, foram definidos dois pontos de medição complementares em uma estação operacional: um sensor de vazão de menor diâmetro nominal, instalado junto ao hidrômetro geral da estação, e um segundo sensor de maior diâmetro nominal, instalado no reservatório elevado ("castelo d'água") que alimenta a rede hidráulica da estação. Essa configuração permite comparar o consumo medido no ponto de entrada da rede com o consumo medido no ponto de distribuição interna, possibilitando a identificação de discrepâncias entre os dois pontos como indício adicional de vazamento em trechos intermediários da rede hidráulica.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 5 – protótipo de dispositivo medidor instalado na estação piloto. Fonte: Arquivo Pessoal

Durante a fase de instalação, verificou-se, por meio de inspeção de campo, que a instalação do sensor de menor diâmetro imediatamente após o hidrômetro geral poderia reduzir a pressão hídrica necessária ao funcionamento adequado do sistema de irrigação da área ajardinada da estação. Diante dessa constatação, o dimensionamento do sensor nesse ponto foi revisado para um diâmetro nominal maior, compatibilizando a medição de vazão com a preservação da pressão de operação dos demais subsistemas hidráulicos da estação. Esse ajuste ilustra um aspecto metodológico relevante do processo: a necessidade de validação em campo das premissas de projeto elaboradas em laboratório, e a flexibilidade da arquitetura



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

proposta para acomodar tais ajustes sem alteração da lógica de aquisição e comunicação de dados.

Em fase de expansão do piloto, foi avaliada a instalação de um segundo sensor no mesmo reservatório elevado, no trecho que interliga o reservatório principal da plataforma ao reservatório do castelo d'água, com o objetivo de segmentar ainda mais a medição e aumentar a granularidade espacial do diagnóstico de consumo.

3.3 Infraestrutura elétrica e de comunicação

A alimentação elétrica dos dispositivos foi projetada a partir do quadro de distribuição já existente na sala técnica da estação, por meio da instalação de um disjuntor dedicado de 10 A e de circuito independente em cabo de 2,5 mm², dimensionado para o consumo máximo conjunto dos dispositivos, da ordem de poucos watts, o que evidencia a baixa demanda energética da solução e sua compatibilidade com infraestruturas elétricas já instaladas, sem necessidade de reforço de capacidade. O encaminhamento dos cabos entre o quadro de alimentação e os pontos de instalação dos sensores foi executado por eletrodutos aparentes, com pontos de tomada dedicados posicionados próximos a cada sensor, de forma a minimizar a extensão de cabeamento exposto e facilitar a manutenção futura.

A comunicação entre o dispositivo coordenador e a rede administrativa da companhia foi estabelecida, na fase piloto, por meio da rede sem fio já disponível na estação, o



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

que reduziu a necessidade de infraestrutura de cabeamento de dados adicional. Identificou-se, contudo, que a replicação da solução para o conjunto da rede de estações poderá exigir a disponibilização de rede sem fio dedicada ou infraestrutura de rede cabeada complementar, item que compõe as recomendações de continuidade apresentadas na Seção 4.4. Conforme detalhado na Seção 3.7, a alternativa de dispositivo medidor cabeado, com comunicação direta por cabo de rede, já foi testada em campo como solução complementar para os pontos de medição em que a comunicação via LoRa se mostra inviável em razão de obstáculos construtivos.

3.4 Aquisição, armazenamento e redundância de dados

Os dados de vazão são amostrados pelos dispositivos medidores e consolidados em registros com granularidade de 15 minutos, período considerado adequado para captar tanto padrões de uso ao longo do dia quanto desvios de consumo relevantes para fins de detecção de vazamento, sem gerar volume de dados excessivo para o processamento e a visualização. Cada dispositivo medidor e o dispositivo coordenador possuem cartão de memória local, que armazena os registros de forma redundante à transmissão em rede, garantindo a preservação dos dados mesmo em caso de interrupção temporária de comunicação ou de energia elétrica — cenário considerado relevante em ambiente operacional sujeito a manutenções programadas e eventuais falhas de infraestrutura.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Os dados consolidados são disponibilizados em plataforma de supervisão para visualização e análise, detalhada na Seção 3.5.

