SISTEMAS EMBARCADOS DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE SANEAMENTO

André Luis Céspedes da Silva[(1)]
Doutorando em Biotecnologia, Universidade de São Paulo (USP). Pesquisador Associado, Centro de Pesquisa Aplicada em Sustentabilidade Hídrica e Gestão de Recursos Ambientais (CEHIGERA).
Aldo Ivan Céspedes Arce[(2)]
Especialista de Laboratório, Departamento de Ciências Básicas, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Universidade de São Paulo (FZEA USP).
Matheus Hansen Paes[(3)]
Mestre em Ciências, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Universidade de São Paulo. Pesquisador Associado, Centro de Pesquisa Aplicada em Sustentabilidade Hídrica e Gestão de Recursos Ambientais (CEHIGERA).
Rogério Augusto de Caldas Ayres Estácio [(4)]
Pesquisador Associado, Centro de Pesquisa Aplicada em Sustentabilidade Hídrica e Gestão de Recursos Ambientais (CEHIGERA).
Ernane José Xavier Costa[(5)]
Professor Titular, Departamento de Ciências Básicas, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos. Universidade de São Paulo (FZEA USP). Pesquisador Responsável, Centro de Pesquisa Aplicada em Sustentabilidade Hídrica e Gestão de Recursos Ambientais (CEHIGERA).

Endereço[(1)]**:** R. Duque de Caxias, 225, Colônia dos Mestres, Casa 9 - Jardim Elite - Pirassununga – SP – CEP: 13635-900 - Brasil - Tel: +55 (19) 3565-4511 - e-mail: andre.cespedes.silva@usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma rede de sistemas embarcados sem fio integrada a um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para o monitoramento de parâmetros críticos no setor de saneamento. A arquitetura proposta utiliza microcontroladores ESP32 para coleta de dados e o protocolo MQTT para comunicação de baixa latência, enquanto o sistema supervisório foi implementado em Python com o framework Django e banco de dados MySQL. Adotou-se o conceito de Edge Computing para descentralizar o processamento por meio de brokers locais em Raspberry Pi 3, garantindo a resiliência operacional. O hardware foi confeccionado por fresagem de precisão e integra módulos GSM/GPRS para áreas remotas. No ensaio de calibração, obteve-se um coeficiente de determinação R^2 de 0,9984. A viabilidade técnica foi validada com a instalação bem-sucedida de 10 protótipos em ambiente industrial real no município de Pirassununga-SP.

PALAVRAS-CHAVE: IIoT, Telemetria de processos, Edge Computing.

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos exercem papel fundamental no desenvolvimento econômico, ambiental e social do Brasil. Diante de crises hídricas recorrentes, o país enfrenta o desafio constante de assegurar tanto a qualidade quanto a disponibilidade desse recurso para o abastecimento humano, atividades industriais e produção agrícola (Torres et al., 2025). Diante disso, a aplicação de sistemas eficazes de monitoramento das redes de distribuição é essencial para subsidiar uma correta gestão hídrica.

De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento [SNIS] (2022), aproximadamente 84,9% da população brasileira possui acesso à rede de água tratada, enquanto apenas 56,0% é atendida pela coleta de esgoto. A precariedade na coleta e no tratamento de efluentes impacta diretamente os corpos d'água superficiais e subterrâneos, ocasionando contaminações e elevando a incidência de enfermidades gastrointestinais e parasitárias de veiculação hídrica, como a giardíase e a febre tifoide. Adicionalmente, a utilização de água de baixa qualidade na irrigação agrícola eleva os riscos sanitários para trabalhadores rurais e consumidores finais (Lazzaretti, 2012).

O Novo Marco Regulatório do Saneamento (Lei n.º 11.445/2007, atualizada pela Lei nº 14.026/2020) estabelece diretrizes nacionais estritas para o setor, determinando a universalização dos serviços e o acesso transparente e

informatizado a dados de interesse social relativos à qualidade da água potável e ao esgotamento sanitário (Brasil, 2020). Contudo, de acordo com Quilici (2024), a distribuição hídrica nacional enfrenta barreiras operacionais severas, registrando índices médios de perdas na ordem de 40% causados por vazamentos ocultos, fraudes, obsolescência das redes e ineficiências nos processos de armazenamento e distribuição. Sob a perspectiva de monitoramento, apenas 33,2% dos municípios realizam o acompanhamento de dados hidrológicos, ferramentas essenciais para épocas de secas extremas ou inundações (SNIS, 2022).

A consolidação da Indústria 4.0 introduziu conceitos de automação industrial aplicáveis ao saneamento, pautados na interoperabilidade, transparência da informação e descentralização de tomadas de decisão. A interoperabilidade atua permitindo a integração harmônica entre dispositivos de campo (sensores de pH, turbidez, condutividade e nível) e operadores na central, otimizando o uso de insumos químicos e reduzindo desperdícios em tempo real (Oliveira e Santos, 2022).

Segundo Lu Y. (2021), para viabilizar essa arquitetura em locais com infraestrutura de rede instável, os modelos de computação distribuída, como o *Edge Computing*, destacam-se ao processar informações críticas na periferia do sistema, diminuindo o tempo de resposta e garantindo resiliência operacional contra falhas severas de conectividade.

Diante desse contexto, é fundamental o desenvolvimento de soluções tecnológicas de baixo custo para aprimorar a coleta de dados hidrológicos e a automação de processos, desde a captação de água até o tratamento de efluentes.

OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho consiste em projetar, construir e validar em campo uma rede de sistemas embarcados sem fio de baixo custo, baseada em Internet das Coisas Industrial (IIoT) e Edge Computing, integrada a uma plataforma supervisória web do tipo Sistema de Apoio à Decisão (SAD), voltada ao monitoramento contínuo de variáveis físico-químicas de processo e níveis de reservatórios em estações de tratamento de água e esgoto.

METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa pautou-se na Pesquisa Experimental, focada na construção de protótipos funcionais de hardware e software para avaliação prática de viabilidade técnica e estatística. Inicialmente, realizaram-se visitas técnicas ao Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga (SAEP) visando o levantamento situacional e a análise de sistemas legados que pudessem ser reaproveitados.

Para orientar o desenvolvimento técnico do software elaborou-se um documento formal de requisitos com base no *know-how* dos operadores locais, utilizando notação alfanumérica para os níveis de criticidade: Essencial, Importante e Desejável (Wazlawick, 2007).

As Tabelas 1 e 2 detalham as especificações dos Requisitos Funcionais (RF) e Não Funcionais (NF) estabelecidos para o projeto.

Tabela 1 - Relação de Requisitos Funcionais (RF) do sistema de telemetria

Identificador	Prioridade	Nome	Descrição
RF01	Essencial	Nível dos reservatórios	Visualização em tempo real dos níveis dos reservatórios de água, contendo a porcentagem, a intensidade do sinal de comunicação e a hora da última atualização.
RF02	Essencial	Processos de tratamento	Visualização em tempo real das variáveis de processo, contendo a unidade de engenharia, a intensidade do sinal de comunicação e a hora da última atualização.

RF03	Importante	Gráfico histórico	Visualização de gráfico histórico contendo filtros de datas e horários.
RF04	Desejável	Exportação de Dados	Exportação de dados conforme os parâmetros dos filtros selecionados, preferencialmente em formato ".csv".
RF05	Essencial	Gerenciamento de Alarmes	O sistema deve disparar notificações visuais e sonoras quando o nível de um reservatório estiver abaixo de 40%.
RF06	Desejável	Relatórios de desempenho	Geração de relatórios periódicos consolidando as médias, máximos e mínimos das variáveis de processo.
RF07	Importante	Monitoramento de Status de Rede	Exibição de um painel de diagnóstico indicando o status de conexão de cada nó de sensoriamento remoto.
RF08	Desejável	API de Integração	API para importação/exportação de dados

Fonte: elaboração própria.

Tabela 2 - Relação de Requisitos Não Funcionais (NF) de qualidade técnica

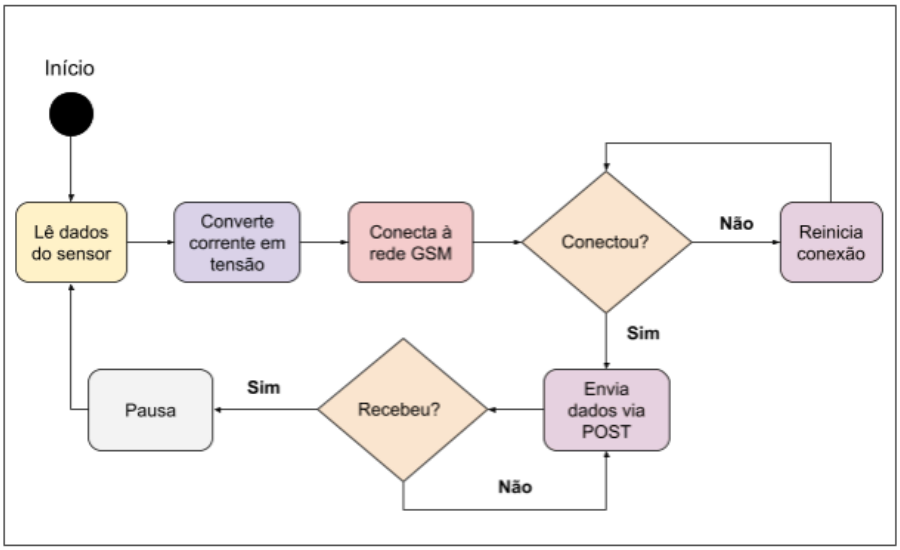
Identificador	Prioridade	Nome	Descrição
NF01	Essencial	Disponibilidade	O sistema deve operar de forma ininterrupta.
NF02	Importante	Tempo de resposta	O atraso entre a leitura do sensor e a exibição no dashboard não deve exceder 30 segundos.
NF03	Essencial	Segurança de acesso	O sistema deve conter criptografia (SSL/TLS) para proteção dos dados operacionais e controle de acesso.
NF04	Importante	Escalabilidade	A arquitetura deve permitir a integração de novos sensores sem necessidade de reestruturação do código-fonte.
NF05	Desejável	Usabilidade	A interface de monitoramento deve ser responsiva, permitindo a visualização clara de alertas e níveis em dispositivos móveis e desktops.

Fonte: elaboração própria.

Para assegurar a persistência, integridade e escalabilidade do volume de dados gerados pelo sistema, adotou-se o Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) MySQL. A escolha do MySQL justifica-se por sua conformidade com as propriedades ACID (Atomicidade, Consistência, Isolamento e Durabilidade), garantindo que as coletas de dados dos sensores sejam armazenadas de forma confiável. A solução foi implementada em um ambiente de servidor remoto sob o sistema operacional Windows Server 2016, garantindo alta disponibilidade para a camada de dados. A escolha do modelo relacional justifica-se pela robustez no suporte a consultas complexas via linguagem SQL, permitindo operações de agregação e filtragem necessárias para a geração de relatórios gerenciais e análises históricas. Essa estrutura provê o suporte analítico indispensável ao processo de tomada de decisão operacional, conforme ilustrado no fluxo de processamento do protótipo (Figura 1).

