



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LUCAS MENEZES ALVES

**MONITORAMENTO DE CONSUMO E PERDA DE ÁGUA DE UMA
EDIFICAÇÃO COM DIFERENTES USOS**

JUAZEIRO DO NORTE

2026

LUCAS MENEZES ALVES

MONITORAMENTO DE CONSUMO E PERDA DE ÁGUA DE UMA
EDIFICAÇÃO COM DIFERENTES USOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Cariri, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares.

Coorientadora: Ma. Jaqueline Vígolo Coutinho

JUAZEIRO DO NORTE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Cariri
Sistema de Bibliotecas

A472m Alves, Lucas Menezes.
Monitoramento de consumo e perda de água de uma edificação com diferentes usos / Lucas Menezes Alves. – 2026.
85 f. : il. color.

Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências e Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte, CE,
2026.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares.
Coorientadora: Ma. Jaqueline Vígolo Coutinho.

1. Engenharia civil. 2. Recursos hídricos - Monitoramento. 3. Internet das Coisas (IoT).
4. Microcontroladores - ESP32. 5. Gestão da água - Sustentabilidade. I. Tavares, Paulo
Roberto Lacerda (Orient.). II. Coutinho, Jaqueline Vígolo (Coorient.). III. Universidade
Federal do Cariri. IV. Título.

CDD 628.17



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CARIRI
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Monitoramento de consumo e perda de água de uma edificação com diferentes usos

Lucas Menezes Alves

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Cariri, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Engenharia Civil.

Aprovada em 30 de março de 2026.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULO ROBERTO LACERDA TAVARES
Data: 30/03/2026 12:12:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda
Tavares
Orientador(a)

Documento assinado digitalmente
gov.br JAQUELINE VIGOLO COUTINHO
Data: 30/03/2026 12:24:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Msc. Jaqueline Vígolo
Coutinho
Coorientador(a)

Documento assinado digitalmente
gov.br AMANDA BEZERRA DE SOUSA PINO
Data: 02/04/2026 16:35:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Amanda Bezerra de Sousa
Pino
1º membro examinador

Documento assinado digitalmente
gov.br MAISA DE CALDA LOPES
Data: 30/03/2026 17:23:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Msc. Maísa de Calda Lopes
2º membro examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força para passar pelos momentos difíceis e pelos caminhos que abriu na minha vida.

Agradeço aos meus pais, Vanira e João Bosco, que me ensinaram a importância do caráter, da gentileza e do esforço, além de terem sempre apoiado os meus estudos. Um agradecimento especial para a minha mãe, que cuidou sozinha de mim e da minha irmã após ficar viúva, com muita dedicação e carinho. Ao meu pai, expresso minha gratidão por todos os ensinamentos e cuidado durante o tempo em que pôde estar conosco. Dedico a ambos este trabalho.

À minha tia, Vanezia, por ter sido como uma segunda mãe para mim, e ter sempre apoiado os meus estudos. Sem ela, eu não teria chegado até aqui, e com ela divido essa vitória.

À minha irmã, Manuela, que sempre foi um exemplo de força, coragem e esforço.

Aos meus avós, Raimunda e Waldemar, por estarem sempre presentes e por todo o apoio que sempre deram

À minha orientadora, Jaqueline, por todo o apoio, ensinamentos e paciência durante o tempo que trabalhamos juntos, e por ter me direcionado em minha vida acadêmica e profissional.

Ao meu orientador, Professor Paulo Roberto, por toda a ajuda no desenvolvimento do projeto, sendo um exemplo de profissionalismo e prontidão.

À minha psicóloga, Yane, pelo suporte durante minha jornada acadêmica, principalmente nos períodos mais difíceis, e pelos ensinamentos que irei levar por toda a vida.

Ao Levy, o Matheus, o Gabriel Dedes, o Vitor, o Weendyo, o Ycaro e o Hygor, pela amizade, apoio durante todo o período da faculdade e pelos momentos de descontração.

À Ingrid, o Raí, o Anderson, o Everton, a Mariana, o Eduardo, a Monalisa e a Polyandra, pela amizade e pelo apoio tanto no âmbito profissional quanto no acadêmico.

Ao Felype, o Pedro, o Lindemberg e o Felipe, pelo auxílio na realização do projeto que permitiu este trabalho ser realizado.

À Dinfra e a equipe da manutenção, que permitiram e auxiliaram na montagem do sistema de monitoramento.

À toda equipe da Coordenadoria de Gestão da Sustentabilidade e da Pró-reitoria de Planejamento e Orçamento, pela positividade e profissionalismo.

À Universidade Federal do Cariri, pela oportunidade de ingressar no ensino superior.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros
de gigantes”*

(Sir Isaac Newton)

RESUMO

O Cariri Cearense destaca-se dentre as suas regiões vizinhas por possuir os principais sistemas aquíferos do estado, responsáveis pelo abastecimento da maioria dos municípios com água subterrânea de boa qualidade. Contudo, o crescimento populacional e industrial na região tem intensificado a exploração e poluição desses recursos, exigindo a implementação de medidas de gestão e proteção para evitar a redução das reservas hídricas disponíveis. Para garantir essa finalidade, faz-se necessário o uso de ferramentas adequadas para uma administração efetiva dos sistemas de abastecimento de água, devido à variedade de sistemas com finalidades e particularidades distintas que os compõem. O avanço tecnológico das últimas décadas tornou praticável o uso de computadores e outros dispositivos avançados, como os microcontroladores, sensores e as redes de comunicação sem-fio, na automação dos sistemas de abastecimento de água. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo apresentar um sistema de monitoramento contínuo e remoto, com painel interativo, da variação do nível da lâmina d'água ao longo do tempo de um reservatório que atende a uma edificação de uma instituição de ensino superior no Cariri cearense, e calcular o consumo de água a partir dessa variação. Foi instalado no reservatório inferior do bloco I da Universidade Federal do Cariri um sistema de monitoramento do nível de água composto por uma placa ESP32 e um sensor ultrassônico de nível AJ-SR04M, que funcionou de maneira ininterrupta durante três meses. Nesse período, foi registrado durante todos os dias úteis o consumo de água no hidrômetro da edificação, para utilizar como parâmetro de referência para a calibração do código que seria desenvolvido. Foi desenvolvido um código que tratava os dados registrados pelo sensor, e calculava o consumo de água a partir deles. Os resultados obtidos demonstraram uma eficácia crescente do código em tratar os dados de nível da água, diminuindo bastante o ruído das leituras. Porém, o cálculo do consumo de água ficou aquém do esperado, sendo necessário séries históricas maiores para ajustar a sensibilidade do sistema. As informações coletadas durante o estudo foram utilizadas para o desenvolvimento de um painel no Looker Studio, onde foram expostos a variação do nível de água do reservatório inferior ao longo do tempo e o consumo de água obtido nas leituras do hidrômetro. O painel mostrou-se uma ferramenta eficaz e acessível de observar a variação do nível da água no reservatório e o consumo de água predial. Concluiu-se que o sistema tem grande potencial para o monitoramento do nível de água no reservatório inferior, e que o painel é uma ferramenta eficaz para o acompanhamento de forma remota do consumo da edificação e variação do nível de água no reservatório.

Palavras-chave: ESP32, AJ-SR04M, Looker Studio, consumo, nível de água, hidrômetro

ABSTRACT

Cariri Cearense stands out among its neighboring regions for possessing the state's main aquifer systems, which supply most municipalities with high-quality groundwater. However, population and industrial growth in the region has intensified the exploitation and pollution of these resources, requiring the implementation of management and protection measures to prevent a reduction in available water reserves. To ensure this, it is necessary to use appropriate tools for the effective management of water supply systems, given the variety of systems with distinct purposes and characteristics that comprise them. Technological advances in recent decades have made it feasible to use computers and other advanced devices, such as microcontrollers, sensors, and wireless communication networks, in the automation of water supply systems. Thus, the objective of this study was to present a continuous and remote monitoring system, with an interactive dashboard, to track changes in the water level over time in a reservoir serving a building at a higher education institution in the Cariri Cearense, and to calculate water consumption based on these changes. A water level monitoring system consisting of an ESP32 board and an AJ-SR04M ultrasonic level sensor was installed in the lower reservoir of Block I at the Universidade Federal do Cariri, where it operated continuously for three months. During this period, water consumption was recorded every weekday using the building's water meter, to serve as a reference parameter for calibrating the code to be developed. A code was developed to process the data recorded by the sensor and calculate water consumption based on it. The results demonstrated the code's increasing effectiveness in processing water level data, significantly reducing reading noise. However, the calculation of water consumption fell short of expectations, requiring longer time series to adjust the system's sensitivity. The information collected during the study was used to develop a dashboard in Looker Studio, which displayed the variation in the water level of the lower reservoir over time and the water consumption obtained from the water meter readings. The dashboard proved to be an effective and accessible tool for monitoring water level variations in the reservoir and building water consumption. It was concluded that the system has great potential for monitoring the water level in the lower reservoir, and that the dashboard is an effective tool for remotely tracking the building's water consumption and changes in the reservoir's water level.

Keywords: ESP32, AJ-SR04M, Looker Studio, consumption, water level, hydrometer

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidor de vazão de restrição para escoamentos internos.....	23
Figura 2 - Placa de orifício montada entre flanges com tomada flange taps.....	23
Figura 3 - Representação de um venturímetro.....	24
Figura 4 - Representação esquemática do funcionamento dos medidores eletromagnéticos.....	25
Figura 5 - Medidor de vazão ultrassônico a efeito Doppler.....	25
Figura 6 - Montagem interna do dispositivo (1) e Instalação externa (2).....	26
Figura 7 - Representação da arquitetura do sistema medição e controle do nível d'água em reservatório.....	26
Figura 8 - Resumo gráfico da pesquisa, expondo o funcionamento do sistema em laboratório e em campo.....	27
Figura 9 - Modelo reduzido para simulação de transferência de água entre reservatórios.....	28
Figura 10 - Painel de controle da aplicação web desenvolvido por Alves (2015).....	34
Figura 11 - Painel descritivo desenvolvido por Nascimento Júnior (2024).....	35
Figura 12 - Tela de monitoramento e controle do dashboard desenvolvido por Jonas (2024).....	36
Figura 13 - (a) Interface principal do painel. (b) Tabela de consumo e valor da fatura mensais..	36
Figura 14 - Localização da área de estudo.....	38
Figura 15 - (a) Abrigo do hidrômetro. (b) Hidrômetro do bloco I.....	39
Figura 16 - Estrutura física do sistema.....	40
Figura 17 - Representação detalhada da estrutura física do sistema.....	40
Figura 18 - Fluxograma do processo seguido pelo sistema de monitoramento.....	42
Figura 19 - (a) Destaque aos componentes do sistema de monitoramento. (b) Esquema de circuito do sistema desenvolvido (Da Silva et al., 2024).....	44
Figura 20 - Sensor de nível ultrassônico AJ-SR04M.....	44
Figura 21 - Abrigo do componentes sensíveis do sistema.....	45
Figura 22 - (a) Caixa de inspeção do reservatório inferior. (b) Caixa de fixação do sensor.....	45
Figura 23 - Variação do nível da lâmina d'água do período de testes completo (dados brutos)...	51
Figura 24 - Variação do nível da lâmina d'água no mês de setembro, em cm.....	52
Figura 25 - Variação do nível da lâmina d'água no mês de outubro, em cm.....	52
Figura 26 - Variação do nível da lâmina d'água no mês de novembro, em cm.....	53
Figura 27 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados durante o período completo.....	53
Figura 28 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados no mês de setembro.....	54
Figura 29 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados no mês de outubro.....	54
Figura 30 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados no mês de novembro.....	55
Figura 31 - Gráfico do consumo em função do tempo (setembro).....	60
Figura 32 - Gráfico do consumo em função do tempo (outubro).....	61
Figura 33 - Gráfico do consumo em função do tempo (novembro).....	62
Figura 34 - Gráfico do consumo em função do tempo (série histórica completa).....	63
Figura 35 - Painel de monitoramento remoto do consumo e nível de água.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Retirada e consumo de água: 2023 e projeção 2030.....	17
Tabela 2 - Retirada de água por tipo de uso no Nordeste brasileiro.....	18
Tabela 3 - Demandas hídricas na Bacia Sedimentar do Araripe na RHS.....	18
Tabela 4 - Distribuição das captações por tipo e por município, cadastradas na RH do Salgado.....	19
Tabela 5 - Valores de referência das vazões do hidrômetro.....	39
Tabela 6 - Faixa de medição adotada como referência.....	48
Tabela 7 - Valores para interpretação do coeficiente de Pearson e do coeficiente de Spearman.....	49
Tabela 8 - Análise estatística dos dados filtrados, em cm.....	55
Tabela 9 - Valores de cota da lâmina d'água inicial e final.....	56
Tabela 10 - Análise estatística do consumo calculado a partir do hidrômetro, em m³.....	58
Tabela 11 - Análise estatística do consumo calculado pelo código no Python, em m³.....	59
Tabela 12 - Correlação estatística entre os dados do hidrômetro e do código.....	59

