



Desenvolvimento de Sistema de Telemetria de Baixo Custo para Monitoramento do Nível de Reservatórios de Água em Pirassununga

André Luis Céspedes da Silva¹, Matheus Hansen Paes¹, Renilson Helcio Bergue², Sérgio Ricardo Penteado², Pedro Westphal Nunes², Evandro José Moloni², Osório dos Santos Neto², Aldo Ivan Céspedes Arce³, Ernane José Xavier Costa³



<https://doi.org/10.36557/2009-3578.2025v11n2p9441-9462>

Artigo recebido em 21 de Outubro e publicado em 21 de Dezembro de 2025

ARTIGO ORIGINAL

RESUMO

O Brasil possui a maior reserva de água doce do mundo, porém, enfrenta sérios desafios na gestão de recursos hídricos. Tais problemas são intensificados pela falta de saneamento básico e pelas perdas ocasionadas durante o processo de distribuição da água. Em Pirassununga, o Serviço de Água e Esgoto (SAEP) realiza o monitoramento dos reservatórios de água, porém, ainda encontra dificuldades devido à ausência de tecnologias adequadas. Portanto, o SAEP realizou uma parceria com a Universidade de São Paulo, através da Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiróz (FEALQ), com o objetivo de desenvolver uma solução acessível e de baixo custo para o monitoramento do nível de água nos reservatórios. O resultado foi a criação de um protótipo de sistema embarcado, que proporcionou uma economia de 92,9% aos cofres públicos, em relação à contratação de serviços de terceiros. Após a etapa de validação, o protótipo demonstrou ser altamente eficiente em comparação com os sistemas comerciais existentes.

Palavras-chave: Telemetria. Sistemas Embarcados. Saneamento.



Development of a Low-Cost Telemetry System for Monitoring Water Reservoir Levels in Pirassununga

ABSTRACT

Brazil has the largest freshwater reserve in the world; however, it faces serious challenges in water resource management. These problems are intensified by the lack of basic sanitation and the losses incurred during the water distribution process. In Pirassununga, the Water and Sewage Service (SAEP) monitors the water reservoirs; however, it still faces difficulties due to the absence of adequate technologies. Therefore, SAEP established a partnership with the University of São Paulo through the Luiz de Queiróz Foundation for Agrarian Studies (FEALQ) to develop an accessible and low-cost solution for monitoring water levels in reservoirs. The result was the creation of an embedded system prototype, which generated a 92.9% cost reduction for public funds compared to outsourcing third-party services. After the validation phase, the prototype proved to be highly efficient compared to existing commercial systems.

Keywords: Telemetry. Embedded Systems. Sanitation.

Instituição afiliada –

1 Laboratório de Inovações Tecnológicas, Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga (SAEP), Pirassununga, SP, Brasil.

2 Departamento de Ciência Básicas (ZAB), Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga, SP, Brasil.

Autor correspondente: *André Luis Céspedes da Silva* andre.cespedes.silva@alumni.usp.br

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos influenciam diretamente o desenvolvimento econômico, ambiental e social do Brasil. Apesar de ser o maior detentor de água doce do mundo, o Brasil enfrenta o desafio de assegurar a qualidade e a disponibilidade desse recurso, tanto para o abastecimento humano, quanto para atividades econômicas e produção agrícola. Nesse sentido, a falta de sistemas eficazes de monitoramento de distribuição e perdas de recursos hídricos compromete a gestão hídrica e pode impactar a disponibilidade de tal recurso.

Segundo a FAOSTAT (2022), apenas 50% da população brasileira tem acesso a serviços de saneamento de qualidade, enquanto 91% utilizam serviços básicos, como o abastecimento de água. A precariedade do saneamento reflete diretamente na qualidade dos recursos hídricos, ocasionando a contaminação ambiental e aumentando a incidência de doenças de veiculação hídrica. Em áreas urbanas, a ausência de sistemas de coleta e tratamento de efluentes, favorece a disseminação de enfermidades, enquanto em regiões rurais, o despejo inadequado de dejetos no solo e em corpos d'água pode causar infecções gastrointestinais e zoonoses, como giardíase e febre tifoide. Além disso, a irrigação agrícola com água de baixa qualidade representa um risco à saúde dos trabalhadores rurais e consumidores (LAZZARETTI, 2012).

No Brasil, o Marco Regulatório do Saneamento, estabelecido pela Lei n.º 11.445/2007 e atualizado pela Lei n.º 14.026/2020, apresenta diretrizes nacionais para o setor, visando a promoção de programas de saneamento básico, normas de governança, bem como o acesso a informações de relevante interesse social relacionados à qualidade da água distribuída à população e esgotamento sanitário, promovendo a participação dos usuários na administração pública, destacando a importância de um serviço de saneamento que seja eficiente e seguro (BRASIL, 2020). Além disso, a Constituição Federal de 1988 assegura, em diversos artigos, o direito da população ao saneamento básico e a um meio ambiente equilibrado, atribuindo a competência para a gestão hídrica à União, Estados e Municípios (BRASIL, 1988). Nesse contexto, o Marco Regulatório do Saneamento fortalece a fiscalização e a transparência por estes entes, promovendo a prestação de contas por parte das



entidades responsáveis e permitindo que a sociedade exerça seu direito de conhecer a qualidade dos serviços prestados, com ênfase na segurança hídrica e na proteção da saúde.