Desenvolveu-se um sistema supervisório do tipo Sistema de Apoio à Decisão (SAD), também conhecido como Decision Support Systems (DSS). Este sistema consiste na integração entre pessoas, tecnologias e informações, atuando sobre o nível tático (intermediário) de gerência e auxiliando na tomada de decisões complexas (Laudon, 2023).

Figura 1 - Fluxo de aquisição de dados



Fonte: elaboração própria.

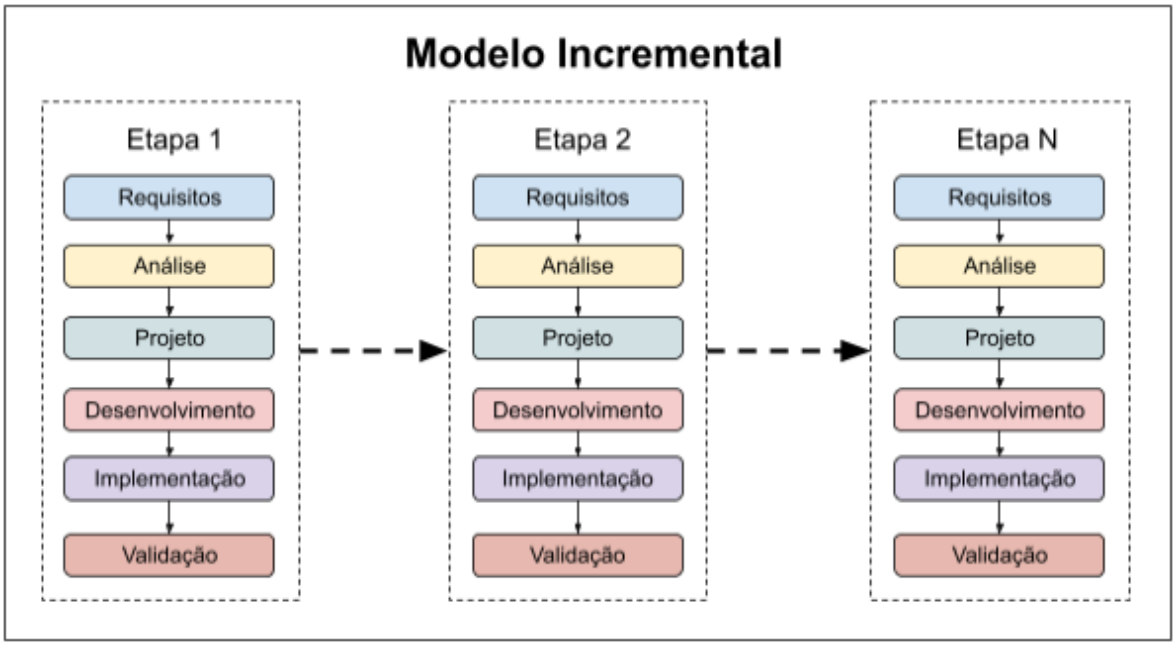
O sistema supervisório web foi desenvolvido em Python com o framework Django. A camada de conectividade de dados foi estruturada utilizando o protocolo de transporte leve MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), ideal devido ao seu reduzido consumo de largura de banda.

A topologia adotou o modelo publish/subscribe onde os nós de sensoriamento embarcados em campo atuam estritamente como publishers, postando dados estruturados em tópicos específicos, enquanto o WebApp Django atua como um subscriber assíncrono de baixa latência.

Para garantir que instabilidades na rede de comunicação móvel celular não paralisassem a automação local, implementou-se uma arquitetura baseada em Edge Computing. Em cada painel distribuído nas estações de tratamento, instanciou-se um Broker MQTT local rodando de modo independente em microcomputadores Raspberry Pi 3. Dessa forma, falhas catastróficas ou danos de hardware em um painel isolado não degradam ou afetam a integridade operacional dos demais subsistemas.

O projeto seguiu um ciclo de vida iterativo e incremental, modelo que permite a evolução do software através de ciclos repetitivos (iterações) e a adição progressiva de funcionalidades (incrementos). Esta abordagem engloba as fases de levantamento de requisitos, análise, projeto, desenvolvimento, implementação e testes de validação. A adoção deste modelo possibilitou a entrega parcial do módulo de monitoramento em tempo real antes da finalização completa. Dessa forma, foi possível a identificação e correção de falhas de comunicação MQTT ainda nas fases iniciais, garantindo a aderência do protótipo às necessidades operacionais, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Etapas de desenvolvimento do ciclo de vida



Fonte: elaboração própria.

O firmware embarcado foi construído em linguagem de programação C++. A lógica executa rotinas contínuas de amostragem ADC, filtragem digital de ruído por média móvel e normalização matemática para converter a grandeza elétrica bruta diretamente em unidades físicas de engenharia.

Para o protótipo de coleta de dados, foi utilizada a placa microcontrolada ESP32 Wroom devido a sua arquitetura de núcleo duplo (dual-core), alta capacidade de processamento e baixo consumo energético em modos de hibernação. Além disso, o ESP32 possui nativamente conectividade bluetooth e WiFi, o que permite que um operador possa fazer aferições localmente para verificar os parâmetros das coletas de dados e sua transmissão.