LISTA DE VARIÁVEIS E DIMENSÕES

$Q = \text{vazão (L}^3 \cdot \text{T}^{-1}\text{)}$

$V = \text{volume (L}^3\text{)}$

$t = \text{tempo (T)}$

$U = \text{velocidade de escoamento (L} \cdot \text{T}^{-1}\text{)}$

$S = \text{área de seção transversal (L}^2\text{)}$

$Z = \text{energia ou carga de posição (L)}$

$P = \text{pressão (M} \cdot \text{T}^{-2} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$

$\gamma = \text{peso específico do fluido (M} \cdot \text{T}^{-2} \cdot \text{L}^{-2}\text{)}$

$\alpha = \text{coeficiente de Coriolis (adimensional)}$

$\Delta h = \text{perda de carga (L)}$

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Vazão volumétrica.....	21
Equação 2 - Cálculo da vazão a partir da velocidade de escoamento e área de seção do duto	21
Equação 3 - Equação de Bernoulli.....	22
Equação 4 - Erro Absoluto Médio.....	29
Equação 5 - Erro Absoluto Médio em formato percentual.....	29
Equação 6 - Raiz do Erro Quadrático Médio.....	29
Equação 7 - Raiz do Erro Quadrático Médio em formato percentual.....	30
Equação 8 - Erro Médio por Viés.....	30
Equação 9 - Erro Médio por Viés em formato percentual.....	31
Equação 10 - Coeficiente de Correlação de Pearson.....	32
Equação 11 - Coeficiente de Correlação de Spearman.....	32
Equação 12 - Conjunto das leituras de distância do sensor.....	46
Equação 13 - Cálculo do intervalo interquartilico (IQR).....	46
Equação 14 - Limite inferior do envelope de aceitação de medições.....	46
Equação 15 - Limite superior do envelope de aceitação de medições.....	46
Equação 16 - Média agregada por janela de medição.....	47
Equação 17 - Transformação do rebaixamento da lâmina d'água em volume.....	47
Equação 18 - Cálculo do volume diário.....	47
Equação 19 - Erro Máximo Admissível.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Problemática.....	14
1.2 Objetivos.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Usos da água.....	16
2.2 Técnicas de medição de vazão.....	21
2.2.1 Métodos diretos.....	22
2.2.2 Medidores de restrição para escoamentos internos.....	22
2.2.3 Medidores lineares.....	24
2.2.4 Automação do monitoramento do consumo de água.....	25
2.1 Calibração, simulação e validação.....	28
2.1.1 Calibração.....	28
2.1.2 Simulação.....	33
2.1.3 Validação.....	33
2.2 Painéis de monitoramento remoto do consumo e nível de água.....	34
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Área de estudo.....	37
3.2 Sistema de monitoramento de consumo e nível d'água.....	38
3.2.1 Hidrômetro.....	38
3.2.2 Sistema de medição de consumo e nível d'água.....	39
3.2.2.1 Componentes físicos do sistema (hardware).....	43
3.2.2.2 Depuração dos dados.....	45
3.2.2.3 Análise de correlação estatística.....	48
3.2.2.4 Envio dos dados.....	50
3.2.3 Painel no Looker Studio.....	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1 Monitoramento do nível de água do reservatório.....	51
4.2 Monitoramento do consumo de água.....	57
4.2.1 Setembro/2025.....	60
4.2.2 Outubro/2025.....	61
4.2.3 Novembro/2025.....	62
4.2.4 Série histórica completa.....	63
4.3 Ferramenta de monitoramento contínuo - Painel Looker Studio.....	64
4.4 Conclusão.....	66
REFERÊNCIAS.....	68
APÊNDICE A - Tabela do registro das medições do hidrômetro do Bloco I.....	77
APÊNDICE B - Tabela do consumo calculado pelo código em Python, em metros cúbicos	81
APÊNDICE C - Tabela do pareamento entre os dados do código e do hidrômetro.....	83

1 INTRODUÇÃO

Devido aos seus diversos usos possíveis, a água é um elemento que, além de possuir um papel fundamental na manutenção da qualidade dos sistemas ambientais, também é um recurso e um dos insumos mais importantes para as atividades socioeconômicas da humanidade (Magalhães Júnior, 2017). Nesse contexto, é de suma importância manter um controle sobre o consumo desse recurso, principalmente em áreas que passam por períodos de estiagem, como é o caso do semiárido.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o semiárido é uma região onde a precipitação anual P varia no intervalo $200 \text{ mm} < P < 500 \text{ mm}$ (Verheye, 2009). O semiárido brasileiro, especificamente, é caracterizado por taxas elevadas de insolação e temperatura, e amplitudes térmicas baixas. Os totais pluviométricos são baixos e variam bastante no tempo e no espaço. Como consequência desses fatores, o semiárido apresenta elevada evapotranspiração e um expressivo déficit hídrico (Zanella, 2014). Segundo a Portaria Nº 89, de março de 2005, do Ministério da Integração Nacional, o estado do Ceará possui aproximadamente 86,8% da sua área dentro do semiárido brasileiro (INESP, 2008).

O Ceará é dividido em 14 regiões de planejamento, isto é, áreas que são delimitadas com o intuito de aperfeiçoar as atividades de planejamento, monitoramento e implementação de políticas públicas de maneira regionalizada. Estas regiões são: Cariri, Centro Sul, Grande Fortaleza, Litoral Leste, Litoral Norte, Litoral Oeste/ Vale do Curu, Maciço de Baturité, Serra da Ibiapaba, Sertão Central, Sertão de Canindé, Sertão dos Crateús, Sertão dos Inhamuns, Sertão de Sobral e Vale do Jaguaribe (IPECE, 2015).

Dentre as regiões do Ceará, a região do Cariri distingue-se das outras quanto ao potencial hídrico subterrâneo (Lopes, 2005). Estando localizado na Bacia do Araripe, o Cariri destaca-se por possuir os principais sistemas aquíferos do estado, responsáveis pelo abastecimento da maioria dos municípios com água subterrânea de boa qualidade (Araújo *et al.*, 2008). Contudo, o crescimento populacional e industrial na região tem intensificado a exploração e poluição desses recursos, exigindo a implementação de medidas de gestão e proteção para evitar a redução das reservas hídricas disponíveis (Cavalcante e Veríssimo, 2011).

Diante desse cenário, fica a cargo dos profissionais responsáveis pelo planejamento, desenvolvimento, implantação, operação e gerenciamento das instalações de abastecimento de água entender e levar em consideração essa situação durante a sua atuação. As instalações que

têm como finalidade prover o abastecimento de água para a população, devem ser capazes de fornecer água tanto com qualidade quanto com regularidade adequada, respeitando as demandas atuais e futuras (Heller, 2016, p. 29).

Para garantir essa finalidade, faz-se necessário o uso de ferramentas adequadas para uma administração efetiva dos sistemas de abastecimento de água, devido à variedade de sistemas com finalidades e particularidades distintas que os compõem (Melnik, 2015). Devido ao avanço tecnológico nas últimas décadas, por meio da engenharia eletrônica, tornou-se praticável o desenvolvimento de computadores e outros dispositivos avançados, como os microcontroladores e sensores, para uso na automação dos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário (Silva; Tsutiya, 2006, p. 577).

O surgimento dessas inovações, aliado à ascensão das redes de comunicação sem-fio, geraram uma revolução que foi amplamente adotada pelo setor de gestão estratégica da água (Taormina *et al.*, 2017; Raza e Moazeni, 2025). O sucesso na difusão dessas tecnologias se deu principalmente devido à necessidade de eficiência nos sistemas de distribuição de água, por conta da demanda crescente resultante do aumento populacional (Raza e Moazeni, 2025). Esse avanço se reflete na aprimoração do monitoramento das redes de distribuição, através da automatização de medições em tempo real de pressão, vazão e nível d'água, e em razão disso, o uso de modelagem hidráulica com o intuito de aumentar a eficiência desse sistema (Righetto, 2001; Melo; Henrique, 2018).

Portanto, fica clara a importância de um bom acompanhamento da vazão de consumo, do nível de água e das perdas para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos disponíveis de uma rede de abastecimento, e a integração de ferramentas de automação pode desempenhar um papel fundamental nessa tarefa. Ademais, é possível realizar esse monitoramento através da programação em computadores, do uso de microcontroladores em conjunto com sensores com capacidade para medir as variáveis desejadas, e uso de dispositivos para armazenamento dos dados obtidos (Torres *et al.*, 2015).

1.1 Problemática

É inegável a importância que a água desempenha na manutenção da vida na Terra e na sociedade. No entanto, a maior parte da água presente no globo terrestre não é própria para o consumo humano. Aproximadamente 75% da superfície do planeta é coberta por água salgada, que se encontra nos oceanos. Quanto à água doce, cerca de 3% são adequadas ao consumo humano (Sekyere *et al.*, 2020; Aragão; Pereira; Silva, 2022).

Embora o Brasil tenha o privilégio de deter cerca de 13% de toda a água doce

disponível no mundo, este ainda possui uma parte considerável do seu território enfrentando a escassez de água, o que pode ser causado por dois fatores principais: condições climáticas ou alto consumo populacional (Costa *et al.*, 2021). O semiárido, tipo climático que abrange a maior parcela do território do Ceará, tem como principal característica sua baixa disponibilidade de água, ocasionada pela inconstância do seu regime de chuvas e por períodos de estiagem extensos. Esse panorama reforça a importância da questão do desperdício de água, diante da condição climática que a região enfrenta (Monteiro *et al.*, 2020).

O uso eficiente e sustentável da água passa pela redução do desperdício, que depende de um monitoramento preciso da vazão de consumo e dos níveis de água do reservatório. Uma medição correta dos volumes de água torna-se uma importante aliada no enfrentamento das perdas, porque torna possível identificar os volumes reais utilizados no lugar da aplicação de taxas a partir do consumo médio, além de auxiliar na descoberta de vazamentos (Pereira; Ilha, 2008).

Em soluções alternativas de abastecimento de água, que se utilizam de poços, o monitoramento do consumo e da perda de água pode auxiliar na tomada de decisões do uso sustentável desse recurso. Dessa forma, este trabalho objetiva apresentar um sistema de monitoramento contínuo e remoto, com painel interativo, da variação do nível da lâmina d'água ao longo do tempo de um reservatório abastecido por poço, que atende a uma edificação de uma instituição de ensino superior no Cariri Cearense, e calcular o consumo de água a partir dessa variação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

- Desenvolver painel para monitorar remotamente o consumo de água e a variação do nível de água no reservatório inferior de uma edificação com diferentes usos de água em uma instituição de ensino superior.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver código em Python para reduzir os ruídos nas leituras realizadas pelo sensor ultrassônico de nível;
- Calibrar o sistema com base no consumo de água diário registrado nos hidrômetros do edifício e na fundamentação estatística;
- Monitorar o consumo de água da edificação durante o período de estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Usos da água

O crescimento da demanda por água pode ser influenciado por diversos fatores, como questões econômicas, ambientais ou climáticas. A cada dia que passa, a preocupação com os usos da água aumenta, pois a demanda por ela cresce proporcionalmente ao crescimento da população e à produção de bens de consumo (Collischonn e Dornelles, 2013; ANA, 2023).

Os tipos de uso da água geralmente são classificados em consuntivos ou não consuntivos. Os usos consuntivos alteram consideravelmente a quantidade de água disponível para outros consumidores. Um exemplo é a irrigação, visto que somente uma pequena parcela da água utilizada na lavoura retorna como escoamento. Por outro lado, os usos não consuntivos pouco alteram a quantidade, mas podem provocar alterações na qualidade da água. Um exemplo é o uso em usinas hidrelétricas, onde a água é utilizada para movimentar as turbinas da usina, porém não sofre mudança em sua quantidade (Collischonn e Dornelles, 2013, p. 14).

Segundo dados da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico - ANA (2022), os principais usos da água no Brasil são para irrigação de lavouras, abastecimento público, atividades industriais, geração de energia, extração mineral, aquicultura, navegação, turismo e lazer. Cada um desses usos é tanto dependente de condições específicas de quantidade e qualidades da água, quanto pode afetar essas condições em si (ANA, 2022).

No Brasil, a demanda por água vem aumentando de maneira ininterrupta ao longo dos anos, em especial para o abastecimento urbano, a indústria de transformação e a agricultura irrigada, que juntos representam aproximadamente 83% do total retirado (ANA, 2024). Estima-se um aumento nas retiradas de água até 2040 de 42%, com o volume retirado crescendo de 1.947 m³/s para 2.770 m³/s, equivalente a uma ampliação de 26 trilhões de litros anuais explorados dos mananciais (ANA, 2021; Barbosa, 2023).