No âmbito internacional, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU estabelecem metas globais para combater desafios ambientais e sociais. O ODS 6, em particular, destaca a necessidade de garantir o acesso universal à água potável e ao saneamento de qualidade, promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos (ONU, 2024).

De acordo com Quilici (2023), no Brasil, a distribuição de água tratada enfrenta desafios significativos, com índices de perdas na faixa de 40%, em média, por motivos que vão desde vazamentos, fraudes, infraestrutura deficiente e práticas ineficientes na distribuição e armazenamento. Tal índice coloca o país entre os de maiores índices de perdas de água tratada, conforme estudo realizado pela International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities (IBNET).

A prestação de serviços públicos de saneamento tem sido alvo de debates quanto a estratégias de privatização e remunicipalização. Ferreira, Gomes e Dantas (2021) apontam que, em diversos países, serviços privatizados foram reincorporados ao setor público devido à falta de investimentos e à degradação da qualidade dos serviços prestados, especialmente na etapa de tratamento de esgoto, onde o retorno sobre o investimento é baixo. A remunicipalização, nesse contexto, obriga o ente público a se reinventar e buscar novas soluções para melhorar a prestação dos serviços.

Diante desse cenário, a parceria entre universidades e órgãos públicos surge como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de soluções inovadoras e mais eficazes, além de permitir o acesso a recursos de agências de fomento à pesquisa científica. Enquanto as universidades detêm o know-how para criação de novas tecnologias, os órgãos públicos detentores dos serviços de saneamento possuem conhecimento aprofundado sobre as necessidades e desafios reais do setor. A colaboração entre essas instituições possibilita o desenvolvimento de tecnologias aplicadas à gestão dos recursos hídricos, promovendo melhorias na eficiência operacional e garantindo um saneamento de maior qualidade para a população.



No município de Pirassununga-SP, o Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga (SAEP) é responsável pelo tratamento e distribuição de água, captada principalmente do Ribeirão do Roque e do Córrego da Barra (SAEP, 2025).

Para monitorar a distribuição, a autarquia conta com sistemas que indicam os níveis dos reservatórios, as vazões e outros parâmetros operacionais. Entretanto, tais sistemas encontram-se obsoletos, com falhas de comunicação (via rádio frequência) e ausência de suporte técnico, uma vez que os contratos com as empresas responsáveis foram extintos, o que compromete a eficiência do serviço, gera custos adicionais e pode afetar a qualidade do abastecimento à população.

Este estudo propõe o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo para mitigar essas dificuldades, através de um convênio entre o Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga e a Universidade de São Paulo.

REVISÃO DE LITERATURA

A automação industrial, juntamente com a introdução do conceito de Indústria 4.0, tem promovido transformações profundas em diversos setores, incluindo o setor de saneamento. Esse avanço é impulsionado por princípios fundamentais como interoperabilidade, consistência e transparência da informação, assistência técnica e a descentralização das decisões que anteriormente dependiam exclusivamente da mão de obra humana (KAGERMANN e et al., 2013).

A interoperabilidade, por exemplo, possibilita a integração entre dispositivos e sistemas heterogêneos, promovendo um fluxo de dados eficiente entre sensores, máquinas e operadores, o que resulta em maior eficiência operacional e redução de erros (OLIVEIRA e SANTOS, 2022). Essa integração é essencial para a tomada de decisões baseadas em informações precisas e em tempo real.

Entre os principais pilares da Indústria 4.0 aplicados ao setor de saneamento, destaca-se a automação de processos, que desempenha um papel essencial na modernização e otimização das operações. Com a automação, é possível realizar o



controle remoto de equipamentos, implementar análises preditivas para antecipar problemas e reduzir custos, além de detectar falhas em tempo real, minimizando interrupções no serviço (MÜLLER e et al., 2018).

Segundo Vijayakumar, et al. (2015), os métodos tradicionais de monitoramento da qualidade da água envolvem a coleta manual de amostras, o que aumenta os custos e a demora para a obtenção dos resultados. Dessa forma, pesquisas para desenvolvimento de sistemas de monitoramento de água, baseados em IoT, têm sido cada vez mais frequentes.

Essas inovações permitem não apenas a melhoria da eficiência e da sustentabilidade no setor de saneamento, mas também a adaptação a um cenário cada vez mais orientado por dados e tecnologias avançadas. A introdução de sistemas inteligentes e conectados não apenas aumenta a capacidade operacional, mas também reforça a segurança e a qualidade dos serviços prestados à população.

No contexto das unidades de tratamento de água, a automação tem desempenhado um papel importante na modernização e eficiência dos processos operacionais.

Essa tecnologia pode ser aplicada de forma abrangente, desde o monitoramento contínuo da qualidade da água até o controle preciso e automatizado da dosagem de produtos químicos, garantindo maior consistência nos resultados e minimizando a interferência de erros humanos (GONZALEZ e et al., 2020).