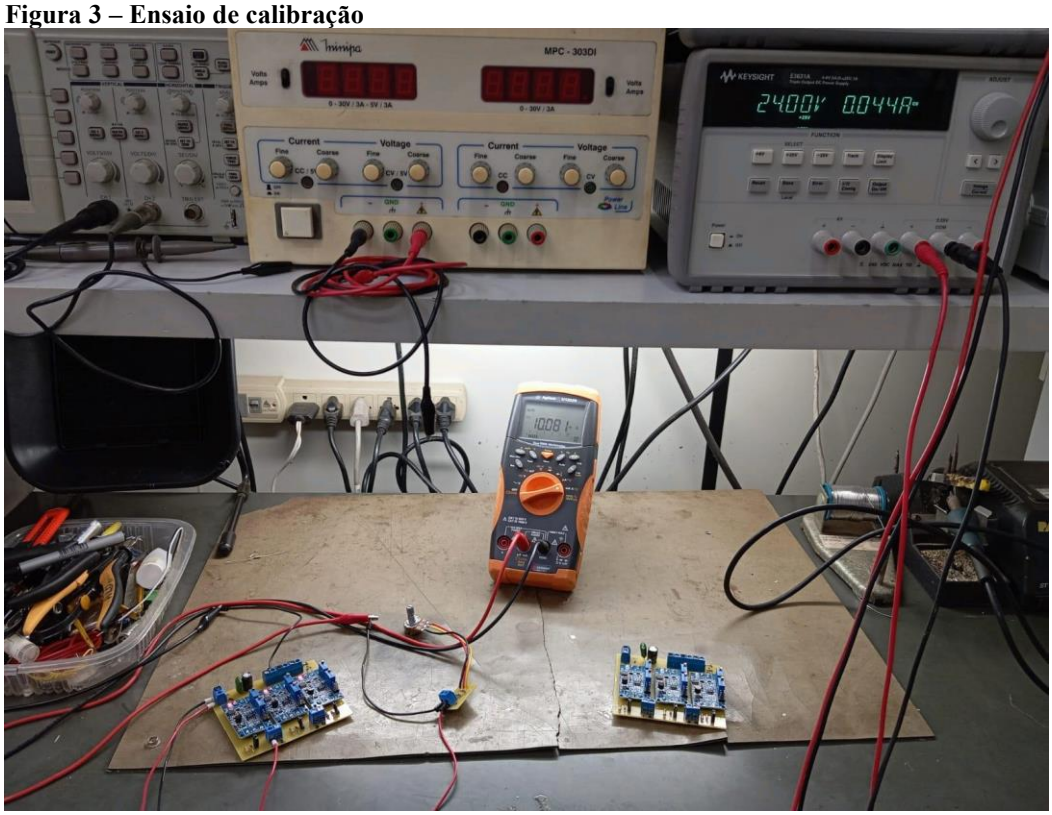
Para garantir a conectividade em locais remotos onde a infraestrutura de rede local é inexistente, foi utilizado o módulo de comunicação GSM/GPRS SIM900L, que utiliza tecnologia de telemetria M2M (Machine to Machine) com chips multioperadora, assegurando redundância de sinal, prioridade de tráfego na rede celular e menor consumo de dados. A comunicação com o servidor remoto ocorre via requisições HTTP, encapsulando os dados lidos em pacotes JSON para persistência no banco de dados.

O esquemático do circuito eletrônico foi desenvolvido utilizando o software Protheus 9 Professional. A confecção da placa de circuito impresso (PCI) em fibra de vidro foi realizada através de processo de fresagem de alta precisão com a prototipadora LPKF ProtoMat E44, garantindo a confiabilidade das trilhas e a robustez física necessária para o ambiente das estações de tratamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Previamente à instalação industrial em Pirassununga-SP, os protótipos foram submetidos a ensaios rigorosos de validação em bancada laboratorial por um ciclo contínuo de 120 horas. Utilizou-se um gerador de sinais de corrente calibrado para injetar estímulos variando de 4 a 20 mA, monitorando-se as saídas elétricas reais por meio de um multímetro digital de bancada de alta precisão (Figura 3).

Figura 3 – Ensaio de calibração



Fonte: própria elaboração.

Os dados experimentais agregados durante os testes de interpolação linear estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaio de calibração