Na Tabela 1, estão representados os usos consuntivos da água no Brasil no ano de 2023 e a projeção para o ano de 2030, considerando o aumento populacional e estrutura de 5.570 municípios. Dentre esses tipos de uso, a irrigação, a termoeletricidade e alguns tipos de indústria apresentam uma forte sazonalidade, isto é, seu consumo pode variar de maneira expressiva entre os meses de um mesmo ano (ANA, 2024).

Tabela 1 - Retirada e consumo de água: 2023 e projeção 2030

Principais usos consuntivos	2023		Projeção 2030	
	Retirada	Consumo	Retirada	Consumo
Total	2.252,64 (m ³ /s)	1.236,81 (m ³ /s)	2.571,47 (m ³ /s)	1.448,78 (m ³ /s)
Abastecimento Urbano	23,3%	8,5%	21,5%	7,6%
Abastecimento Rural	1,5%	2,13%	1,2%	1,75%
Indústria	10,3%	10,13%	11,9%	11,4%
Irrigação	50,3%	66,4%	51,1%	66,7%
Mineração	1,9%	1%	2,2%	1,1%
Termoelétrica	4,2%	-	3,64%	-
Uso animal	8,5%	11,5%	8,5%	11,2%

Fonte: Adaptado da ANA (2023); Barbosa (2023)

Levando em consideração as diferentes regiões brasileiras, a oferta de água apresenta características e desafios distintos. Isso se deve a distinções geográficas, climáticas, demográficas e de gestão (Barbosa, 2023). No Nordeste brasileiro, a presença de solos rasos, um embasamento cristalino que frequentemente pode ser visto à superfície, a alta evaporação e um regime de precipitações caracterizado por uma alta variabilidade espaço temporal, resultam em um déficit no balanço hídrico em quase todos os meses do ano (Martins *et al*, 2012). O balanço hídrico representa a diferença entre entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica (Collischonn e Dornelles, 2013, p. 31).

Quanto ao consumo de água, sete estados da região expuseram valores inferiores ao valor de referência fornecido pela ONU (110 L/hab./dia), sendo estes Piauí (PI), Rio Grande do Norte (RN), Paraíba (PB), Pernambuco (PE), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA). Destes, Pernambuco, Bahia e Alagoas apresentaram os menores consumos, com 95,3 L/hab./dia, 93,8 L/hab./dia e 87,9 L/hab./dia, respectivamente (ANA, 2019b; Barbosa, 2023). Na Tabela 2, estão listadas as principais demandas por água no Nordeste brasileiro, por estado, destacando aqui o estado do Ceará. Tratando-se de retirada, os usos mais significativos são a irrigação e o abastecimento urbano, correspondendo a 64% e 20% da retirada total, respectivamente (Maranhão e Ayrimoraes, 2012).

Tabela 2 - Retirada de água por tipo de uso no Nordeste brasileiro

UF	Animal	Industrial	Irrigação	Rural	Urbano	Total
	Retirada (m ³ /s)	Retirada (m ³ /s)	Retirada (m ³ /s)	Retirada (m ³ /s)	Retirada (m ³ /s)	Retirada (m ³ /s)
BA	8,4	8,2	89,5	5,2	24,1	135,4
PE	1,9	8,2	53,7	1,6	18,4	83,7
CE	2,2	9,7	44,6	1,9	13,4	71,8
RN	0,8	2,6	30,7	0,7	6,8	41,6
AL	0,7	4,1	28,9	0,8	4,5	39,0
MA	4,6	1,4	18,4	2,1	9,7	37,2
PB	0,9	2,5	17,7	0,8	6,5	28,4
PI	1,9	1,2	7,8	0,9	5,1	16,9
SE	0,7	1,3	6,2	0,5	4,0	12,6
Total	22,1	39,2	297,5	14,5	92,5	465,8

Fonte: Adaptado de Maranhão e Ayrimoraes (2012)

Na Bacia Sedimentar do Araripe (BSA), onde o município de Juazeiro do Norte, Ceará, está localizado, a maior demanda hídrica se dá pela irrigação, seguida pelo abastecimento humano e uso industrial (COGERH, 2025). Na Tabela 3, estão listadas as vazões referentes às demandas de cada tipo de consumo para o ano de 2017. A BSA é uma das formações geológicas que compõem a Região Hidrográfica do Salgado (RHS), sendo a outra formação geológica que compõe a esta última um embasamento cristalino (COGERH, 2025). A BSA corresponde a aproximadamente 15% do território da RHS e o embasamento cristalino corresponde a 85%, sendo na BSA onde estão localizados os melhores aquíferos da região (COGERH, 2007; Ribeiro; Lima; Marçal, 2010).

Tabela 3 - Demandas hídricas na Bacia Sedimentar do Araripe na RHS

Uso	Vazão			
	m ³ /ano	m ³ /h	m ³ /s	L/s
Abastecimento Humano e Uso Industrial	50.651.664	5.782,15	1,61	1.606,15
Irrigação	72.090.271	8.229,48	2,29	2.285,97
Dessedentação Animal	3.741.052	427,06	0,12	118,63

Fonte: Adaptado da Cogeh (2017); Cogeh (2025)

Tabela 3 - Demandas hídricas na Bacia Sedimentar do Araripe na RHS (Continuação)

Uso	Vazão			
	m³/ano	m³/h	m³/s	L/s
Demais Usos	936.220	106,87	0,03	29,69
Total	127.419.207	14.545,57	4,04	4.040,44

Fonte: Adaptado da Cogerh (2017); Cogerh (2025)

Como boa parte da BSA está situada sobre formações sedimentares, há um grande potencial para formação de aquíferos na região. Isso se reflete no tipo de exploração dos recursos hídricos na sub-bacia em questão, que apresenta uma grande quantidade de outorgas para captação de recursos hídricos subterrâneos, tanto através de fontes quanto de poços (Santos *et al.*, 2024). Na Tabela 4, são expostos os tipos de captação subterrânea em cada um dos municípios que compõem a bacia, com destaque para Juazeiro do Norte. Como pode ser observado na tabela, o município de Juazeiro do Norte tem a sua captação de água subterrânea feita quase que exclusivamente por poços.

Tabela 4 - Distribuição das captações por tipo e por município, cadastradas na RH do Salgado

Ordem	Municípios	Formação	Poços	Poços amazonas	Fontes	Total
1	Abaiara	Sedimentar	82	1	0	83
2	Aurora	Cristalino	75	9	0	84
3	Baixio	Cristalino	71	2	0	73
4	Barbalha	Sedimentar	307	2	35	343
5	Barro	Sedimentar	104	1	0	105
6	Brejo Santo	Cristalino	349	3	11	365
7	Caririaçu	Cristalino	45	1	0	46
8	Cedro	Cristalino	186	3	0	189
9	Crato	Sedimentar	476	6	88	553
10	Granjeiro	Cristalino	26	1	0	27
11	Icó	Cristalino	199	2	0	201
12	Ipaumirim	Cristalino	80	1	0	81

Fonte: Adaptado de Poços (CPRM/SIAGAS, 2022), Poços Amazonas (Ceará, 2009), Fontes (COGERH, 2016); Cogerh (2025)

Tabela 4 - Distribuição das captações por tipo e por município, cadastradas na RH do Salgado (Continuação)

Ordem	Municípios	Formação	Poços	Poços amazonas	Fontes	Total
13	Jardim	Sedimentar	123	1	26	166
14	Jati	Cristalino	68	1	0	69
15	Juazeiro do Norte	Sedimentar	591	3	0	594
16	Lavras da Mangabeira	Cristalino	198	2	0	200
17	Mauriti	Sedimentar	398	1	0	400
18	Milagres	Sedimentar	199	1	0	200
19	Missão Velha	Sedimentar	264	2	54	318
20	Orós	Cristalino	72	0	0	72
21	Penaforte	Cristalino	63	0	0	63
22	Porteiras	Sedimentar	122	1	26	162
23	Umari	Cristalino	50	1	0	51
24	Várzea Alegre	Cristalino	63	1	0	64
Total de captações		-	4211	46	240	4509

Fonte: Adaptado de Poços (CPRM/SIAGAS, 2022), Poços Amazonas (Ceará, 2009), Fontes (COGERH, 2016); Cogerh (2025)

A compreensão destes dados é essencial para a elaboração de um plano de uso racional da água, evitando o seu isolamento dos planos subsequentes. Através da caracterização dos tipos de uso da água e da sua disponibilidade, podem ser elaborados planos de reabilitação e conservação de mananciais, redução do consumo de energia, coleta e tratamento de esgoto, reúso da água e aproveitamento da água da chuva, e controle e redução de perdas, contribuindo para uma gestão eficiente e sustentável (Silva, 2006, p. 561).

Além disso, o estabelecimento de uma rede de monitoramento em tempo real, que registra dados da vazão e qualidade de água e os envia para centrais de processamento e informação, criam a possibilidade de analisar tendências e elaborar cenários verossímeis de forma estável e avançada (Tundisi, 2006), permitindo a preparação antecipada para ocorrências extremas, tais como períodos de escassez hídrica.

2.2 Técnicas de medição de vazão

Segundo Brunetti (2008, p. 72), define-se vazão Q em volume por unidade de tempo, sendo o fluido que percorre uma certa seção de escoamento. As unidades de medida utilizadas para mensurá-la podem ser m^3/s , L/s , m^3/h , L/min , ou qualquer outra unidade que corresponda a volume ou capacidade por unidade de tempo. No entanto, utiliza-se principalmente a convenção estabelecida pelo Sistema Internacional de Unidades (SI), que adota m^3/s como a unidade padrão para a medição de vazões. Abaixo está descrita a fórmula da vazão volumétrica (Eq. 1):

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Onde:

Q é a vazão ($\text{L}^3 \cdot \text{T}^{-1}$)

V é o volume (L^3)

t é o tempo (T)

Vários tipos de instrumentos foram desenvolvidos, partindo-se da equação de Bernoulli, com o intuito de medir a velocidade de escoamentos e vazões em massa (Munson; Young; Okiishi, 2004, p. 115). A partir do produto da velocidade de escoamento U pela área da seção transversal do duto, S , tem-se a vazão Q (Eq. 2):

$$Q = U \cdot S \quad (2)$$

Onde:

U é a velocidade de escoamento ($\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$)

S é a área da seção transversal do duto (L^2)

A equação de Bernoulli, por sua vez, é uma expressão particular da Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece a mudança de energia interna de um sistema como a soma da energia adicionada ao fluido com o trabalho realizado pelo fluido (Baptista e Coelho, 2002, p. 49). Para o escoamento de um fluido incompressível em regime permanente entre duas seções, esta lei é expressa da conforme descrito na Eq. 3:

$$\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g}\right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g}\right) = \Delta h \quad (3)$$

Onde:

Z_i é a energia ou carga de posição (L)

P_i é a pressão ($M \cdot T^{-2} \cdot L^{-1}$)

γ é o peso específico do fluido ($M \cdot T^{-2} \cdot L^{-2}$)

α_i é o coeficiente de Coriolis (adimensional, de valor igual a 1 para escoamentos turbulentos e 2 para escoamentos laminares)

U_i é a velocidade de escoamento ($L \cdot T^{-1}$)

g é a aceleração da gravidade ($L \cdot T^{-2}$)

Δh é a perda de carga (L)

A medição da vazão é de extrema importância em diversos setores diferentes, como nos serviços públicos de abastecimento e saneamento, e na indústria. Dentre as variáveis que precisam ser medidas com maior frequência, a vazão é a que demanda maior uso de recursos tecnológicos, como medidores e transmissores (Delmée, 2003, p. 6).

2.2.1 Métodos diretos

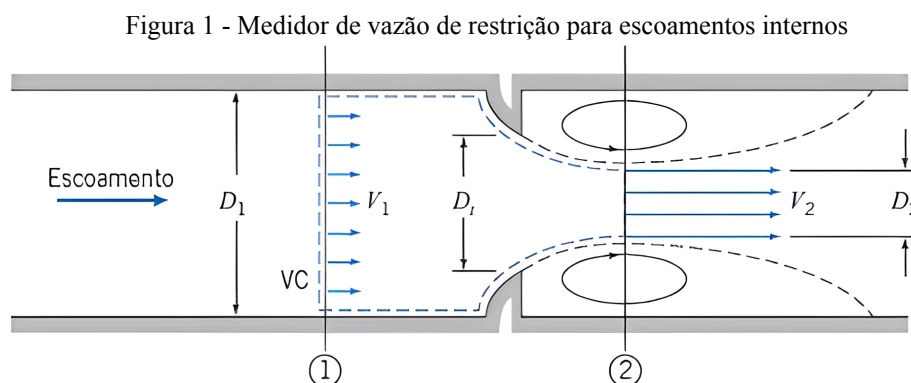
Consiste na medição da quantidade de fluido que se acumula em um recipiente após um período fixo de tempo. Neste método, podem ser utilizados tanques para achar a vazão de líquidos em escoamento permanente, através da medição do volume ou da massa obtida após um intervalo de tempo verificado. Em intervalos de tempo longos o suficiente, onde a incerteza pode ser reduzida, os valores das vazões podem ser encontrados com uma boa precisão (Fox *et al*, 2014, p. 386).