No monitoramento da qualidade da água, sensores inteligentes são integrados aos sistemas automatizados, possibilitando a coleta e análise de parâmetros críticos, como pH, turbidez, condutividade e presença de contaminantes. Essa coleta de dados em tempo real permite ajustes rápidos e precisos nos processos de tratamento, otimizando o uso de insumos e reduzindo desperdícios.

Outra inovação significativa é a aplicação de modelos de computação distribuída, como o Edge Computing, que descentralizam o processamento de dados. Essa abordagem permite que informações críticas sejam processadas diretamente nos dispositivos próximos ao local de coleta, em vez de depender exclusivamente de servidores centralizados. Com isso, é possível reduzir significativamente o tempo de resposta e aumentar a resiliência das operações, mesmo em situações de



conectividade limitada (LU Y., 2021).

A combinação dessas tecnologias resulta em sistemas mais robustos, capazes de operar com alta eficiência e segurança, mesmo diante de desafios complexos, como variações bruscas na qualidade da água ou picos de demanda. Ao integrar automação e computação avançada, as unidades de tratamento de água alcançam novos patamares de desempenho, contribuindo para a sustentabilidade e a confiabilidade do abastecimento de água potável.

Sistemas automatizados baseados em IoT reduzem significativamente os erros causados pela operação humana, eliminando a dependência de intervenções manuais, repetitivas e sujeitas a falhas, garantindo a padronização (Rao, 2022).

Sendo assim, a aplicação da Indústria 4.0 no saneamento vai além da automação convencional, incorporando tecnologias como inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina, a fim de aprimorar a eficiência operacional e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento e tratamento de água.

Com o uso de IA e aprendizado de máquina, é possível prever falhas em equipamentos e processos, otimizando o consumo energético e antecipando variações na qualidade da água. Além disso, a conectividade utilizada pela Internet das Coisas (IoT) viabiliza a integração de diversos sensores inteligentes em redes, coletando dados sobre variáveis como pressão, vazão, turbidez e possíveis contaminações.

Os dados, analisados em tempo real, reduzem desperdícios e melhoram a resposta a emergências, garantindo maior confiabilidade no fornecimento de água.

METODOLOGIA

A fim de realizar o desenvolvimento da solução, foi instituído um convênio de parceria para promoção de pesquisa e inovação entre o Laboratório de Física Aplicada Computacional (LAFAC) da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP) e o Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga (SAEP), por intermédio da Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), com o objetivo de elaboração de um projeto de monitoramento de perda de água nos reservatórios do SAEP.



O projeto teve por objetivo o desenvolvimento de uma solução alternativa para monitoramento do sistema de abastecimento de água no município, visando minimizar as perdas de água nas etapas de distribuição e armazenamento, utilizando, para este fim, tecnologia de monitoramento sem fio.

Como fruto de tal iniciativa, o SAEP promoveu a instauração, em sua estrutura interna, de um Laboratório de Inovações Tecnológicas (LIT), alocando um funcionário de seu corpo técnico para ser o responsável pela intermediação da pesquisa junto ao laboratório da USP e pela proposição de soluções técnicas inovadoras.

Tal medida permitirá o desenvolvimento de soluções próprias para o aumento da eficiência de seus processos, redução de custos produtivos, maior confiabilidade do sistema, entre outros ganhos, permitindo, ainda, a retenção do conhecimento na Autarquia.

Foram oferecidas, como contrapartida ao convênio, duas bolsas de estágio com duração de três meses, para alunos da graduação do curso de Engenharia de Alimentos e Engenharia de Biosistemas, vinculados ao LAFAC - FZEA/USP. Os estagiários realizaram um levantamento da infraestrutura tecnológica existente nas instalações do SAEP, bem como a disponibilidade de conexão com a rede GPRS.

Realizou-se, também, um levantamento de requisitos funcionais e não funcionais, com base no sistema legado, a fim de compreender a necessidade de informações para o correto monitoramento. Os requisitos foram classificados de acordo com três critérios de urgência: Essencial, Importante e Desejável.

Foram realizados estudos de custo-benefício, levando em consideração os investimentos necessários, os potenciais ganhos em eficiência e os benefícios para o município. Com base nesse levantamento, elaborou-se um projeto de monitoramento de reservatórios alternativo capaz de ser implementado de forma viável no município, com baixo custo.

Ao final do pré-projeto, foi desenvolvido pelo LIT do SAEP um sistema embarcado utilizando tecnologia IoT para aquisição de dados de nível dos reservatórios, e comunicação com o banco de dados.

Para aferição do nível dos reservatórios foram utilizadas sondas hidrostáticas com saída 4 a 20 mA, modelo VKL-214-A-03-42-A-6M Fabricado pela Velki [Velki,



2025], devido à sua alta precisão e confiabilidade. Esse modelo de sensor tem capacidade de medir colunas de água de 0 até 5 MCA com uma precisão de $\pm 0.25F.E.$ São amplamente utilizados em processos de saneamento, devido à fácil integração com CLPs e equipamentos industriais, além de oferecer maior resistência a ruídos elétricos, podendo transmitir sinais por longas distâncias sem perda de qualidade.