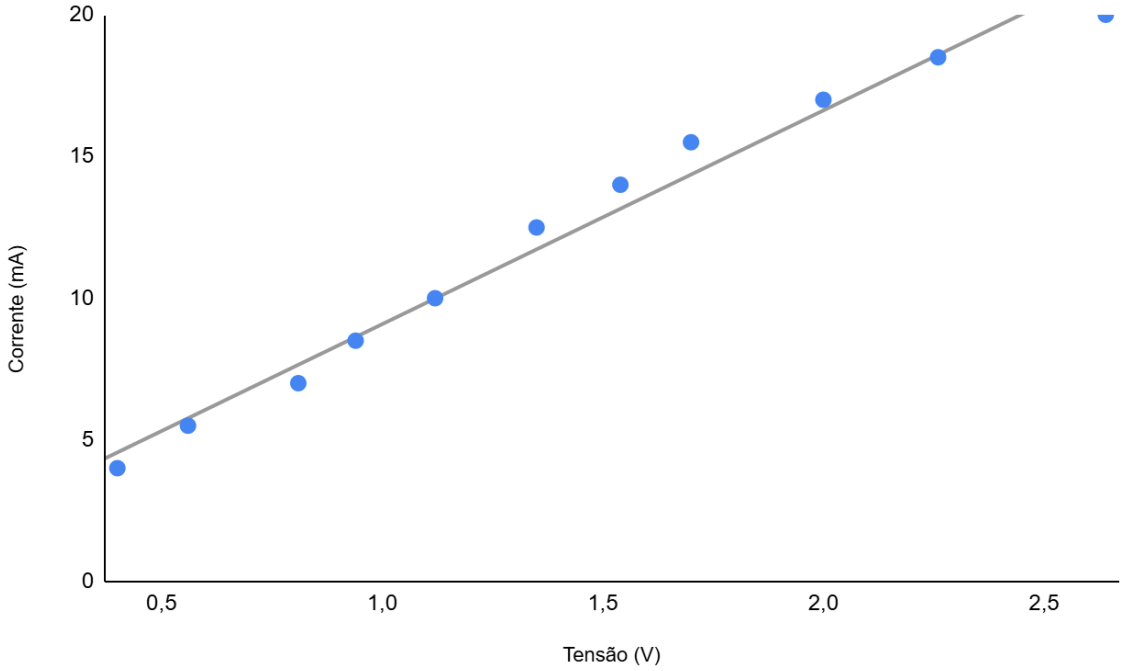
Estímulo de Corrente Injetado (mA)	Tensão Mapeada pelo Loop no ADC (V)
4,00	0,40
5,50	0,56
7,00	0,81
8,50	0,94
10,00	1,12
12,50	1,35
14,00	1,54
15,50	1,70
17,00	2,00
18,50	2,26
20,00	2,64

Fonte: elaboração própria.

Aplicou-se o método da Regressão Linear Mínimo Quadrada para determinar a equação da reta. Os resultados demonstraram uma correlação extremamente alta entre a corrente de entrada e a tensão de saída, resultando em um coeficiente de determinação (R^2) de 98%.

A Figura 4 apresenta o gráfico de dispersão geral, através do comparativo entre as os valores de tensão (eixo X) e os valores de corrente (eixo Y), evidenciando o coeficiente de determinação (R^2).

Figura 4 – Correlação corrente x tensão



Fonte: Própria elaboração.

Após o processamento dos dados coletados no ensaio de calibração, obteve-se a função de calibração através de uma regressão linear. A equação (1) representa o modelo matemático implementado no firmware para a ajuste da tensão lida no conversor analógico-digital (ADC).

f(x) = 7,48932227041936 x + 1,58561161285119 equação (1)

Onde:
f(x) denota o valor final de tensão devidamente ajustado e corrigido após as etapas de calibração.
x representa o valor de tensão física em "volts" mensurado diretamente nos pinos do conversor analógico-digital.
A precisão de mais de dez casas decimais na matriz de coeficientes assegurou que a sensibilidade nativa do loop de corrente industrial de 4 a 20 mA permanecesse preservada durante os processos de digitalização do sinal. A validação estatística da equação foi comprovada por Análise de Variância (ANOVA), apresentando um expressivo coeficiente de determinação R^2 = 0,9984. O teste de significância resultou em um p-valor inferior a 0,0001, atestando correlação exata entre a tensão processada e a corrente de malha real.

Comprovada a segurança laboratorial, foram montadas e efetivamente instaladas 10 unidades físicas dos protótipos em painéis de telemetria industrial de Pirassununga-SP (Figura 5). Cada protótipo eletrônico foi abrigado em caixas metálicas de comando dotadas de fontes industriais chaveadas estabilizadas e disjuntores de proteção contra surtos elétricos. As antenas GSM foram fixadas externamente aos armários industriais, visando maximizar o ganho de sinal GPRS.

Figura 5 – Protótipo eletrônico para aquisição de dados



Fonte: elaboração própria.

O sistema foi submetido a testes de validação baseados em métricas quantitativas, com foco na confiabilidade e no desempenho da arquitetura proposta. Para validar a precisão do monitoramento, realizou-se um ensaio comparativo entre a corrente de saída do sensor (mA), a altura processada pelo sistema (m) e a altura real esperada (m), a fim de comprovar a existência de linearidade entre os dados. A análise estatística dos dados apresentados na Tabela 4 revela um erro médio absoluto de aproximadamente 0.10m, o que representa uma precisão elevada para o monitoramento de reservatórios de grande porte, onde variações dessa magnitude são consideradas desprezíveis para o controle operacional. Observa-se um aumento expressivo no erro relativo no limite inferior da escala (4 mA), fenômeno comum em sensores de nível onde o valor medido aproxima-se do zero absoluto da escala (fundo do reservatório).

Realizou-se também, a correlação linear entre a altura ideal e a altura lida durante o ensaio de calibração, onde observou-se um coeficiente de determinação de 99%, com erros residuais que não comprometem a tomada de decisão no Sistema de Apoio à Decisão (SAD), conforme observado na Figura 6.