Em algumas aplicações mais exclusivas, especificamente no uso ou registro da vazão de maneira remota, podem ser utilizados os medidores de deslocamento positivo, onde o fluido, conforme atravessa o medidor, move um objeto como um disco oscilante ou um pistão alternativo. São exemplos desses instrumentos os medidores residenciais de água e de gás natural, cuja calibração é feita para que seja realizada a leitura direta em unidades do produto, ou as bombas de gás ou de gasolina, que a partir da medição calculam e disponibilizam os custos monetários totais do produto inserido no tanque do veículo (Fox *et al*, 2014, p. 387).

2.2.2 Medidores de restrição para escoamentos internos

Este tipo de medidor fundamenta-se na aceleração de uma corrente fluida através de

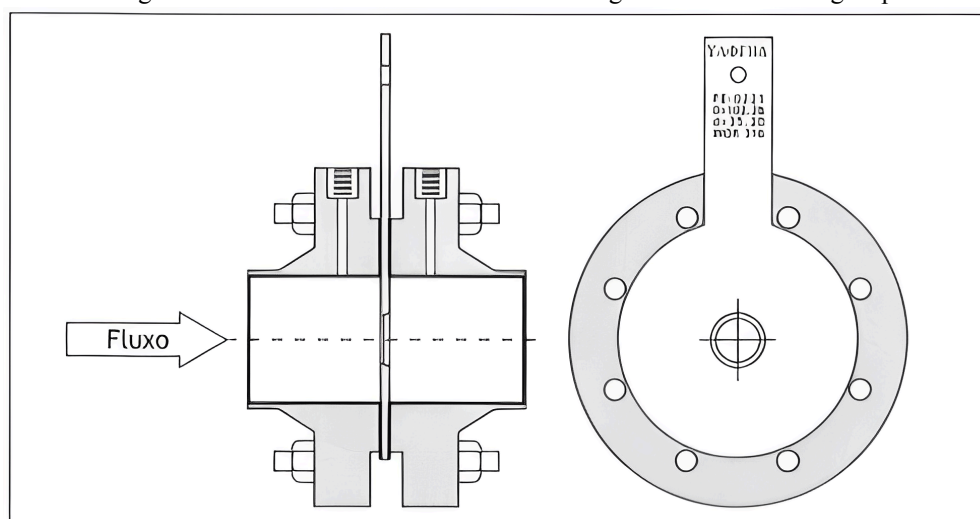
algum tipo de bocal, conforme ilustrado na Figura 1. Parte-se do princípio de que a variação da velocidade gera uma variação da pressão. Esta variação da pressão (Δp) pode ser medida utilizando-se um medidor de pressão diferencial (que pode ser mecânico ou eletrônico) ou um manômetro, e a vazão deduzida através de uma análise teórica ou de uma correlação experimental para o dispositivo em uso (Fox *et al.*, 2014, p. 387). Placa de venturi e venturímetro são exemplos desse tipo de dispositivo.



Fonte: Fox *et al.* (2014, p. 387)

A placa de orifício possui um bordo delgado, também chamado de aresta viva, com o intuito de que o fluido só faça contato com a aresta do orifício, reduzindo assim o atrito (Brunetti, 2008, p. 211) (Figura 2). As placas de orifício clássicas têm paredes finas e são concêntricas, produzidas utilizando chapas de aço inoxidável ou outros materiais que sejam compatíveis com o fluido a ser medido (Delmée, 2003, p. 67). Suas principais desvantagens são a capacidade limitada e a alta perda de carga permanente, devido à expansão não controlada a jusante do componente medidor (Fox *et al.*, 2014, p. 390).

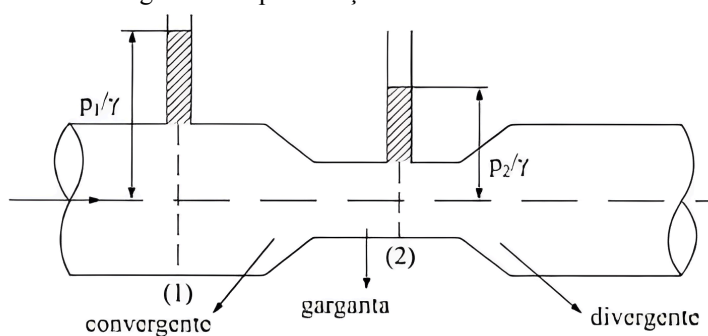
Figura 2 - Placa de orifício montada entre flanges com tomada flange taps



Fonte: Delmée (2003, p. 67)

O venturímetro ou tubo de venturi é formado por um tubo convergente que detém uma seção mínima nomeada de garganta (Brunetti, 2008, p. 216) (Figura 3). Em geral, os tubos de venturi são fundidos ou usinados com tolerâncias muito pequenas, para que possam exibir o desempenho do projeto-padrão. Devido a isso, eles são volumosos, pesados e onerosos. A seção do difusor cônico a jusante da garganta provê uma grande recuperação de pressão, o que resulta na baixa perda de carga total. Além disso, o venturímetro dispõe de auto limpeza por conta de seu contorno interno muito liso (Fox *et al*, 2014, p. 392).

Figura 3 - Representação de um venturímetro



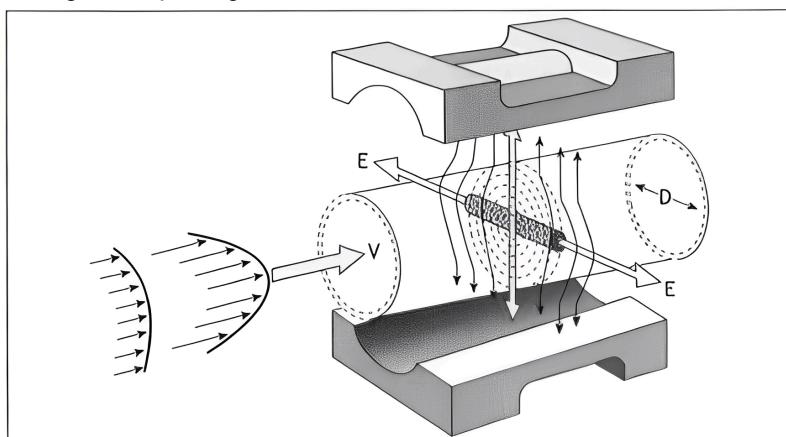
Fonte: Brunetti (2008, p. 216)

2.2.3 Medidores lineares

Os medidores lineares de vazão são aqueles que produzem sinais de saída diretamente proporcionais à vazão, sendo o fator de proporcionalidade constante ou aproximadamente constante na faixa de medição (Delmée, 2003, p. 173). Os medidores que se enquadram neste tipo não precisam medir a pressão diferencial para produzir sinais (Fox *et al*, 2014, p. 397).

O medidor eletromagnético de vazão se baseia no princípio da indução magnética (Figura 4). É gerado um campo magnético transversalmente ao tubo. Quando um fluido condutor atravessa este campo, ele provoca uma tensão elétrica em ângulo retos com relação aos vetores de velocidade e de campo. O sinal de tensão resultante é então detectado por eletrodos diametralmente opostos. Esse sinal de tensão é proporcional à velocidade média axial, no caso do perfil ser assimétrico (Fox *et al*, 2014, p. 398).

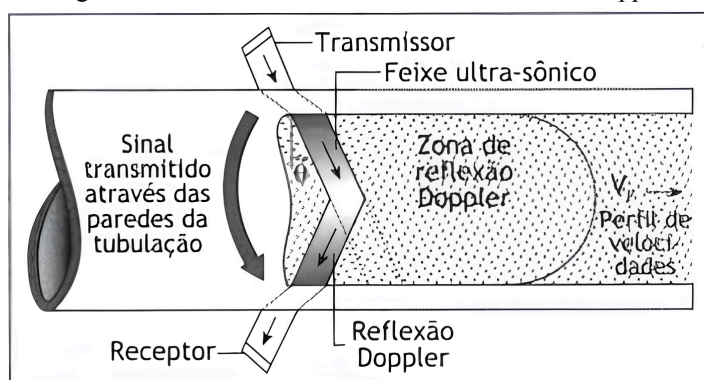
Figura 4 - Representação esquemática do funcionamento dos medidores eletromagnéticos



Fonte: Delmée (2003, p. 189)

Os medidores ultrassônicos foram desenvolvidos na segunda metade do século XX, para aplicações industriais (Figura 5). Uma das vantagens desta tecnologia é poder dirigir o feixe ultrassônico de maneira semelhante ao feixe de luz. E assim como o feixe de luz, o feixe ultrassônico também está sujeito aos fenômenos de refração, que se dá ao passar de um meio para o outro (sólido para líquido, por exemplo), e de reflexão total (Delmée, 2003, p. 223). Existem dois tipos principais de medidores ultrassônicos, com formas de operar distintas: para líquidos limpos, é medido o tempo de propagação, e para líquidos transportando partículas, é medido o desvio de frequência (Fox *et al*, 2014, p. 399).

Figura 5 - Medidor de vazão ultrassônico a efeito Doppler



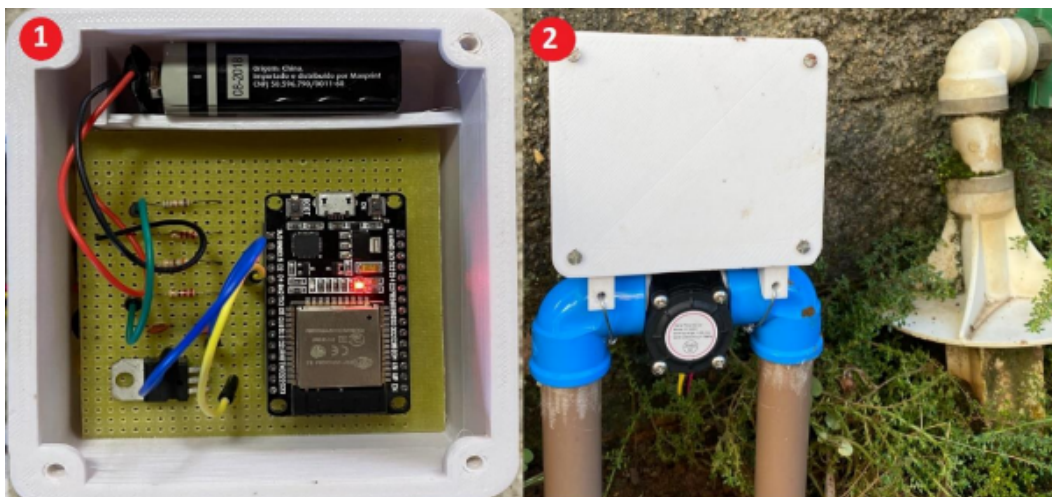
Fonte: Delmée (2003, p. 223)

2.2.4 Automação do monitoramento do consumo de água

O conceito de automação pode ser definido como o uso de máquinas ou softwares como alternativa às atividades manuais que englobam tomadas de decisão e a realização de ações específicas em determinadas situações (Ali, 2022). Existem várias pesquisas para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento automatizados, que permitem ao usuário ter

acesso às informações de consumo e nível d'água do reservatório de forma simples e rápida. Americo e Izidoro (2022) desenvolveram um protótipo utilizando um microcontrolador ESP32 e um sensor de vazão YF-S201 (Figura 6), onde os dados são enviados para um servidor, tornando-se acessíveis para o usuário.

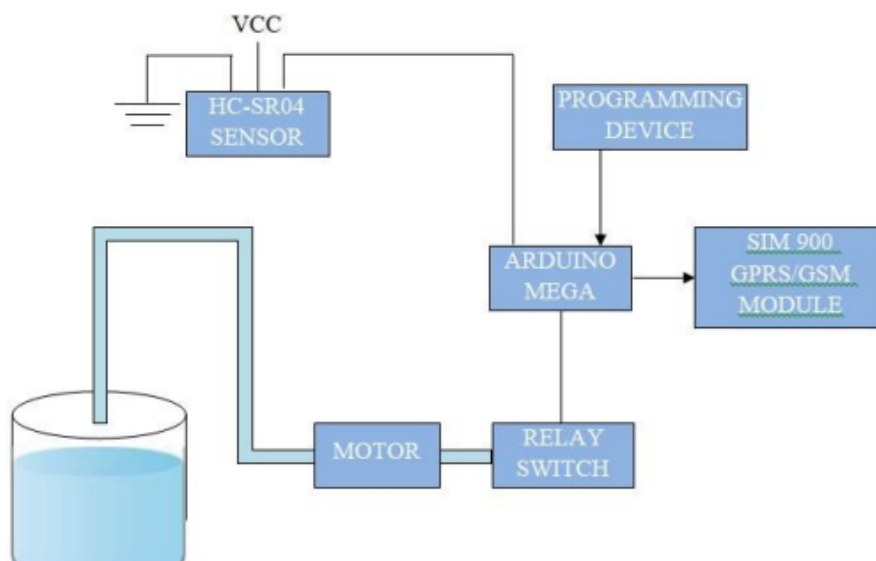
Figura 6 - Montagem interna do dispositivo (1) e Instalação externa (2)



Fonte: Americo e Izidoro (2022)

Djalilov *et al.* (2023) desenvolveram um sistema para monitoramento do nível de água de um reservatório, utilizando um microcontrolador Arduino MEGA 2560 R3 e um sensor ultrassônico HC-SR04 e um modem GSM SIM 900 (Figura 7). Este sistema envia alertas por meio de sms para o celular do usuário quando o reservatório se encontra cheio ou quando o nível d'água atinge o limite inferior pré-definido, permitindo detectar perdas de água por vazamentos de maneira eficaz.