Para calibração do sensor, foi montado um experimento utilizando um cano de PVC DN50 e 2m de comprimento. O cano foi graduado com uma escala em cm e posicionado na vertical. Foram adicionados diversos níveis de coluna d'água e foi coletada a tensão de saída para cada nível. Através dos dados coletados foi obtida a função de calibração.

Seguindo os moldes do paradigma da Edge Computing (Computação de Borda), para o processamento dos sinais, foi utilizada a placa microcontrolada ESP32 devido a sua alta capacidade de processamento e baixo consumo de energia. Além disso, o ESP32 possui nativamente conectividade bluetooth e WiFi, o que permite que um operador possa fazer aferições localmente nos reservatórios e verificar os parâmetros das coletas de dados e sua transmissão. O ESP32 possui compatibilidade com o protocolo HTTP, permitindo o envio de dados para o servidor de hospedagem através de requisições. O sensor de nível foi acoplado ao ESP32 através de um módulo conversor de corrente em tensão, modelo XY-IT0V.

O firmware desenvolvido para o ESP32 faz a conversão do sinal 4 a 20 mA para mca (metros de coluna d'água), sendo possível determinar o nível do reservatório.

Para a comunicação com a internet, foi utilizado o módulo GSM GPRS SIM900L, que permite a realização de requisições HTTP utilizando chips de telefonia móvel, uma vez que os reservatórios não possuem infraestrutura de rede ethernet nem wifi. Foram utilizados chips M2M (Machine-To-Machine), que são amplamente utilizados em projetos de telemetria, pois são projetados para comunicação entre dispositivos, garantindo prioridade na rede e menor consumo do plano de dados. O módulo SIM900L possui baixo consumo de energia, e permite a transmissão de dados através de redes 2G, que apesar de antigas, possuem ampla cobertura em regiões afastadas. A Figura 1 apresenta o design do sistema embarcado desenvolvido.

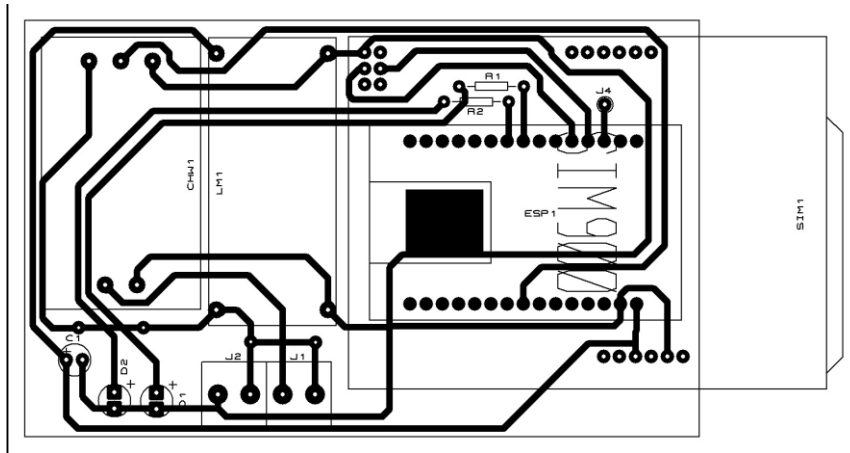


Figura 1. Design da placa PCB para coleta de dados

Para o armazenamento dos dados coletados, optou-se pela utilização do gerenciador de banco de dados MySQL, implementado em um servidor Windows Server 2016, devido à sua robustez e escalabilidade. O MySQL permite o armazenamento estruturado das informações dos reservatórios, garantindo a integridade, segurança e a consistência dos dados.

Para visualização dos dados e informações obtidas, foi implementado uma webapp utilizando o framework Django. Foram desenvolvidas views dinâmicas que criam objetos de reservatórios conforme são gravados os dados no banco de dados. Ao clicar nos reservatórios é aberta uma nova tela com o gráfico dois dados das últimas 24 horas do respectivo reservatório. Há também a possibilidade de filtrar os dados de acordo com as datas. A Figura 2 apresenta a captura de tela da webapp.



Figura 2. Telas do Sistema



A eficiência e a acurácia do sistema desenvolvido foram avaliadas por meio da comparação entre os dados obtidos pelo protótipo desenvolvido na parceria entre o SAEP e o LAFAC/FZEA-USP e aqueles coletados por uma infraestrutura já existente, instalada por uma empresa prestadora de serviços de automação industrial há longo tempo no mercado.

Os dados de nível foram coletados ao longo de um período de 24 horas, com medições a cada 03 minutos, em um reservatório semi-enterrado existente nas instalações do SAEP, dispo de 5 metros de profundidade e capacidade para 1.000 m³ de água.

Foi calculada a regressão linear simples, entre os dados coletados pelo protótipo e os valores registrados pelo sistema comercial existente, a fim de verificar o grau de correspondência entre os conjuntos de dados e determinar a confiabilidade do novo sistema. O nível medido pelo sistema comercial foi considerado a variável independente (x), e os dados lidos pelo protótipo foram considerados como a variável dependente (Y).

Aplicou-se também o teste de significância (p-valor) para observar se a relação entre as duas amostras é estatisticamente significativa, demonstrando a confiabilidade dos resultados e se as medições obtidas pelos dois sistemas podem ser tratadas de forma equivalente ou se existe alguma discrepância relevante.