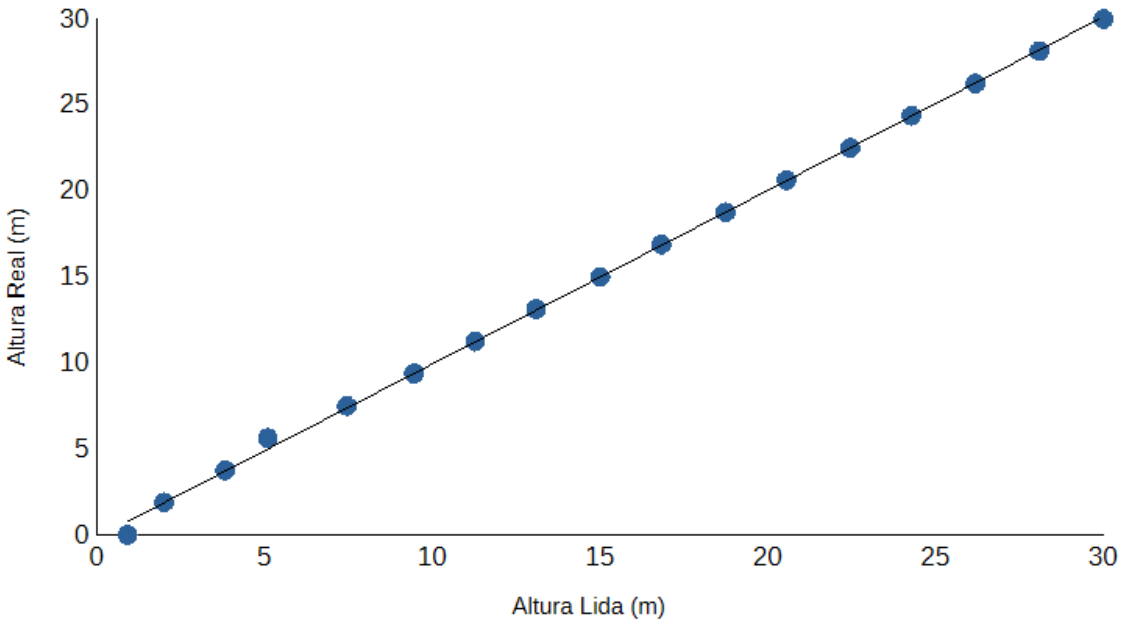
Tabela 4 – Resultados métricos consolidados do ensaio de validação em campo real

Corrente (mA)	Altura Lida (m)	Altura Real (m)	Erro Absoluto Medido (m)
20	30,00	30,00	0,00
19	28,09	28,13	0,04
18	26,18	26,25	0,07
17	24,27	24,38	0,11
16	22,45	22,50	0,05
15	20,55	20,63	0,08
14	18,73	18,75	0,02
13	16,82	16,88	0,06
12	15,00	15,00	0,00
11	13,09	13,13	0,04

10	11,27	11,25	0,02
09	9,45	9,38	0,07
08	7,45	7,50	0,05
07	5,59	5,63	0,04
06	3,82	3,75	0,07
05	1,92	1,88	0,04
04	0,91	0,00	0,90

Fonte: elaboração própria.

Figura 6 – Correlação altura real x altura lida



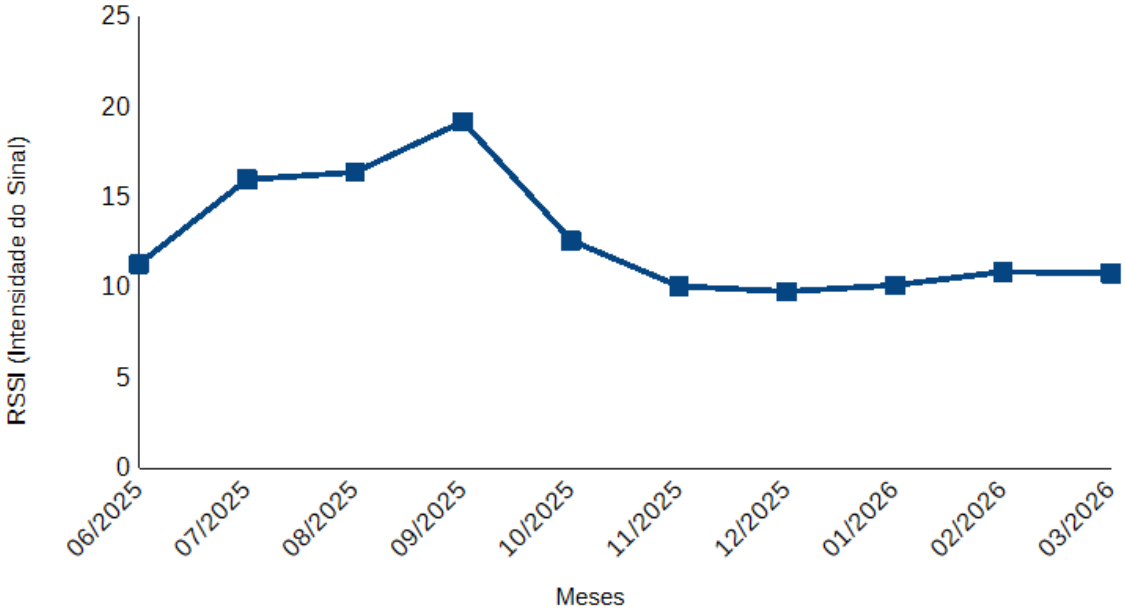
Fonte: elaboração própria.

Com o intuito de verificar a resiliência e estabilidade da comunicação de dados sob condições de intempérie industrial, monitorou-se continuamente ao longo de um intervalo de 300 dias um protótipo específico instalado em um reservatório geograficamente isolado e com escassos níveis de cobertura de telefonia celular.