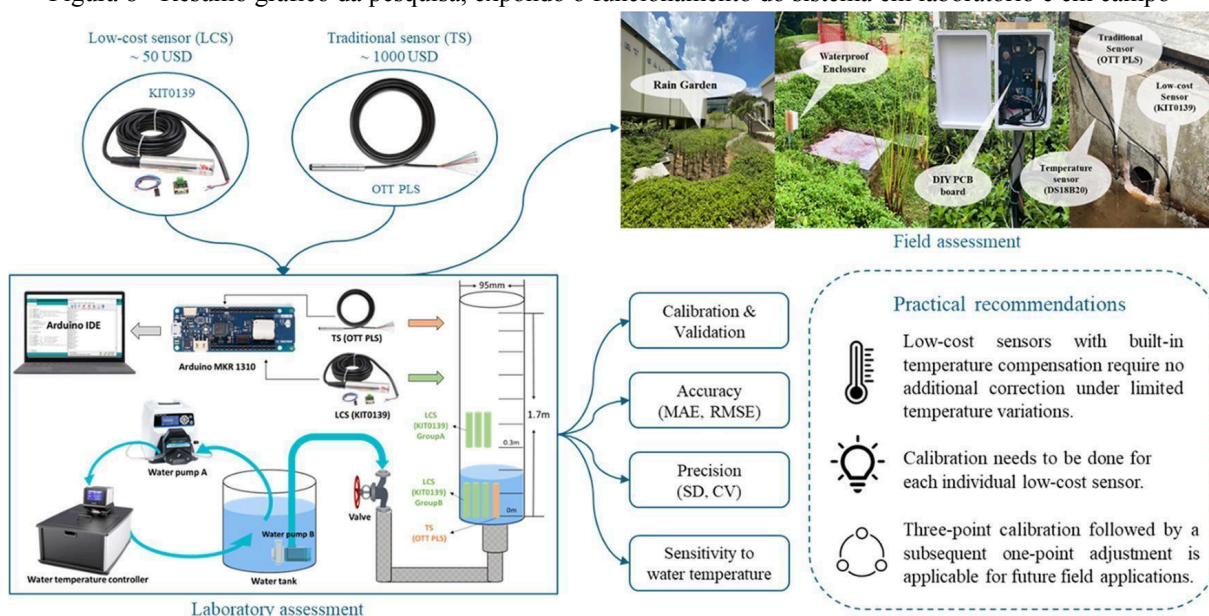
Figura 7 - Representação da arquitetura do sistema medição e controle do nível d'água em reservatório



Fonte: Djalilov *et al.* (2023)

Ding *et al.* (2025) elaboraram um sistema para monitoramento do nível d'água utilizando um microcontrolador Arduino MKR1310, sensores de nível d'água hidrostáticos DFRobot KIT0139 e OTT PLS e o software Arduino IDE (Figura 8). A pesquisa se deu em duas etapas, sendo a primeira um teste em laboratório, utilizando uma coluna de água. Os sensores foram testados em diferentes condições de umidade e temperatura antes do desenvolvimento da próxima etapa, onde foram testados em campo.

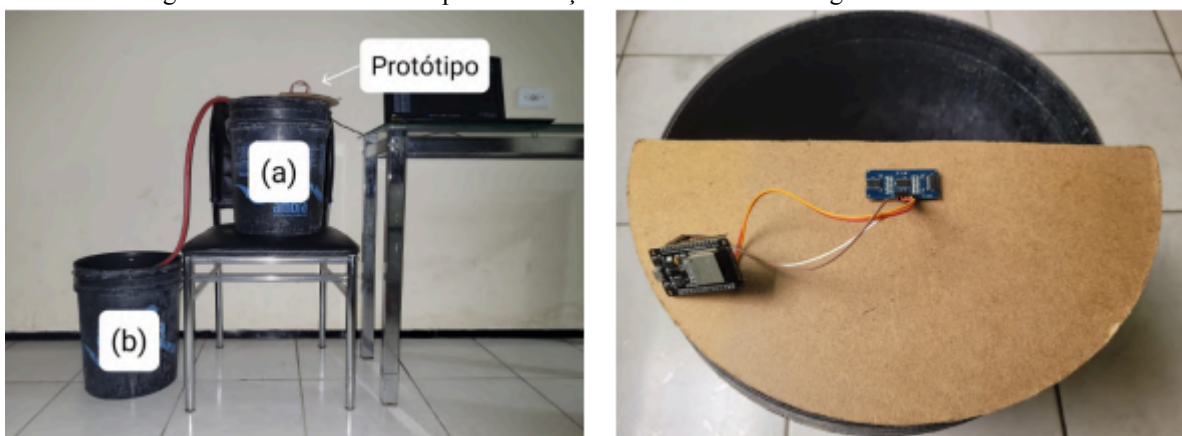
Figura 8 - Resumo gráfico da pesquisa, expondo o funcionamento do sistema em laboratório e em campo



Fonte: Ding *et al.* (2025)

Da Silva *et al.* (2024) criaram um sistema para monitorar o nível d'água de uma cisterna em uma instituição de ensino superior, utilizando um microcontrolador ESP32 WROOM-DA Module, um sensor ultrassônico HC-SR04 e o AppScript da Google. Os testes foram inicialmente realizados em modelo reduzido (Figura 9), para posteriormente o sistema ser instalado e testado no reservatório. Na Figura 9, os recipientes (a) e (b) foram posicionados de forma a representar os reservatórios superior e inferior da rede real, respectivamente.

Figura 9 - Modelo reduzido para simulação de transferência de água entre reservatórios



Fonte: Da Silva *et al.* (2024)

Os estudos mencionados evidenciam o rápido crescimento deste campo de estudo. Através da automação e do monitoramento do sistema, é possível implementar métodos inteligentes de gestão, como o agendamento de abastecimento automático, desenvolvimento de alertas para os níveis críticos e a criação de sistemas de monitoramento remoto. Estas aplicações permitem tanto melhorar a eficiência operacional, quanto limitar o impacto ambiental causado pelo uso impróprio dos recursos hídricos (Alves, 2023). Entretanto, para que seja possível utilizar os dados fornecidos pelo modelo de maneira confiável, faz-se necessário calibrá-lo, ou em outras palavras, adequar os dados providos pelo modelo aos dados observados (Abbaspour *et al.*, 2017; Paz *et al.*, 2018; Premand *et al.*, 2018; Ashikary *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2020)

2.1 Calibração, simulação e validação

2.1.1 Calibração

Quando se busca a calibração de um modelo, procura-se diminuir a diferença entre as respostas numéricas e as experimentais, sendo a função objetivo a representação dessa diferença (Ribeiro, 2019). Esta diferença precisa estar dentro de um escopo aceitável, que é definido por meio de testes estatísticos, como o erro absoluto médio (MAE), o erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio por viés (MBE). O erro absoluto médio trata do desvio médio absoluto entre os valores fornecidos pelo modelo e os valores observados em campo, sendo considerado uma medida acurada e confiável para a análise de modelos numéricos. Na verificação por MAE, os resultados aceitáveis são aqueles iguais ou mais próximos possíveis de zero (Alves *et al.*, 2012; Ruezzenne *et al.*, 2021). A fórmula do erro absoluto médio está

descrita na Eq. 4:

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^n |O_j - x_j|}{n} \quad (4)$$

Onde:

O_j são os valores reais

x_j são os valores medidos pelo modelo

n é o número de observações

Para uma melhor visualização da proporção do erro, é possível calcular o erro relativo a partir do MAE (Eq. 5):

$$MAE (\%) = \frac{MAE}{\underline{O}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

\underline{O} é a média dos valores reais

O erro quadrático médio (RMSE), por sua vez, baseia-se em medir a acurácia de um modelo, comparando os dados obtidos por este com suas contrapartes registradas por observações do fenômeno real (Villasante *et al.*, 2025). Quanto menores forem os valores do erro quadrático médio, melhor a acurácia do modelo. No entanto, outliers com valores muito discrepantes dos reais podem afetar drasticamente os resultados do RMSE, e esse teste não indica se os valores do modelo estão subestimando ou superestimando os valores reais (Kambezidis, 2012). A fórmula do RMSE encontra-se descrita na Eq. 6:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (O_j - x_j)^2}{n}} \quad (6)$$

Onde:

O_j são os valores reais

x_j são os valores medidos pelo modelo

n é o número de observações

Da mesma forma que o MAE, o RMSE também pode ser convertido para o formato de erro relativo (Eq. 7):

$$\text{RMSE (\%)} = \frac{\text{RMSE}}{\underline{O}} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:

\underline{O} é a média dos valores reais

Já o viés (MBE) (Eq. 8) é definido como um erro que ocorre de maneira sistemática e tem a capacidade de interferir nos resultados de um estudo, induzindo a estimativas incorretas. Em outras palavras, ele resulta da diferença entre o valor real do parâmetro observado e o valor encontrado pelo modelo de estimativa utilizado (Bolfarine e Bussab, 2005; de Sousa, 2016):

$$\text{MBE} = \left[\sum_{j=1}^n x_j \right] - \left[\sum_{j=1}^n O_j \right] \quad (8)$$

Onde:

x_j são os valores medidos pelo modelo

O_j são os valores reais

n é o número de observações

MBE = 0 indica que o modelo não está viciado

MBE > 0 indica que o modelo está superestimado com relação aos dados reais

MBE < 0 indica que o modelo está subestimado com relação aos dados reais

O MBE também pode ser expresso em forma percentual, indicando a proporção do viés com relação aos dados reais (Eq. 9):

$$\text{MBE (\%)} = \frac{\left[\sum_{j=1}^n x_j \right] - \left[\sum_{j=1}^n O_j \right]}{n \sum_{j=1}^n O_j} \cdot 100 \quad (9)$$

Além das medidas de erro, existem os testes de correlação estatística, como o teste de correlação de Pearson (r) e o teste de correlação de Spearman (r_s), e os testes de inferência estatística, como o teste de p-valor (ou valor-p). Os testes de correlação estatística expressam a associação entre duas variáveis quantitativas, sem a dependência de suas unidades de medida. Tanto a correlação de Pearson quanto a correlação de Spearman apresentam valores adimensionais, que variam de -1 a 1. Quanto mais próximo de 1, maior a correlação entre as duas variáveis, com o sinal positivo indicando uma correlação diretamente proporcional e o negativo indicando uma correlação inversamente proporcional. Já o 0 indica a ausência de correlação (Sousa, 2019).

Dentre as situações em que o uso do coeficiente de correlação de Pearson é indicado, estão as análises onde as variáveis são grandezas escalares ou intervalares, exista uma relação linear entre as variáveis e ambas sigam uma distribuição normal (LAERD STATISTICS, 2020). A fórmula do coeficiente de correlação de Pearson é obtida dividindo a covariância entre os parâmetros pelo produto do desvio padrão de ambos. Embora a covariância já seja uma estatística adequada para a medição da relação linear entre duas variáveis, ela não é tão eficaz quando se trata de medir o grau de relação entre ambas as variáveis, devido à influência que a primeira sofre das unidades de medida das últimas. Para lidar com a influência das unidades de medida, a covariância é dividida pelo desvio padrão, resultando assim no coeficiente de correlação de Pearson (Guimarães, 2017).

A fórmula do coeficiente de correlação de Pearson está exposta na Eq. 10:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \underline{x})(y_j - \underline{y})}{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^n (x_j - \underline{x})^2 \right] \left[\sum_{j=1}^n (y_j - \underline{y})^2 \right]}} \quad (10)$$

Onde:

x_j e y_j são as variáveis analisadas

\underline{x} e \underline{y} são as médias de suas respectivas variáveis

n é o número de pares de amostras

Já o coeficiente de correlação de Spearman mede a intensidade e o sentido (diretamente ou inversamente proporcional) da relação monótona entre as variáveis analisadas, estando ambas minimamente em uma escala ordinal, levando em consideração a ordem conferida a cada observação em vez de seu valor. Este teste pode ser aplicado tanto a elementos lineares quanto a não lineares, e pode ser aplicado utilizando a fórmula do coeficiente de Pearson, porém utilizando as ordens conferidas às variáveis no lugar de seus valores reais. Por isso, o coeficiente de Spearman não é vulnerável à influência de outliers ou a presença de assimetria na distribuição, não necessitando que seus dados se originem de distribuições normais e podendo ser utilizado como uma alternativa ao coeficiente de correlação de Pearson em dados intervalares ou rácio quando não se afere a presença de normalidade nos dados (Sousa, 2019).