A viabilidade econômica do projeto foi avaliada pela comparação entre o custo calculado do protótipo desenvolvido e três orçamentos de prestadores de serviços na área de automação industrial, os quais apresentaram projetos voltados para a execução das mesmas tarefas de monitoramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a elaboração do pré-projeto, foi realizado um levantamento de custos para a contratação de uma empresa especializada em telemetria de reservatórios, 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 de nível em reservatórios, além da necessidade de pagamento de mensalidades para manutenção do sistema e renovação de licenças. A Tabela 1 apresenta o resultado das cotações de três fornecedores.

Tabela 1. 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

O levantamento econômico realizado durante a elaboração do pré-projeto indicou que a implantação do Laboratório de Inovações Tecnológicas dentro das dependências do SAEP seria viável, permitindo que a tecnologia fosse desenvolvida pela equipe interna, com suporte técnico do LAFAC - FZEA/USP, sem a necessidade de contratação de uma empresa terceirizada. Além disso, essa medida tornou o SAEP detentor da própria tecnologia desenvolvida, possibilitando escalabilidade e eliminando a necessidade de renovação periódica de licenças.

Dessa forma, o custo total para a aquisição de equipamentos e insumos necessários à fabricação dos circuitos eletrônicos e ao desenvolvimento do sistema 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.

A Figura 3 apresenta o sistema embarcado desenvolvido pelo Laboratório de Inovações Tecnológicas (LIT – SAEP).

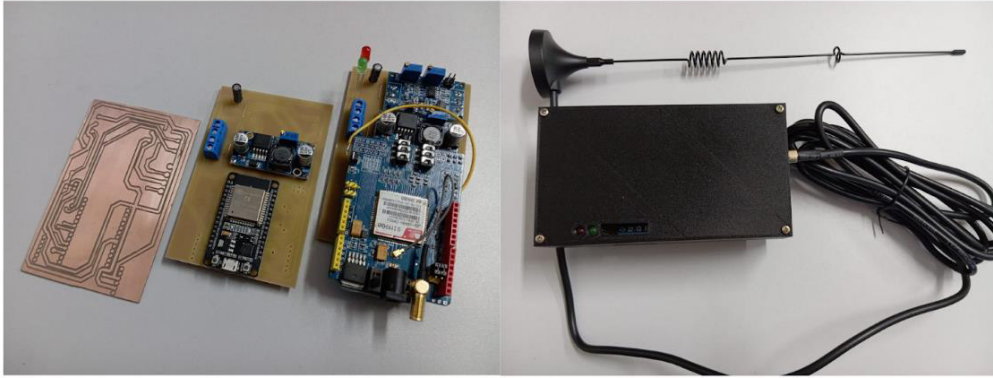


Figura 3. Montagem do sistema embarcado desenvolvido

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos no experimento de calibração do sensor. Foram realizadas coletas de dados para intervalos de 25 cm de altura da água no tubo de calibração. Utilizou-se a regressão linear simples e o coeficiente de determinação entre os dados coletados e a altura do líquido no tubo. O resultado indicou uma correlação de 99,7%, conforme apresentado na Figura 4.

A (eq. 01) apresenta a função de calibração do sensor.

$$f(x) = 0,00131287718018436 x - 0,184216526295 \quad (\text{eq. 01})$$

Tabela 2 – Calibração do sensor de nível

Altura Tubo (m)	Tensão (mV)
0.00	155
0.25	333
0.50	511
0.75	689
1.00	901
1.25	1109
1.50	1269