O intervalo mediano de tempo calculado entre as amostras sequenciais de pacotes IP recebidas com sucesso no servidor remoto Django foi de apenas 4,4 minutos, preenchendo adequadamente as necessidades de tempo de resposta para a gestão hídrica municipal.

A intensidade física do sinal, medida via padrão Signal Quality (índice CSQ) emitido pelo modem SIM900L, consolidou uma média aritmética estável de 12,71. Esse patamar enquadra-se tecnicamente na faixa qualitativa rotulada como "Regular", oscilando a maior parte do ano entre os índices discretos 9 e 10 (Figura 7).

Figura 7 – Média mensal do índice CSQ

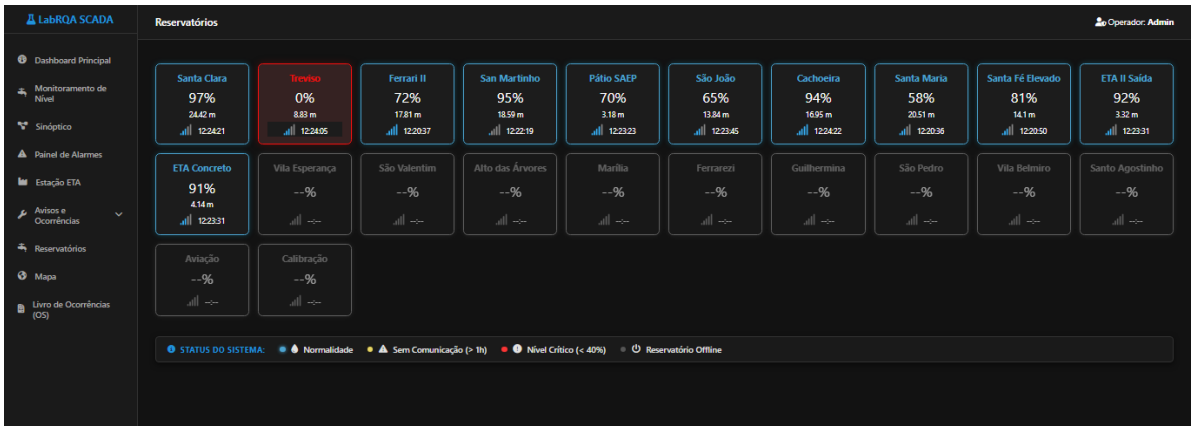


Fonte: elaboração própria.

A utilização sistemática de antenas externas de alto ganho fixadas fora dos armários metálicos foi o fator determinante para mitigar fenômenos severos de *jitter* na recepção de pacotes IP. De modo complementar, a estratégia de Edge Computing mitigou quedas temporárias de sinal celular: durante as janelas de indisponibilidade da operadora GSM, a persistência de banco de dados nativa do Broker MQTT instanciado nas placas Raspberry Pi locais armazenou temporariamente as mensagens de campo e realizou rotinas assíncronas automáticas de retransmissão assim que o link se restabeleceu, mitigando quaisquer riscos de lacunas crônicas nos registros históricos coletados.

O sistema web Django foi desenvolvido sob critérios de usabilidade e responsividade, exibindo o percentual instantâneo, unidade de engenharia e hora da última transmissão. Além disso, a interface segue uma lógica baseada em código de cores: azul para "Normalidade", amarelo para "Em Falha" e vermelho intermitente associado a alarmes sonoros automáticos acionados no navegador caso os parâmetros estejam fora das regras de negócio definidas (Figura 8).

Figura 8 - Tela de monitoramento do nível de reservatórios



Fonte: elaboração própria.

Adicionalmente, o sistema disponibiliza ferramentas de filtros temporais com calendários interativos de data e hora de início e fim. Além da plotagem imediata do gráfico de comportamento, é possível exportar os dados no formato ".csv", gerando datasets para alimentar ferramentas de Business Intelligence ou o treinamento de redes neurais artificiais (Figura 9).

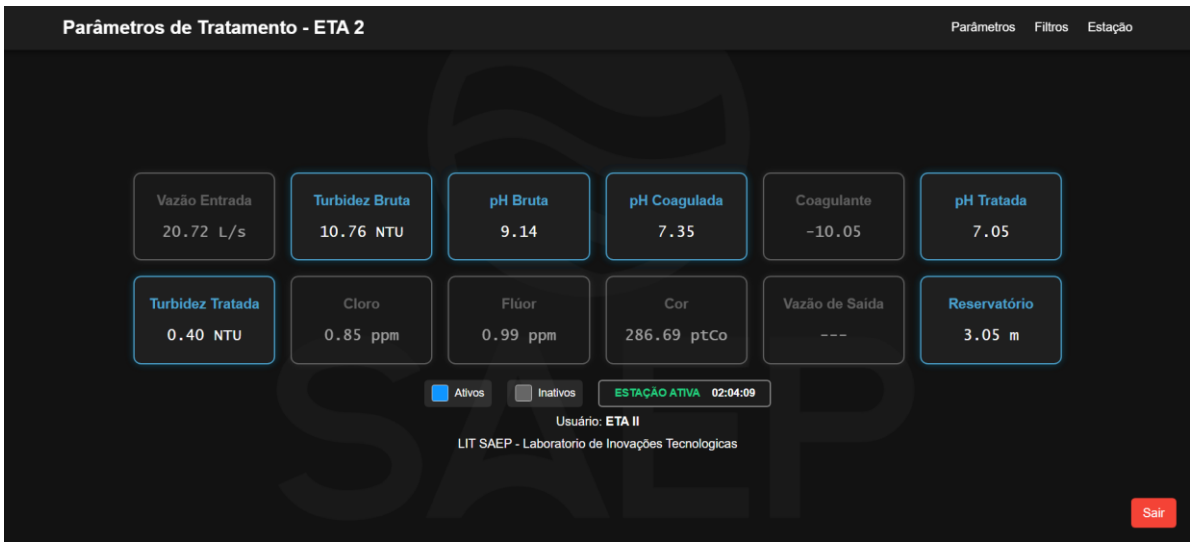
Figura 9 - Tela de gráfico histórico dos dados coletados



Fonte: própria elaboração.