A fórmula do coeficiente de correlação de Spearman está detalhada na Eq. 11:

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{j=1}^n d_j^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (11)$$

Onde:

d_j é a diferença entre as ordens de x_j e y_j

n é o número de pares de amostras

Por fim, o teste de p-valor indica a probabilidade teórica de que valores iguais ou mais extremos do que os obtidos sejam advindos do acaso, e não de uma correlação real, indicando

uma hipótese nula (H_0) verdadeira (Miola e Miot, 2021). A decisão de rejeitar a hipótese nula e aceitar a hipótese alternativa (H_1) como verdadeira baseia-se em uma faixa de corte probabilística pré-determinada, geralmente estabelecida como 5% de probabilidade da hipótese nula não poder ser rejeitada ($\alpha = 0,05$). Se o resultado obtido pelo teste de p-valor for menor que 5% ($p < 0,05$), a hipótese nula poderá ser rejeitada. Do contrário ($p > 0,05$), a hipótese nula não poderá ser rejeitada e, por consequência disso, a hipótese alternativa poderá ser rejeitada.

2.1.2 Simulação

A simulação é uma técnica cujo seu uso se dá tanto para projetar e avaliar novos sistemas, quanto para a reconfiguração física e alterações no funcionamento de sistemas existentes (Sakurada e Miyake, 2009). Dentre as ferramentas de análise disponíveis para se projetar e operar sistemas, a simulação é uma das mais poderosas. O desenvolvimento de um estudo de simulação antes da execução do projeto é essencial, pois possibilita a redução do tempo necessário para que o sistema funcione plenamente, permite a previsão de erros no sistema e reduz custos econômicos (Lobão e Porto, 1999).

O avanço das ferramentas de simulação desenvolvidas por engenheiros e projetistas está condicionado às tecnologias (*software e hardware*) disponíveis durante o período de sua implementação, tendo avançado desde os modelos físicos em escala e os modelos matemáticos até a última geração de ferramentas inteligentes e interativas com interface gráfica (Lobão e Porto, 1999). Tratando-se dos simuladores modernos, somente o desenvolvimento de *hardwares* cada vez mais potentes não é o bastante para aumentar a eficiência da simulação. Aliado ao incremento de desempenho dos equipamentos mais avançados, o uso de métodos e algoritmos inteligentes detém um papel crucial no sucesso da simulação (Wheeler e Peszynska, 2002).

2.1.3 Validação

A validação é um método que pode ser utilizado após a calibração, consistindo em efetuar um novo ensaio sob condições controladas com a amostra de estudo, recriando-o em ambiente de simulação. Após o novo ensaio, é feita a análise dos resultados obtidos, podendo ser qualitativa ou quantitativamente, para aferir se o modelo calibrado tem a capacidade de

descrever o comportamento da amostra em um contexto incomum, conferindo-lhe robustez (Almeida, 2022). Em resumo, a validação procura a confirmação de que o instrumento avaliado detém o rendimento que a sua aplicação necessita, além de garantir a confiabilidade de seus resultados (Guimarães e Giordan, 2012; Guimarães e Giordan, 2013).

Dentro do escopo abrangido pelo conceito de validação, estão o detalhamento dos requisitos do método, a indicação das características do método, apuração de que é possível alcançar os requisitos utilizando o método e uma exposição sobre a validade do método (NBR ISO/IEC 17025, 2001; Barros, 2002). Para realizar a validação de um modelo, faz-se necessário o uso de ferramentas estatísticas adequadas, a exemplo dos testes de hipótese (t de Student e F de Fisher-Snedecor), rejeição de dispersos (Grubbs e Cochran), análise de variância e regressão linear, entre outros (Barros, 2002).

2.2 Painéis de monitoramento remoto do consumo e nível de água

O desenvolvimento de interfaces, para que os usuários do sistema possam visualizar e acessar com mais facilidade os dados coletados, é de suma importância para um monitoramento efetivo dos parâmetros acompanhados. Alves (2015) desenvolveu em sua monografia um sistema de monitoramento do consumo de água residencial, utilizando as placas Arduino Uno, Arduino Pro Mini, um sensor de fluxo FS300A G3/4" e um transceptor nRF24L01+. A visualização dos dados é feita por meio de um site desenvolvido pelo autor, onde o usuário pode realizar um cadastro no sistema e ter acesso ao painel de controle. No painel, são apresentadas as vazões de consumo em litros, como mostra a Figura 10:

Figura 10 - Painel de controle da aplicação web desenvolvido por Alves (2015)

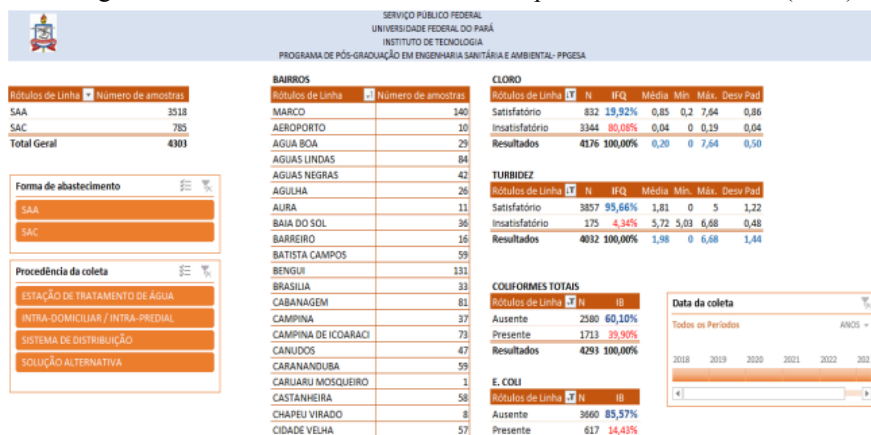


Fonte: Alves (2015)

Nascimento Júnior (2024) desenvolveu em sua dissertação de mestrado um *dashboard* alimentado pelos dados do Sistema de Informação da Vigilância da Qualidade da Água para

Consumo Humano (SISAGUA), uma plataforma criada pelo Ministério da Saúde para coletar e administrar dados sobre a qualidade da água dos sistemas de abastecimento de diversos municípios brasileiros (BRASIL, 2020). O painel apresenta dados estatísticos sobre vários parâmetros de qualidade da água, classificados quanto a satisfatório ou insatisfatório, a forma de abastecimento (SAA ou SAC), dentre outros dados. Na Figura 11 é apresentado o *dashboard*:

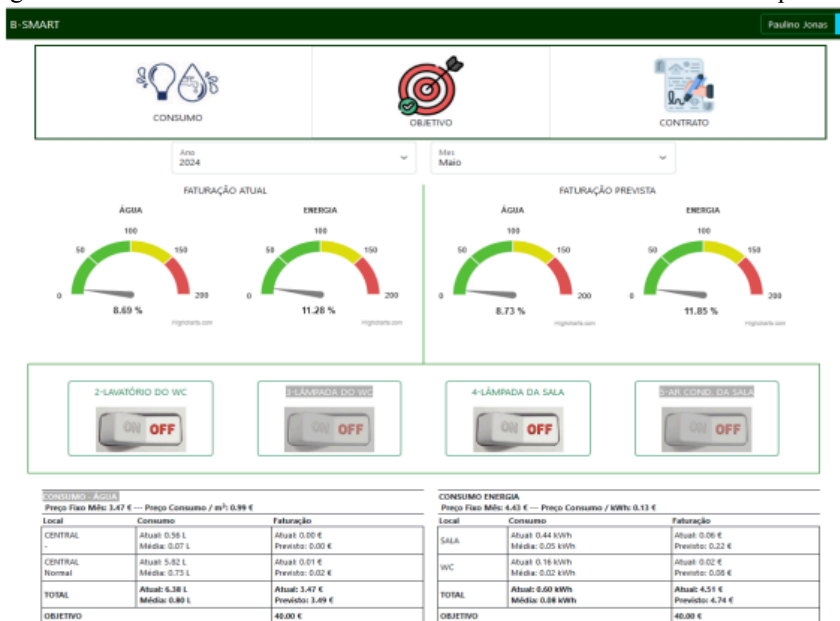
Figura 11 - Painel descritivo desenvolvido por Nascimento Júnior (2024)



Fonte: Nascimento Júnior (2024)

Jonas (2024) elaborou um sistema de monitoramento e gestão do consumo de água e energia em edifícios inteligentes, onde o usuário além de ter acesso a *dashboards* em tempo real (Figura 12), também recebe notificações de anomalias nas instalações residenciais e alertas de consumo excessivo, baseado em limites pré-estabelecidos pelo usuário na interface do painel. O acesso ao painel se dá por meio do login em uma aplicação do sistema, e possui uma opção para recuperação do acesso em caso de perda das credenciais.

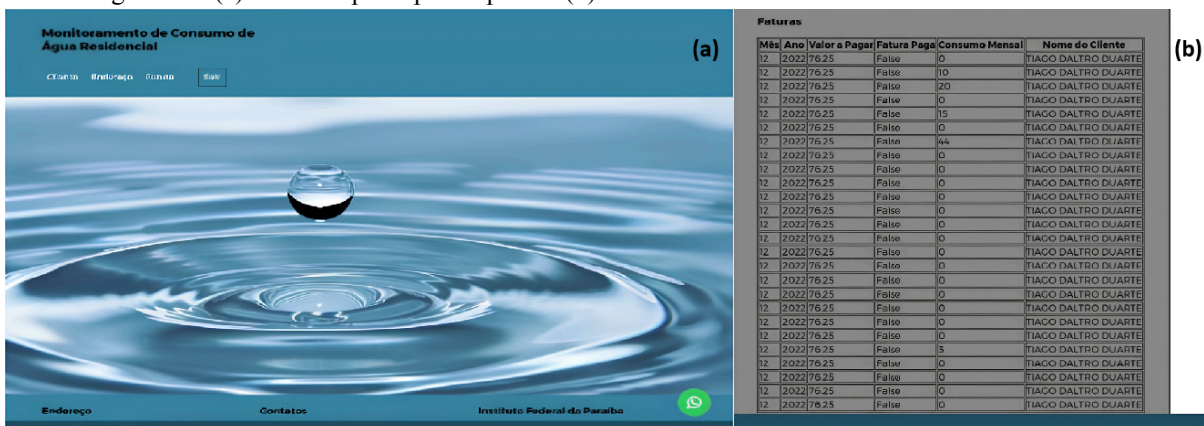
Figura 12 - Tela de monitoramento e controle do dashboard desenvolvido por Jonas (2024)



Fonte: Jonas (2024)

Duarte (2023) desenvolveu um sistema de consumo de água predial, onde o usuário pode visualizar o consumo mensal e o valor da fatura (Figura 13), baseado em um cálculo de consumo disponibilizado pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA). Também há um campo para visualizar se a fatura foi ou não paga, mas esse campo ainda está em desenvolvimento, previsto para tornar-se funcional em trabalhos futuros. Para este trabalho, foi utilizado a Amazon Web Services (AWS), um serviço de arquitetura do tipo de computação em nuvem (Duarte, 2023).

Figura 13 - (a) Interface principal do painel. (b) Tabela de consumo e valor da fatura mensais.



Fonte: Duarte (2023)

3 METODOLOGIA

Esse trabalho consistiu em uma pesquisa exploratória, visando observar a variação do nível de água na cisterna e o consumo de água em uma edificação com múltiplos usos. Para isso, foi desenvolvido um sistema automatizado de medição do nível da água no reservatório, utilizando-se de um microcontrolador ESP32 e um sensor ultrassônico. Os dados são apresentados em um painel intuitivo e de fácil acesso, desenvolvido no LookerStudio, uma ferramenta da Google. Com isso, visou-se facilitar o monitoramento do consumo de água, ajudar no desenvolvimento de uma base de dados a longo prazo, auxiliando, assim, os gestores na tomada de decisões quanto ao uso racional e sustentável da água na edificação. Esse estudo é uma continuação do trabalho desenvolvido por Da Silva (2024).