1.75	1518
2.00	1633

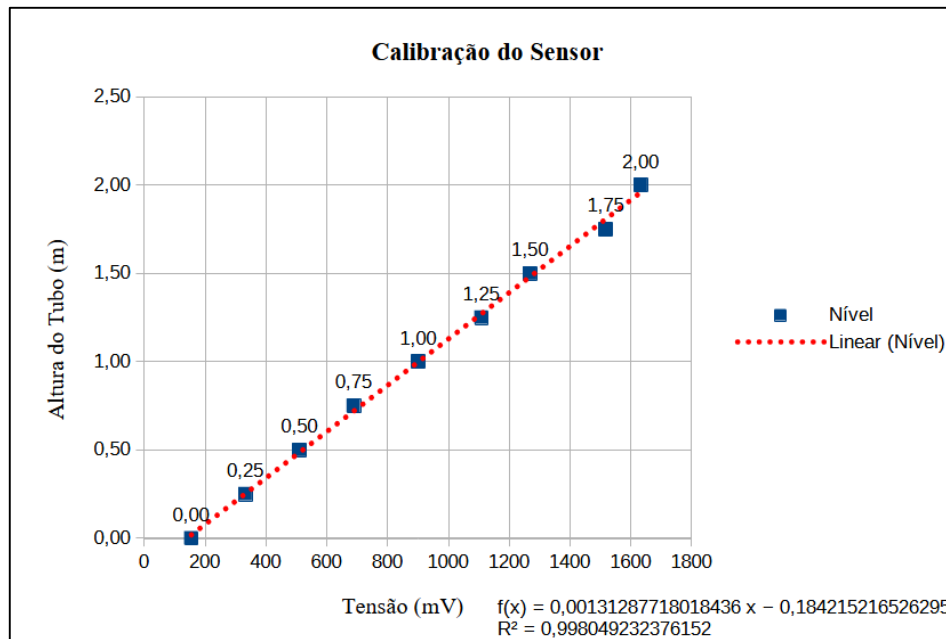


Figura 4. Calibração do Sensor

Após a montagem do protótipo, realizou-se um experimento comparativo com um sistema comercial previamente instalado. O experimento foi conduzido dentro das dependências do Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga, a fim de monitorar o nível do reservatório denominado “Pátio Santo Antônio”, que abastece grande parte do município. O protótipo foi instalado em paralelo com o sistema comercial de monitoramento já existente no local.

Ao todo, foram geradas 720 leituras durante o período de 24 horas do experimento. Com base nas leituras, foi calculado o nível médio do reservatório a cada hora. A comparação gráfica entre o sistema de aquisição de dados comercial instalado por uma empresa terceirizada e os dados obtidos pelo protótipo desenvolvido indicou um comportamento semelhante das leituras. A Figura 5 apresenta a comparação dos valores medidos pelo protótipo e pelo sistema comercial.

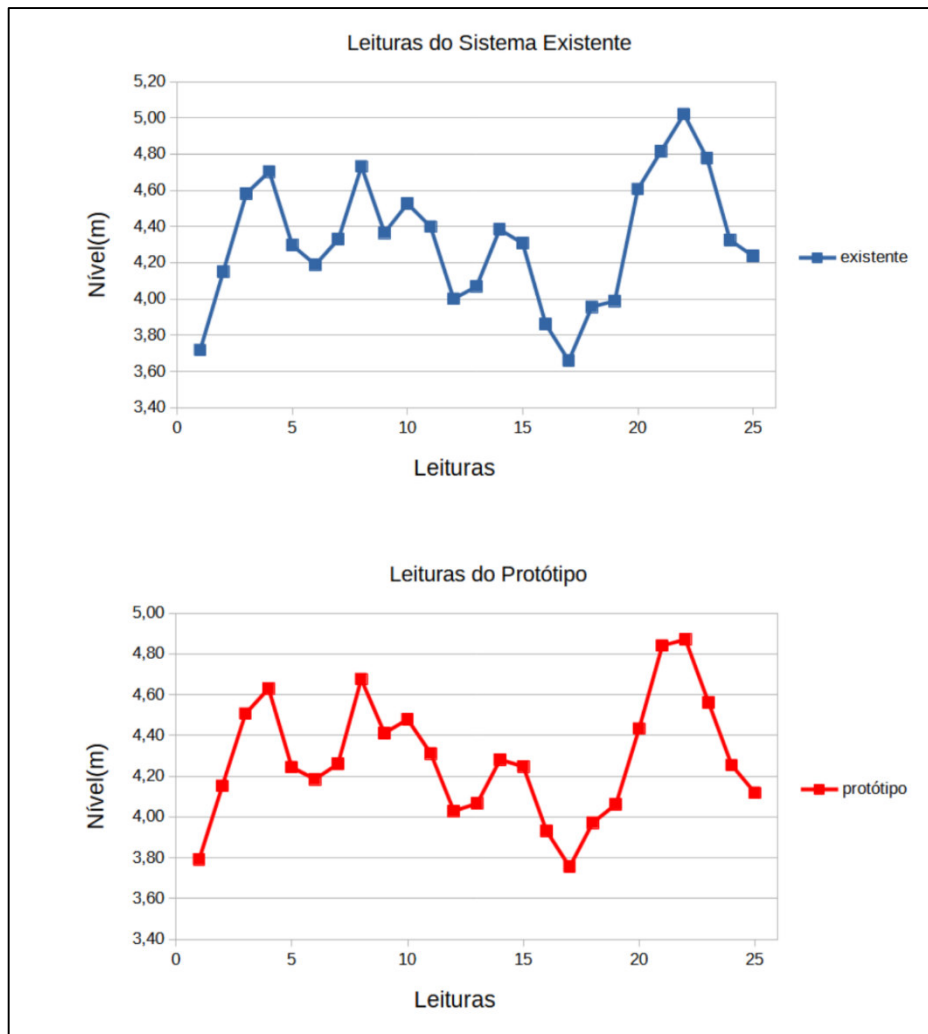


Figura 5. Gráficos comparativos das médias das leituras

Para fins de comparação, foram adotadas métricas estatísticas como a regressão linear simples e o coeficiente de determinação entre os dados coletados versus dados dos sensores instalados por empresa terceirizada. O resultado indicou uma correlação de 96,5%, o que indica uma ótima correspondência e confiabilidade dos dados gerados pelo sistema desenvolvido pelo LIT - SAEP em comparação com o sistema existente.

A Figura 6 apresenta o gráfico de dispersão geral, através do comparativo entre as leituras coletadas pelo sistema existente (eixo X) e as leituras coletadas pelo protótipo desenvolvido (eixo Y), evidenciando o coeficiente de determinação (R²).