A interface de Parâmetros de Tratamento, conforme visto na Figura 10, representa o núcleo operacional do Sistema de Apoio à Decisão (SAD). Esta tela permite que o operador monitore, de forma centralizada, as variáveis físico-químicas e hidráulicas essenciais para a garantia da qualidade da água tratada.

Figura 10 - Tela de gráfico histórico dos dados coletados



Fonte: própria elaboração.

Realizou-se um levantamento de custos para a contratação de uma empresa especializada em telemetria, considerando os preços de contratações anteriores registradas através do Portal Nacional de Contratações Públicas (PNCP) e orçamentos de empresas prestadoras de serviço.

Esse levantamento estimou um custo de, em média, R$ 238.812,82 (duzentos e trinta e oito mil, oitocentos e doze reais e oitenta e dois centavos) para instalação de 20 pontos de aferição com transmissão de dados e sistema

supervisório, além da necessidade de pagamento de mensalidades para manutenção do sistema e renovação de licenças. A Tabela 5 apresenta o resultado das cotações de três fornecedores.

Tabela 5 - Quadro de cotações obtido na pesquisa de preços de mercado

Fornecedor *	Preço estimado
Fornecedor 1	R$ 215.428,73
Fornecedor 2	R$ 232.409,75
Fornecedor 3	R$ 268.600,00
Valor Médio Estimado	R$ 238.812,82

*Os nomes dos fornecedores foram suprimidos
Fonte: Própria elaboração.

Dessa forma, o custo total para a aquisição dos insumos necessários à fabricação dos circuitos foi de, aproximadamente, R$ 17.000,00 (dezessete mil reais), resultando em uma economia estimada de 92,9% para os cofres públicos em relação às soluções identificadas na pesquisa de mercado.

CONCLUSÃO

A substituição de ecossistemas legados de telemetria por soluções modernas baseadas em arquiteturas abertas de Internet das Coisas (IoT) e Edge Computing provou ser uma alternativa altamente sustentável, estatisticamente confiável e de baixo custo de implantação para a gestão das redes de saneamento básico operadas por órgãos públicos.

O rigor aplicado nos ensaios laboratoriais atestou a exatidão matemática do hardware concebido ($R^2 = 0,9984$), e o estudo de longa duração em campo confirmou que o sistema mantém estabilidade de calibração sem registrar derivas (drifts) de leitura mecânica ou falhas críticas de barramento mesmo sob severas condições industriais.

Os resultados obtidos evidenciam que soluções tecnológicas próprias geram ganhos significativos em eficiência operacional e redução de custos aos cofres públicos.

O software já se encontra sob regime de uso parcial ativo pelo Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga (SAEP), atuando diretamente como uma ferramenta estratégica para a salvaguarda contra riscos iminentes de interrupção ou desabastecimento prolongado da população local.

Como desdobramento e perspectiva para trabalhos futuros, pretende-se implementar algoritmos de *Machine Learning* embarcados para a otimização automatizada de dosagem de insumos químicos e predição de risco carcinogênico e hepatotoxicidade em estações de tratamento de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União, Brasília, 16 de jul. 2020. Seção 1, p. 1.

2. KAGERMANN, H.; WIESBACHER, M.; SCHALLER, J. A Indústria 4.0 e seu impacto nos setores de saneamento e infraestrutura. Journal of Industrial Engineering, v. 20, n. 4, p. 55-62, 2013.

3. LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. Sistemas de informação gerenciais: administrando a empresa digital. 17. ed. São Paulo: Pearson, 2023.

4. LAZZARETTI, L. Saneamento básico e sua influência sobre a saúde da população. Monografia (Especialização em Gestão em Saúde) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

5. LU, Y. Aplicações de computação de ponta para monitoramento eficiente de tratamento de água. Jornal de Tecnologia Industrial, v. 17, n. 3, p. 44-52, 2021.

6. OLIVEIRA, F. J.; SANTOS, M. L. A interoperabilidade no contexto da Indústria 4.0 e sua aplicação no saneamento. Revista Brasileira de Tecnologia e Saneamento, v. 19, n. 1, p. 45-53, 2022.

7. QUILICI, F. A importância da telemetria e da rastreabilidade: caso de aplicação para detecção de vazamentos em redes de distribuição de água. Contribuciones a las ciencias sociales, v. 17, n. 7, p. 1-23, 2024.

8. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos. Painel Informativo, Ministério das Cidades, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel. Acesso em: 25 set. 2025.

9. TORRES, A. S. C. G.; RAMOS, N. M. R.; DAS CHAGAS MONTEIRO, R. Sistemas de abastecimento de água. [s.l.] Editora CRV, 2025.

10. WAZLAWICK, R. Análise e Projeto de Sistemas de Informação Orientados a Objetos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2010.