3.5 Plataforma de supervisão e visualização de dados

Foi desenvolvida uma plataforma de supervisão para visualização dos dados coletados, que permite ao usuário selecionar o ponto de medição de interesse e a granularidade temporal de exibição do consumo — em intervalos de 15 minutos, hora, dia, mês ou ano —, conforme o nível de detalhe requerido pela análise pretendida. Além da visualização em forma de gráfico, os dados podem ser exibidos em formato de planilha, e todas as informações apresentadas podem ser exportadas em formato de imagem, planilha eletrônica (Excel) ou documento PDF, para uso em relatórios e apresentações institucionais.

A plataforma também disponibiliza indicadores de qualidade operacional do sistema de aquisição de dados: o atraso no envio de cada registro, calculado pela comparação entre o timestamp da medição e o timestamp de recebimento do pacote pelo banco de dados central, e a ocorrência de erros de leitura do cartão de memória (cartão SD) de cada dispositivo, os quais podem indicar a existência de um defeito no equipamento de campo.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

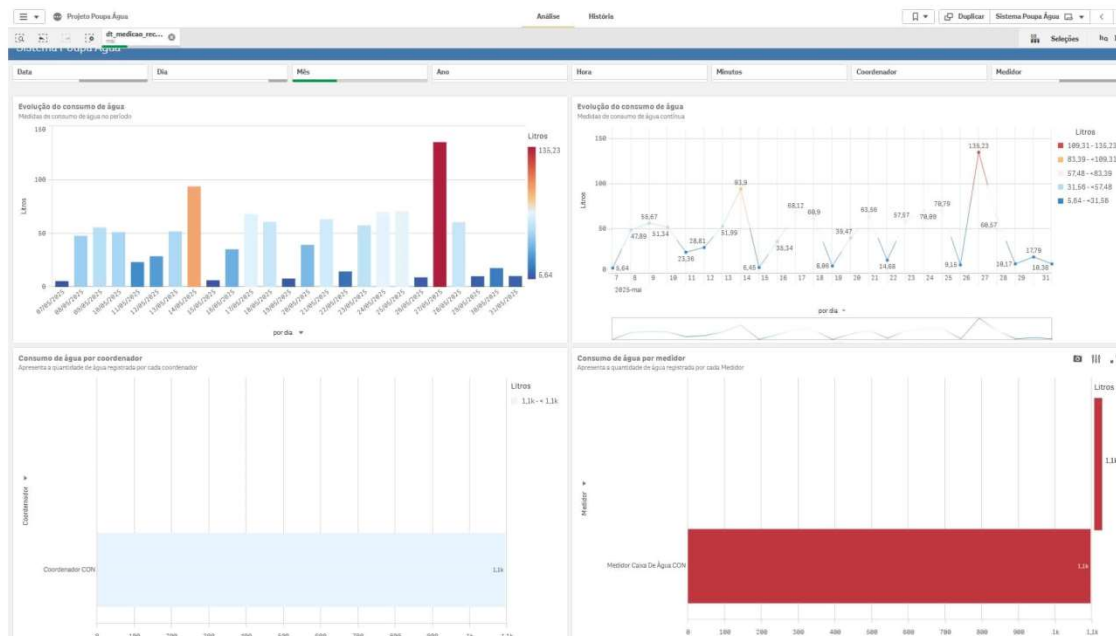


Figura 6 – Tela do supervisor mostrando o consumo diário da estação de teste.
Fonte: Arquivo Pessoal

3.6 Mecanismo de alerta automático

Foi implementado um mecanismo de alerta automático por e-mail, acionado quando o consumo diário de um determinado ponto de medição supera em mais de 30% a média móvel de consumo dos sete dias anteriores. Esse parâmetro foi definido como forma de equilibrar sensibilidade de detecção — evitando falsos negativos em vazamentos de vazão moderada — e especificidade — evitando alertas excessivos motivados por variações normais de uso, como picos de limpeza ou de irrigação programada. O parâmetro de 30% pode ainda ser ajustado individualmente para cada ponto de monitoramento, conforme a experimentação empírica indicar necessidade



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de maior ou menor sensibilidade em função do perfil de consumo específico daquele ponto. A memória de cálculo com a formulação matemática do indicador de alerta consta do Anexo A.