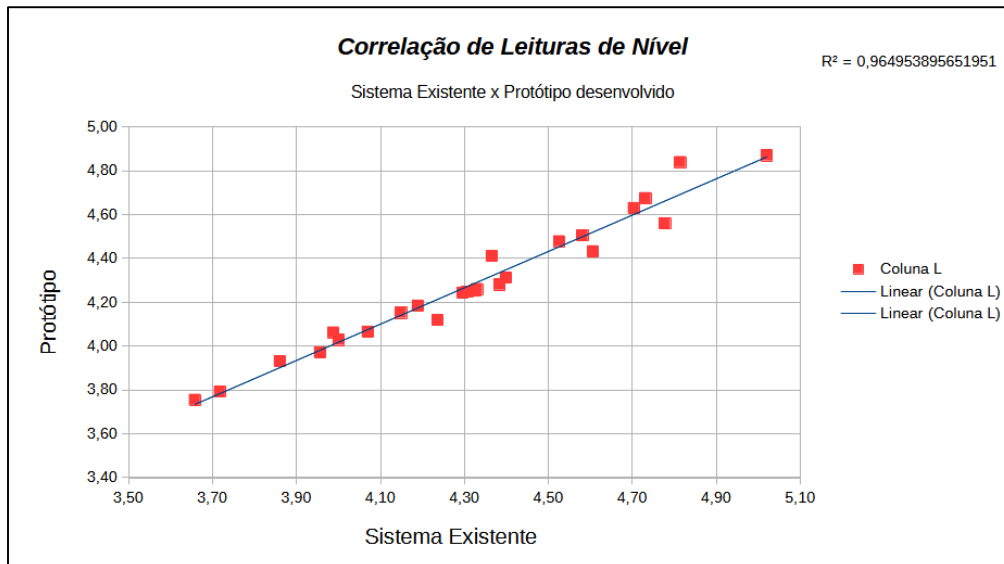


Figura 6.

Gráfico de correlação geral

Os resultados do teste de significância mostraram um p-valor de 0.6829, o que significa que a diferença entre os dados coletados pelo protótipo e o sistema comercial não é relevante do ponto de vista estatístico. Este resultado demonstra que o protótipo desenvolvido tem um desempenho tão confiável quanto o sistema comercial, com as leituras dos dois dispositivos apresentando uma forte correlação. A Tabela 3 apresenta um comparativo entre as duas tecnologias.

Tabela 3 – Comparativo entre indicadores de desempenho

Indicador de Desempenho	Sistema Comercial	Protótipo Desenvolvido
Precisão de Medição (sensor)	+/- 0,25% F.E.	+/- 0,25% F.E.
Custo Unitário de Implementação	R\$ 11.940,64	R\$ 850,00
Correlações entre Dados	96,5%	96,5%
Consumo de Energia	Médio	Baixo
Escalabilidade	Nula	Alta
Compatibilidade	Nula	Alta
Facilidade de Manutenção	Baixa	Alta



Estabilidade de Comunicação	Baixa	Alta
-----------------------------	-------	------

O sistema desenvolvido apresentou diversas vantagens em relação às soluções comerciais disponíveis no mercado. Entre os principais pontos positivos, destaca-se a significativa redução de custos, tanto na implementação, quanto na manutenção, eliminando a necessidade de pagamentos recorrentes de licenciamento e mensalidades. Além disso, sistemas comerciais de terceiros são de código fechado, impossibilitando a escalabilidade e a transferência de informações com outras plataformas.

A personalização do software e hardware permite otimizar o monitoramento de acordo com as necessidades específicas da Autarquia, garantindo maior precisão na gestão dos recursos hídricos. Além disso, a autonomia tecnológica adquirida pelo SAEP possibilita futuras expansões e adaptações sem depender de terceiros.

Durante os testes, observou-se que falhas nas antenas de comunicação das operadoras telefônicas, ocasionadas por intemperismos meteorológicos, podem afetar a disponibilidade da rede de telefonia móvel. Dessa forma, a fim de buscar uma completa independência na comunicação, futuramente poderá ser utilizada a tecnologia LoRa (Long Range), que permite o envio de dados ponto a ponto através de radiofrequência de longo alcance e baixa potência.

Outro ponto a ser aprimorado é a robustez do hardware, especialmente em ambientes mais agressivos, tais como estações de tratamento de esgoto, que ficam expostas a gases de efeito corrosivo. Por tanto, futuramente as placas cobreadas do circuito poderão ser submetidas a processos químicos de blindagem e isolamento, evitando sua corrosão.

Com base nos resultados obtidos, há ainda a possibilidade de explorar outras melhorias tecnológicas para aprimorar o sistema. O desenvolvimento de algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina, sendo executados no sistema embarcado, poderia otimizar a análise dos dados coletados, permitindo a detecção precoce de anomalias e a previsão de padrões de consumo e abastecimento.

Além disso, a incorporação de painéis solares e baterias para alimentação dos



dispositivos também é uma possibilidade a ser explorada, garantindo maior sustentabilidade e autonomia energética para os sensores instalados.