3.1 Área de estudo

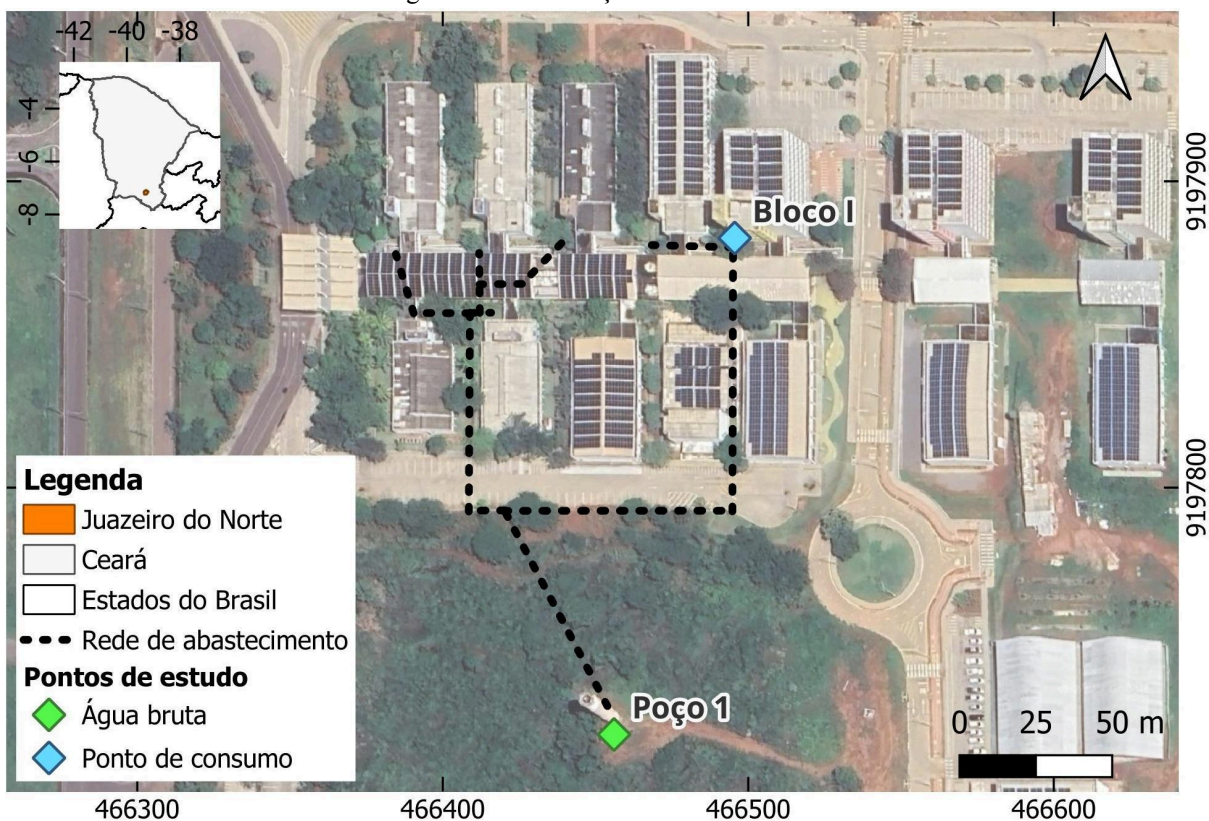
O foco de estudo deste trabalho foi o Bloco I do Campus Juazeiro do Norte da Universidade Federal do Cariri (UFCA), uma instituição federal de ensino superior localizada no estado do Ceará. Trata-se de um edifício de 4 pavimentos e um subsolo, onde se localizam o refeitório universitário, a biblioteca, salas de aulas e salas administrativas. No pavimento térreo se encontra o restaurante universitário, com uma capacidade para comportar 149 pessoas sentadas (UFCA, 2026). As salas de aula se localizam no primeiro andar, sendo um total de 5, enquanto as salas administrativas estão no segundo, no terceiro andar e no quarto andar, totalizando 18 salas administrativas. A biblioteca está localizada no subsolo, onde também existe uma sala de estudos. Cada piso detém um conjunto de três banheiros, totalizando doze em todo o edifício.

Nas fachadas leste e posterior, encontra-se o estacionamento da edificação, enquanto na fachada oeste está localizado o jardim e o reservatório inferior do bloco. O jardim possui árvores de pequeno porte e é coberto por grama em uma parcela significativa, porém não há grama na área imediatamente próxima à caixa de inspeção do reservatório inferior. A tampa da caixa de inspeção apresenta sinais de deterioração, o que permite a infiltração de água da chuva e de resíduos gerados pelas plantas do jardim, como folhas, por exemplo. Na fachada frontal, se encontra o *shaft* onde fica o hidrômetro do edifício.

O Bloco I é abastecido pelo reservatório elevado principal da universidade, este último abastecido por um dos poços da instituição (Poço 1) (Figura 14). O estudo se iniciou no dia 28 de agosto de 2025 e foi finalizado no dia 28 de novembro de 2025, sendo realizado um

monitoramento do consumo de água no hidrômetro do Bloco I de maneira contínua durante esse período de tempo.

Figura 14 - Localização da área de estudo



Fonte: Alves *et al.* (2025)

3.2 Sistema de monitoramento de consumo e nível d'água

3.2.1 Hidrômetro

O hidrômetro utilizado para medir o consumo de água do Bloco I trata-se de um medidor unijato velocimétrico residencial M170-X com classe de exatidão B, da marca Elster. A medição do volume de água consumido dá-se através da velocidade do jato de água que percorre a peça, ocasionando na rotação de sua hélice interna. Este se trata de um método de medição direto, utilizado em larga escala para a medição do consumo de água residencial (RENOVA MEDIÇÃO, 2023).

Figura 15 - (a) Abrigo do hidrômetro. (b) Hidrômetro do bloco I.



Fonte: Autor (2026)

Os dados de vazão mínima (Q1), vazão de transição (Q2), vazão nominal ou permanente (Q3) e vazão máxima ou de sobrecarga (Q4) se encontram na Tabela 05:

Tabela 5 - Valores de referência das vazões do hidrômetro

Tipo de Vazão	Q1	Q2	Q3	Q4
Valor de Referência	15 L/h (H)*	120 L/h (H)*	1,5 m ³ /h	3,0 m ³ /h

* Indica a posição de instalação para qual o hidrômetro foi projetado. O indicador (H) refere-se à necessidade de instalar o hidrômetro na direção horizontal, enquanto o indicador (V) especifica que o hidrômetro deve ser instalado na direção vertical.

Fonte: Catálogo da Thorne & Derrick International [s.d.]

3.2.2 Sistema de medição de consumo e nível d'água

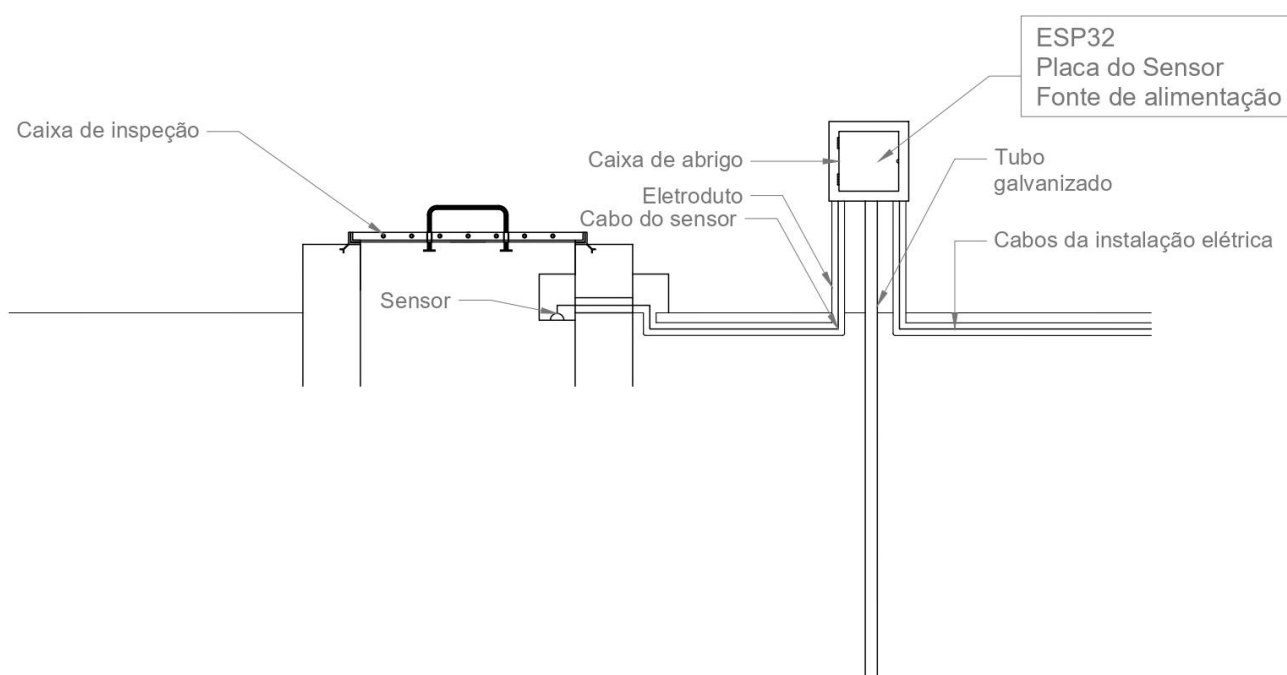
O sistema é composto por um sensor ultrassônico de nível, modelo AJ-SR04M, e um microcontrolador ESP32, modelo WROOM-DA Module, conectado à rede de internet da universidade. O sistema de medição (Figura 16) foi instalado no reservatório inferior da edificação, que recebe a água proveniente do reservatório elevado principal e a armazena, sendo então a água bombeada para os reservatórios superiores (Figura 17).

Figura 16 - Estrutura física do sistema



Fonte: Autor (2026)

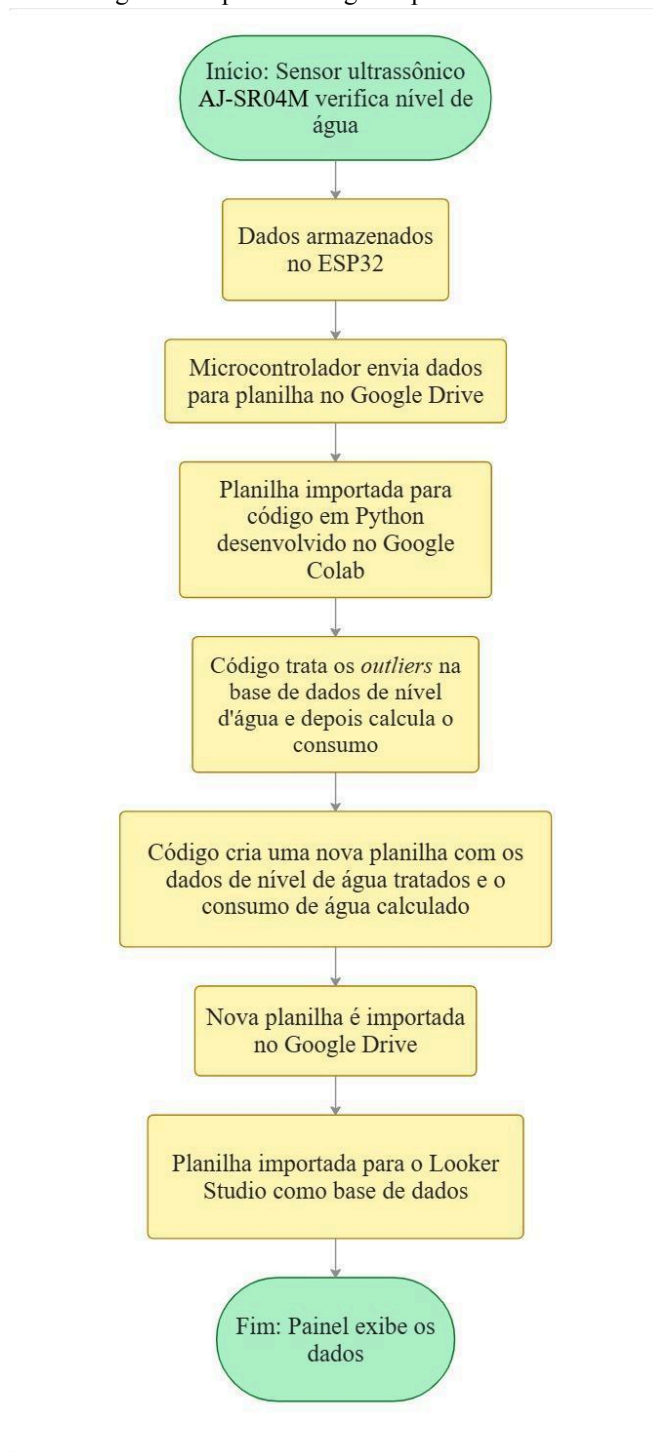
Figura 17 - Representação detalhada da estrutura física do sistema



Fonte: Autor (2026)

O microcontrolador envia os dados registrados de variação da lâmina d'água para uma planilha do Google Sheets, através de um App da Web no AppScript desenvolvido por Silva *et al.* (2024). A planilha é importada em um código desenvolvido em linguagem Python, na plataforma do Google Colab, para que seus dados sejam tratados e filtrados. O código também calcula o consumo de água, multiplicando os dados filtrados de variação de nível d'água no tempo pela área da seção transversal do reservatório. O código então cria uma nova planilha, onde são armazenados os dados de variação de nível e consumo, para ser utilizada como base de dados em um dashboard do LookerStudio. O dashboard fica disponível para visualização no site UFCA Sustentável, vinculado ao site oficial da UFCA e administrado pela Coordenadoria de Gestão da Sustentabilidade da Pró-reitoria de Planejamento e Orçamento (CGS/Proplan). Esse processo está ilustrado na Figura 18:

Figura 18 - Fluxograma do processo seguido pelo sistema de monitoramento



Fonte: Autor (2026)

Além desse sistema, foram feitas leituras diárias do hidrômetro que registra o consumo de água do edifício, e foram registradas as diferenças dos valores registrados nas leituras entre semanas. Essas diferenças foram comparadas com os valores de consumo semanal obtidos do painel, calculados a partir dos dados provenientes das leituras realizadas pelo sensor. A partir

dessa comparação, foi analisada a precisão do sistema de medição por sensor ultrassônico, e realizada a calibração do código de cálculo do consumo.