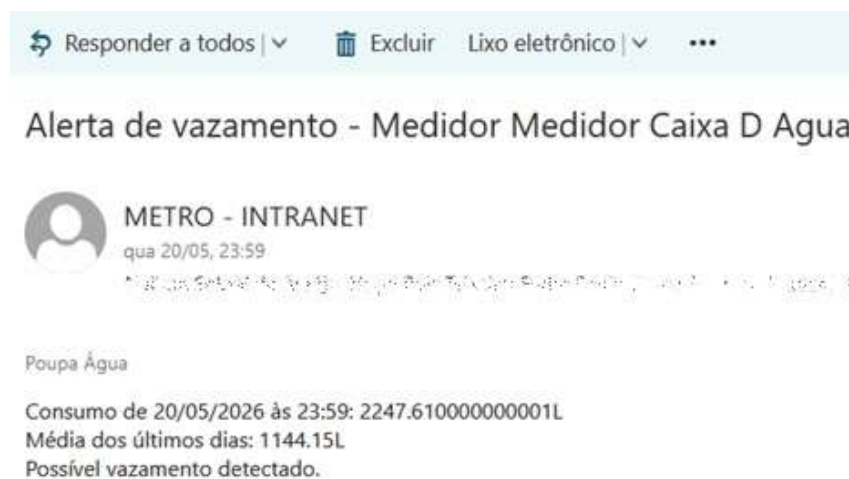


Figura 7 – Alerta automático via email. Fonte: Arquivo Pessoal

3.7 Síntese do referencial e lacunas identificadas em campo

A literatura consultada demonstra maturidade tecnológica suficiente para a aplicação de sensoriamento de vazão baseado em efeito Hall associado a redes LoRa em contextos de gestão hídrica predial e urbana. Contudo, a experimentação em campo revelou duas lacunas relevantes, não antecipadas na fase de concepção do projeto, que condicionaram diretamente as escolhas de arquitetura da solução.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A primeira lacuna refere-se ao alcance efetivo da comunicação via LoRa em ambientes com alvenaria. Testes em campo aberto, sem obstáculos entre os dispositivos, alcançaram distâncias de comunicação de até 2 km, patamar mais do que suficiente para os pontos de medição instalados em pátios de trens. Contudo, ao testar a comunicação no interior de estações, onde há paredes de concreto entre os dispositivos, a distância efetiva de comunicação caiu para menos de 20 metros na presença de apenas duas paredes, reduzindo-se ainda mais a cada parede adicional interposta entre o medidor e o coordenador. Essa limitação motivou o desenvolvimento e o teste de duas soluções alternativas: (i) um dispositivo repetidor, também baseado em protocolo LoRa, capaz de ampliar a distância de comunicação efetiva mesmo na presença de paredes, mas que, nos testes realizados, acarretou aumento do atraso no envio de pacotes e da taxa de perda de pacotes, podendo demandar mais de um repetidor em estações com grande número de paredes interpostas — situação típica de estações subterrâneas; e (ii) um dispositivo medidor alternativo, com comunicação por cabo de rede diretamente ao servidor/banco de dados, o que elimina a necessidade do dispositivo coordenador e, por consequência, o problema de alcance de comunicação, mas exige a instalação de infraestrutura de cabeamento de rede até cada ponto de medição. Diante desses resultados, a solução em avaliação combina as duas arquiteturas conforme o ambiente de instalação: arquitetura mestre-escravo via LoRa para os pontos de medição localizados em pátios



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

de trens, e dispositivo medidor cabeado para os pontos de medição localizados no interior de estações.

A segunda lacuna identificada refere-se à faixa de operação (range) dos sensores de vazão de efeito Hall utilizados. O sensor de 20 mm de diâmetro nominal apresenta faixa de medição entre 1 e 30 litros por minuto, enquanto o sensor de 50 mm apresenta faixa entre 10 e 200 litros por minuto. Vazões abaixo do limite inferior dessas faixas resultam em medição imprecisa ou, em alguns casos, na perda completa do sinal de medição; no caso do sensor de 50 mm, mesmo a vazão de uma torneira aberta pode situar-se abaixo do limite mínimo de detecção do sensor. Foi avaliada a utilização de sensores ultrassônicos como alternativa a essa limitação, mas os modelos disponíveis no mercado consultados apresentaram faixas de operação semelhantes às dos sensores de efeito Hall, não solucionando a lacuna identificada. A solução sendo avaliada atualmente consiste em utilizar vários pontos de medição para identificar possíveis inconsistências.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Desempenho da infraestrutura implantada

A implantação da infraestrutura de campo do piloto foi executada em duas etapas complementares, com investimento total da ordem de poucas centenas de reais, valor compatível com o requisito de projeto de baixo custo de implantação estabelecido na



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Seção 2.1. A primeira etapa contemplou a instalação do circuito elétrico dedicado, do eletrodutamento, dos pontos de tomada e das conexões hidráulicas necessárias à fixação dos sensores; a segunda etapa, decorrente da expansão do piloto para um segundo ponto de medição no reservatório elevado, teve custo unitário significativamente inferior, o que indica economia de escala relevante para a replicação da solução em pontos adicionais de uma mesma estação e, por extensão, em novas estações da rede.