Por fim, a tecnologia mostrou-se eficiente ao ponto de poder ser aplicada em outras áreas do saneamento, como o monitoramento de parâmetros de estações de tratamento de água, de esgoto e o controle de qualidade da água. Além disso, o sistema poderá, futuramente, disponibilizar informações à população do município a fim de que esta acompanhe a qualidade da água distribuída, desde a captação até o emissário pós-tratamento de esgoto.

O sistema de monitoramento contínuo de reservatórios de água pode influenciar significativamente a gestão pública de longo prazo, otimizando a distribuição dos recursos hídricos e auxiliando na tomada de decisões. A visualização em tempo real do nível de água nos reservatórios, permite um controle preciso sobre o abastecimento, e contribui com o plano de combate de perdas. Além disso, a análise dos dados históricos ajuda a identificar padrões de consumo, possibilitando a previsão do consumo futuro, e na implantação de políticas públicas para diminuição do gasto de água [MORAIS, 2010].

A implantação da tecnologia desenvolvida neste estudo em outros municípios pode ser realizada de maneira eficiente, desde que sejam superados alguns desafios, como a capacitação adequada das equipes locais para operar e manter os sistemas. Além disso, é fundamental garantir a disponibilização de um servidor de hospedagem, o que exige a colaboração da equipe de tecnologia da informação local. Com esses requisitos atendidos, a adoção da tecnologia tende a ser relativamente simples.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A gestão eficiente dos recursos hídricos é essencial para garantir o abastecimento seguro de água e minimizar perdas em um contexto de desafios crescentes relacionados ao saneamento. A parceria entre o SAEP e a USP viabilizou uma abordagem inovadora e acessível, aliando o conhecimento acadêmico da universidade à expertise prática da autarquia, de forma a ratificar a importância da colaboração na busca por soluções inovadoras e acessíveis para os desafios do



saneamento.

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

Diante disso, o projeto abre caminho para futuras melhorias, incluindo a integração com redes de comunicação mais eficientes e o uso de inteligência artificial para análise preditiva. Além disso, a expansão da solução para outras áreas do saneamento, como o monitoramento da qualidade da água e do esgoto tratado, pode fortalecer ainda mais a gestão hídrica no município.

Futuramente serão testadas outras tecnologias de comunicação e transmissão de dados, a fim de que o sistema possa se tornar completamente independente de tecnologias de terceiros.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. *Brasil*, 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/ConstituicaoCompilado.htm>. Acesso em: 12 jan. 2025.

BRASIL. *Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento Básico*. Brasil, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14026.htm Acesso em: 20 jan. 2025.

RAO B. S., Gupta M. M., Sheikameer Batcha S. , Katherin Mathew S. , Ram M. S. and Imanbayeva Z., "**Deep Learning and Internet of Things (IoT) based Industrial Automation and Human Error Reduction**," 2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Coimbatore, India, 2022, pp. 917-923, doi: 10.1109/ICIRCA54612.2022.9985503.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization Statistics**. 2025. Disponível em:



<<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FS>>. Acesso em: 9 jan. 2025.

FERREIRA, J. G., Gomes, M. F. B., & Dantas, M. W. de A. (2021). **Desafios e controvérsias do novo marco legal do saneamento básico no Brasil** / Challenges and controversies of the new legal framework for basic sanitation in Brazil. Brazilian Journal of Development, 7(7), 65449–65468. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n7-019>

GONZALES, F.; Rodríguez, M. A.; Fernández, J. M. **Automação no tratamento de água: aplicações e vantagens**. Revista de Tecnologia e Saneamento, v. 7, n. 1, p. 23 -31, 2020.

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

LAZZARETTI, L. **Saneamento básico e sua influência sobre a saúde da população**. 2012. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/67761>>. Acesso em: 9 jan. 2025.

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.

MORAIS, D. C., Cavalcante, C. A. V., & Almeida, A. T. D. **Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água**. 2010. Pesquisa Operacional, 30, 15-32.

MÜLLER, M.; Voigt, K. I.; Schmitt, R. **Automação de processos e controle remoto no setor de saneamento: contribuições da Indústria 4.0**. 2018. Gestão de Recursos Hídricos, v. 32, n. 7, p. 2287-2301, 2018.

N. VIJAYAKUMAR and R. Ramya. "The real time monitoring of water quality in IoT



environment," 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7193080.

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

ONU. Organização das Nações Unidas. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil: Água potável e saneamento.** Brasília, 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>>. Acesso em: 12 jan. 2025.

QUILICI, F. A. (2023). **Importância da telemetria e da rastreabilidade: caso de aplicação em redes de distribuição de água.** 2023. 41 p. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2023.

SAEP. (2025). Serviço de Água e Esgoto de Pirassununga. Disponível em: <<https://www.saep.sp.gov.br/pagina/18/mananciais-que-abastecem-pirassununga>>. Acesso em: 6 fev. 2025.

VELKI. *Sonda de Nível Hidrostática—VKL-214.* 2025. Velki Instrumentos de Medição e Controle. Sonda de Nível Hidrostática – VKL-214. Disponível em: <https://velki.com.br/pt/produto/medidores-de-nivel-liquido/sonda-de-nivel-liquido-sonda-de-nivel-hidrostatica---vkl-214>