O processo de viabilização da infraestrutura evidenciou um resultado não estritamente técnico, mas relevante para a gestão do projeto: a coordenação entre a equipe de desenvolvimento tecnológico e as áreas de manutenção predial e elétrica responsáveis pela execução de obras de pequeno porte demandou tramitação administrativa interna de duração considerável, em razão da necessidade de verificação de viabilidade técnica, aprovação orçamentária e disponibilidade de itens em contratos de manutenção vigentes. Esse resultado constitui um aprendizado organizacional relevante: a escalabilidade de soluções de baixo custo desenvolvidas internamente depende não apenas da maturidade técnica da solução, mas também da agilidade dos processos internos de execução de obras associadas, o que reforça a relevância de se avaliarem modelos de cooperação técnica com instituições parceiras para a execução de etapas de implantação em campo, permitindo que a equipe de desenvolvimento tecnológico concentre esforços na engenharia da solução.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4.2 Desempenho da comunicação via rádio e soluções alternativas

Os testes de comunicação em campo confirmaram a limitação de alcance identificada na Seção 3.7: em ambiente aberto, sem obstáculos, a comunicação entre o dispositivo medidor e o coordenador manteve-se estável a distâncias de até 2 km, patamar adequado aos pontos de medição instalados em pátios de trens. Já nos pontos de medição instalados no interior de estações, a presença de paredes de concreto reduziu drasticamente o alcance efetivo, chegando a menos de 20 metros com apenas duas paredes interpostas entre os dispositivos. A introdução de um dispositivo repetidor LoRa ampliou o alcance efetivo de comunicação nesses ambientes, mas às custas de maior atraso no envio dos pacotes de dados e de maior taxa de perda de pacotes, o que limita sua aplicabilidade a estações com poucos obstáculos ou torna necessário o uso de múltiplos repetidores em estações com grande número de paredes, como é o caso típico de estações subterrâneas. Como alternativa, a solução de dispositivo medidor com comunicação cabeada mostrou-se satisfatória do ponto de vista de confiabilidade de comunicação, eliminando por completo o problema de alcance, ainda que a um custo e a uma complexidade de instalação adicionais, decorrentes da necessidade de infraestrutura de cabeamento de rede até cada ponto de medição.

4.3 Confiabilidade e resiliência do sistema

A arquitetura de redundância local de dados, por meio de cartão de memória em cada dispositivo, mostrou-se um mecanismo de resiliência adequado ao ambiente



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

operacional metroferroviário, no qual interrupções pontuais de energia e de comunicação sem fio podem ocorrer em decorrência de atividades de manutenção programada. A granularidade de 15 minutos revelou-se suficiente para identificar tanto o perfil diário típico de consumo — com picos associados a rotinas de limpeza e a períodos de maior fluxo de usuários — quanto eventuais desvios pontuais de consumo compatíveis com pequenos vazamentos intermitentes.

Ainda em fase inicial de testes, o sistema demonstrou capacidade de detecção de anomalias que ilustram seu valor prático. Em um dos casos, foi identificado um vazamento que não era perceptível a olho nu, evidenciado por um padrão de consumo incompatível com o esperado para o período observado.



Figura 8 – Vazamento subterrâneo detectado na estação piloto com a ajuda dos dados obtidos. Fonte: Arquivo Pessoal



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Em outro caso, o sistema revelou uma não conformidade na instalação hidráulica de um dos pontos monitorados: o projeto hidráulico previa que a água fluísse do hidrômetro para o reservatório subterrâneo e, deste, para a caixa d'água elevada, mas a instalação executada conduzia a água diretamente do hidrômetro para a caixa, sem passar pelo reservatório subterrâneo. Essa não conformidade foi identificada porque o dispositivo medidor instalado no trecho teoricamente responsável por conduzir a água do reservatório à caixa, não registrou nenhuma alteração nos padrões de medição, quando o comportamento esperado seria de grandes volumes registrados nos momentos de acionamento das bombas do reservatório, e consumo nulo nos demais períodos. Esses dois casos demonstram que o sistema, além de subsidiar a gestão do consumo hídrico, pode atuar como ferramenta auxiliar de diagnóstico de não conformidades na própria infraestrutura hidráulica das instalações.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

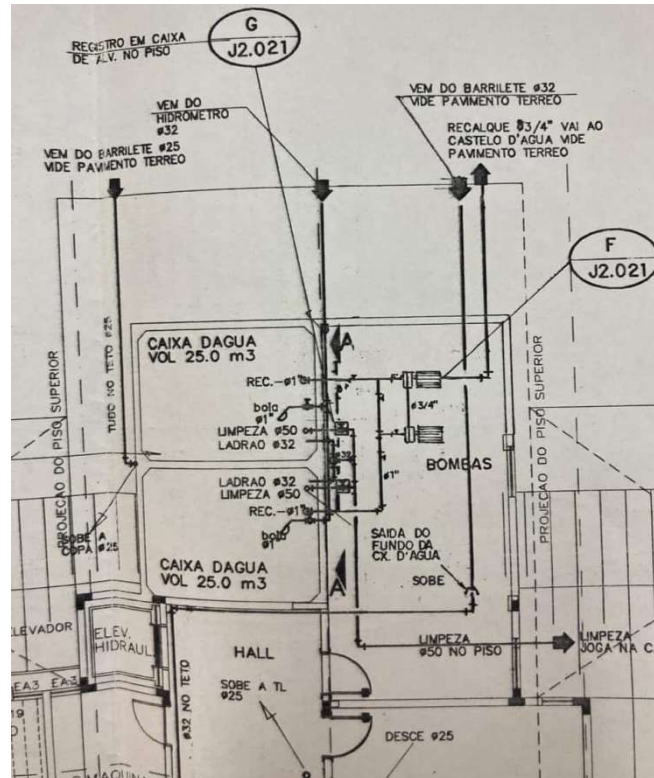


Figura 9 – Trecho do diagrama hidráulico da estação piloto, mostrando que a água deveria vir do hidrômetro para o reservatório subterrâneo, e deste para a caixa d'água elevada. Fonte: Arquivo Pessoal

4.4 Discussão sobre escalabilidade e replicabilidade

Os resultados obtidos no piloto indicam viabilidade técnica e operacional para a replicação da solução em outras estações da rede metroferroviária estudada e, por extensão, em outras companhias operadoras de sistemas de transporte sobre trilhos com perfil de instalações semelhante. O baixo custo de implantação por ponto de medição e a baixa demanda energética dos dispositivos reduzem as barreiras de entrada para a expansão da solução. Os principais fatores condicionantes identificados



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

para a replicação em escala foram: (i) a necessidade de compatibilizar, conforme o ambiente de instalação, a arquitetura sem fio via LoRa — adequada a pátios e áreas abertas — com a arquitetura cabeada — mais adequada ao interior de estações com grande número de paredes; e (ii) a necessidade de fluxos administrativos ágeis para a execução das pequenas obras de infraestrutura elétrica e hidráulica associadas a cada novo ponto de medição, preferencialmente por meio de parcerias técnicas que ampliem a capacidade de execução da equipe responsável pelo desenvolvimento da solução.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a solução contribui diretamente para as metas de eficiência no uso da água preconizadas pelo ODS 6 e para a racionalização de recursos exigida de companhias estatais pela Lei nº 13.303/2016, ao viabilizar a detecção precoce de vazamentos e de não conformidades de instalação, e a gestão orientada a dados do consumo hídrico institucional.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação em campo de um sistema de sensoriamento remoto de baixo custo para monitoramento do consumo de água em instalações de um operador metroferroviário, combinando sensores de vazão de efeito Hall, dispositivos de aquisição de dados com comunicação de longo alcance e



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

baixo consumo energético, e um mecanismo automático de alerta por desvio estatístico de consumo.

Os objetivos específicos estabelecidos foram atendidos: a solução mediu a vazão com granularidade de 15 minutos, adequada à identificação de padrões de uso; incorporou redundância local de dados que garante resiliência a falhas de comunicação e energia; disponibilizou visualização de dados que subsidia estratégias de racionamento; e implementou mecanismo automático de alerta para detecção precoce de discrepâncias de consumo compatíveis com vazamentos e com não conformidades de instalação.

Como contribuição técnica, o trabalho demonstra a viabilidade de uma arquitetura de sensoriamento hídrico de baixo custo especificamente adaptada às particularidades de infraestrutura de sistemas metroferroviários, incluindo a identificação e o tratamento de lacunas práticas — alcance de comunicação em ambientes com alvenaria e faixa de operação dos sensores de vazão — não evidenciadas a priori pela literatura consultada. Como contribuição de gestão, o trabalho evidencia a importância de processos administrativos ágeis — inclusive por meio de parcerias técnicas — para viabilizar a escala de soluções de inovação desenvolvidas internamente por equipes de pesquisa e desenvolvimento de operadores de transporte público.

Como limitações do estudo, destacam-se o número reduzido de pontos de medição avaliados no período coberto por este trabalho e a implantação restrita, até o



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

momento, a uma única estação piloto, o que limita a generalização estatística dos padrões de consumo identificados. Como trabalhos futuros, recomenda-se: a expansão da solução para a totalidade das estações e pátios da rede estudada, combinando as arquiteturas sem fio e cabeada conforme o ambiente de instalação; a integração dos dados de consumo hídrico com outros sistemas de gestão predial e energética já existentes na companhia; a avaliação de modelos preditivos de consumo e de detecção de anomalias com maior sofisticação estatística; e o aprofundamento de modelos de cooperação técnica com instituições de ensino e pesquisa para ampliar a capacidade de execução de projetos de inovação de baixo custo no setor metroferroviário.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei nº 13.303, de 30 de junho de 2016. Dispõe sobre o estatuto jurídico da empresa pública, da sociedade de economia mista e de suas subsidiárias, no âmbito da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). ODS 6 – Água Potável e Saneamento. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília: Ipea, 2024. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

SEMTECH CORPORATION. Smart Water Metering with LoRa Technology. [S.l.]: Semtech, [s.d.]. Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-water-metering>.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ANEXO A — MEMÓRIA DE CÁLCULO

A.1 Conversão de pulsos do sensor em vazão

Os sensores de vazão de efeito Hall utilizados geram um trem de pulsos cuja frequência (f , em Hz) é proporcional à vazão instantânea (Q , em litros por minuto), segundo a relação:

$$Q = f / K$$

Onde K é a constante de calibração do sensor (pulsos por litro), fornecida pelo fabricante e validada em bancada de calibração antes da instalação em campo. Os dispositivos medidores realizam a leitura dos pulsos em intervalos de 10 segundos; o volume acumulado nesses intervalos é somado internamente ao longo do período de agregação de 15 minutos, sendo esse valor consolidado o efetivamente transmitido e registrado no banco de dados central.

A.2 Cálculo da média móvel de 7 dias e do limiar de alerta

Seja $C(d)$ o consumo total registrado no dia d , em litros. A média móvel de consumo dos 7 dias anteriores ao dia d é calculada como:

$$M(d) = [C(d-1) + C(d-2) + \dots + C(d-7)] / 7$$

O alerta automático é acionado quando o consumo do dia corrente $C(d)$ satisfaz a condição:



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

$$C(d) > 1,30 \times M(d)$$

ou seja, quando o consumo diário supera em mais de 30% a média móvel dos sete dias anteriores. O limiar de 30% corresponde ao parâmetro padrão do sistema e foi definido empiricamente a partir da variabilidade natural observada no consumo diário durante o período inicial de calibração, podendo ser ajustado individualmente para cada ponto de monitoramento sempre que a experimentação empírica indicar a necessidade de maior ou menor sensibilidade de detecção.

A.3 Estimativa de economia hídrica

A estimativa de economia potencial associada à detecção precoce de vazamentos é calculada pela diferença entre o volume que seria consumido em um cenário de detecção tardia (leitura manual mensal) e o volume efetivamente consumido sob o regime de detecção automática, multiplicada pela tarifa de água e esgoto vigente para a categoria de consumo institucional, conforme a seguinte formulação geral:

$$Economia (R\$) = (Vol.tardio - Vol.automático) \times Tarifa (R\$/m^3)$$

Os valores de referência para Vol.tardio e Vol.automático devem ser apurados a partir da série histórica de consumo e dos registros de ocorrência de vazamento detectados pelo sistema, atualizados periodicamente conforme a evolução da base de dados do piloto.