3.2.2.1 Componentes físicos do sistema (*hardware*)

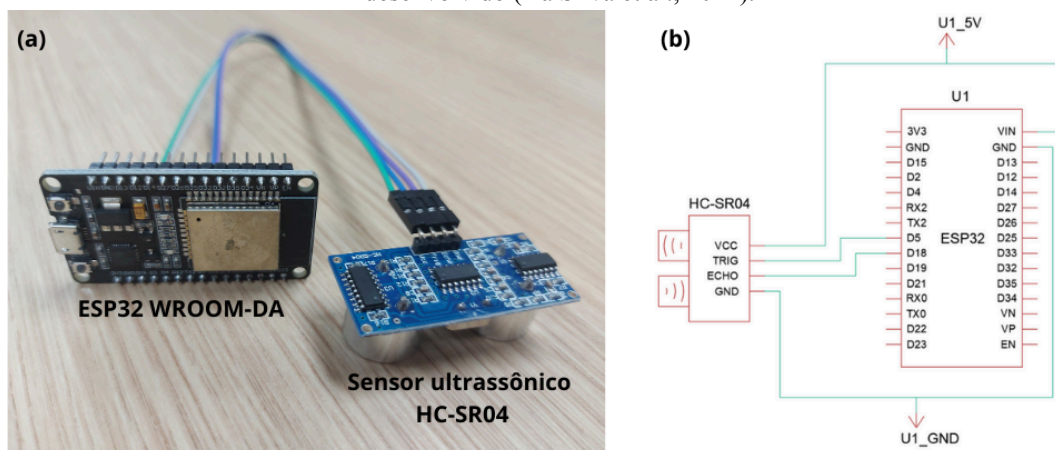
O ESP32 trata-se de uma série de microcontroladores que possuem baixo consumo de energia e baixo custo financeiro, tendo sido criado e desenvolvido pela empresa chinesa Espressif Systems e fabricado pela Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) (Pereira, 2020). Microcontroladores, por sua vez, são circuitos integrados que detém internamente todos os componentes que precisa para o seu funcionamento, necessitando apenas da fonte de alimentação externa (Kerschbaumer, 2013).

Para a alimentação do ESP32, foi utilizada uma fonte de alimentação AC/DC Adaptor Model-HLX-0530 100-240vac 50/60hz, *output* de 5v/3A. A fonte de alimentação foi conectada a uma instalação elétrica feita pela Diretoria de Infraestrutura da UFCA (Dinfra), dedicada exclusivamente ao fornecimento de energia para o sistema.

Quanto à coleta dos dados de variação da lâmina d'água, foi utilizado para isso um sensor ultrassônico de nível. Os sensores ultrassônicos são aparelhos que têm, como principal vantagem, a medição de distâncias sem realizar contato com o material do procedimento (Pereira; Chagas; Vaz, 2013). Inicialmente, foi utilizado um sensor ultrassônico HC-SR04. Este modelo fornece um alcance de medição que vai de 2 cm a 400 cm, sendo a sua margem de erro de aproximadamente 3 mm (HC-SR04 DATASHEET; Alves, 2023), ou um erro de 52,92 litros considerando o cálculo do consumo. Seus componentes incluem transmissores ultrassônicos, receptor e circuito de controle, e seu princípio de funcionamento opera com um sinal de disparo de pelo menos 10 μ s (HC-SR04 DATASHEET; Alves, 2023).

O sensor automaticamente emite oito pulsos de 40 kHz e capta os pulsos de retorno. Ao captar um sinal de retorno, a duração do sinal de saída IO alto é proporcional à distância aferida (HC-SR04 DATASHEET; Alves, 2023).

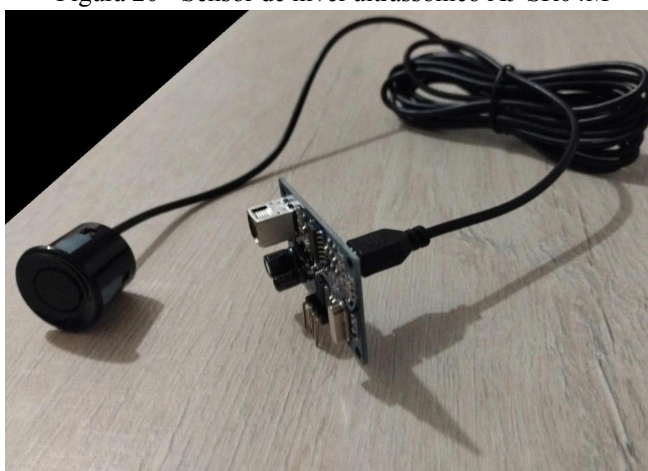
Figura 19 - (a) Destaque aos componentes do sistema de monitoramento. (b) Esquema de circuito do sistema desenvolvido (Da Silva et al., 2024).



Fonte: Da Silva *et al.* (2024); Alves *et al.* (2025)

Posteriormente, o sensor foi substituído pelo modelo AJ-SR04M. Sua alimentação é de 5V, e trabalha em uma frequência de 40kHz. Ele apresenta a vantagem de ser à prova d'água, podendo ser utilizado em ambientes abertos, porém é necessário proteger a placa e os demais componentes da umidade, deixando apenas o sensor exposto (Do Nascimento *et al.*, 2023). O princípio de funcionamento do sensor AJ-SR04M é semelhante ao do HC-SR04, em que o sensor envia uma onda ultrassônica e, em seguida, capta o sinal que retorna após a onda refletir no objeto cuja distância está sendo mensurada. Na Figura 20, está exposto o sensor modelo AJ-SR04M.

Figura 20 - Sensor de nível ultrassônico AJ-SR04M



Fonte: Alves *et al.* (2025)

Para proteger o microcontrolador e a placa do sensor da umidade, foi construído um abrigo a aproximadamente 1,5 m da caixa de inspeção da cisterna, utilizando uma caixa plástica com fecho de medidas 20x14x10 cm, um tubo de aço galvanizado de aproximadamente 1,8 m e duas abraçadeiras de nylon. Foram feitos dois orifícios na parte

inferior da caixa, onde foram inseridos dois eletrodutos. Um dos eletrodutos é destinado à passagem do cabo da tomada de alimentação do sistema, enquanto o outro liga o abrigo à caixa de inspeção da cisterna, por onde passa o cabo do sensor. Na Figura 21, encontra-se uma foto do abrigo.

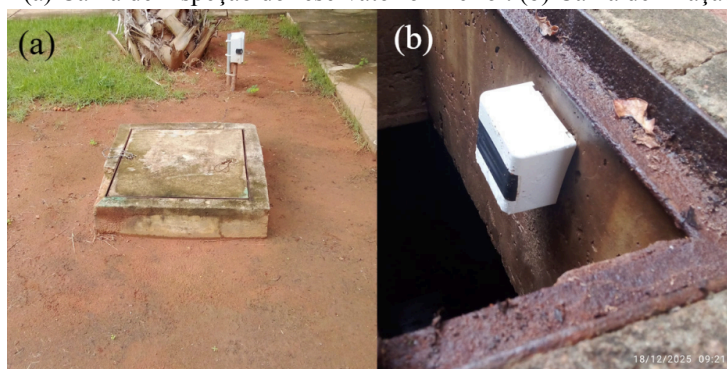
Figura 21 - Abrigo do componentes sensíveis do sistema



Fonte: Alves *et al.* (2025)

No interior do reservatório inferior, para manter a posição do sensor estável, foi fixada na parede uma caixa plástica de medidas 7x4x7 cm, com um furo em seu lado inferior, onde o sensor foi preso (Figura 22). Com o *hardware* do sistema montado, a próxima etapa é a remoção do ruído presente nas leituras, causado pelas ondulações na superfície da água.

Figura 22 - (a) Caixa de inspeção do reservatório inferior. (b) Caixa de fixação do sensor.



Fonte: Autor (2026)

3.2.2.2 Depuração dos dados

Os dados coletados pelo sensor ultrassônico passaram por um processo de tratamento, com o intuito de minimizar a influência dos ruídos no cálculo do consumo de água e no monitoramento da variação da altura da lâmina d'água. No contexto desta pesquisa, ruídos são sinais indesejados que são captados durante as medições, atrapalhando o discernimento das

informações desejadas, sendo também conhecidos como *outliers*. A principal fonte de ruído encontrado nas medições do nível d'água do reservatório inferior são as micro-ondulações da superfície da lâmina d'água.

Tendo sido feita a consolidação temporal, efetuou-se a depuração em escala de hora cível baseada no intervalo interquartilico (IIQ) (MACHEFER *et al.*, 2022; ROOS-HOEFGEEST TORIBIO *et al.*, 2025; ROSS *et al.*, 2024). Seja S_h o conjunto das leituras de distância do sensor para cada hora h , definido pela Eq. 12:

$$S_h = \{d_i\} \quad (12)$$

Para cada S_h , o intervalo interquartilico (IQR) é definido a partir de seus quartis inferior ($Q_{1,h}$) e superior ($Q_{3,h}$), correspondendo respectivamente aos percentis P25 e P75 (MAZAREI *et al.*, 2024). Então, o IQR é calculado conforme descrito na Eq. 13:

$$IQR_h = Q_{3,h} - Q_{1,h} \quad (13)$$

Partindo-se do IQR, foi estipulado um envelope de aceitação para reduzir os ruídos, sendo desprezada a existência de normalidade dos dados (SCHWERTMAN; OWENS; ADNAN, 2004). Assim, são definidos os limites inferior L_h^- e superior L_h^+ baseados nas equações 14 e 15:

$$L_h^- = Q_{1,h} - 1,22 \cdot IQR_h \quad (14)$$

$$L_h^+ = Q_{3,h} + 1,22 \cdot IQR_h \quad (15)$$

Portanto, toda e qualquer leitura d_i apenas é válida se, e somente se, estiver no intervalo definido pelos limites inferior e superior (HUBERT; VANDERVIEREN, 2008). No caso de o tamanho da amostra tornar inviável estimar $Q_{1,h}$ e $Q_{3,h}$, segue-se a decisão mais conservadora de manter os valores medidos naquele horário.

Em sequência, foi realizada a agregação da série em janelas temporais não sobrepostas de duração N minutos, dentro do intervalo de 1 a 45 minutos, para testar a relação sinal ruído e a resolução temporal. Define-se J_t com o intervalo $[t, t + N)$ a janela de tempo t , e m_t a

quantidade de leituras válidas presente em cada janela. A média agregada por janela é descrita pela Eq. 16:

$$\bar{d}_t^{(N)} = \frac{1}{m_t} \cdot \sum d_i \quad (16)$$

Sendo definida quando $m_t \geq 1$. Seguindo a hipótese de que faltas sejam, aproximadamente, aleatórias em relação ao processo físico, é estimado o nível médio da janela $\bar{d}_t^{(N)}$. Por outro lado, transientes de curta duração podem ser atenuados por janelas muito longas.

Para obter a dinâmica entre janelas, é calculada a diferença de primeira ordem na série agregada, onde $\Delta d_t^{(N)}$ resulta da diferença entre $\bar{d}_t^{(N)}$ e $\bar{d}_{t-1}^{(N)}$. Devido à grandeza que está sendo medida ser a distância do topo do reservatório até a superfície da água, o sinal de $\bar{d}_t^{(N)}$ possui uma interpretação física diretamente relacionada ao fenômeno representado. Se $\Delta d_t^{(N)} > 0$, isso significa que a distância entre a lâmina d'água e o topo da cisterna aumentou, e o nível d'água foi reduzido. Isso representa a retirada de água através do consumo, evaporação, infiltração e micro vazamentos. Se $\Delta d_t^{(N)} < 0$, quer dizer que a distância diminuiu e o nível d'água aumentou, o que indica reposição ativa ou passiva, como em reservatórios expostos ou no caso de aporte direto da chuva.

Para aferir o consumo de água bruto, é aplicada truncagem ao converter distância em cota: $\Delta h_t^{(N)}$ igual a $\left(0, \frac{\Delta d_t^{(N)}}{100}\right)$, onde é feita a conversão de centímetros para metros por meio da divisão por 100. A truncagem impede que valores de acréscimo no nível d'água compensem os valores de diminuição durante a apuração do consumo. Considera-se o reservatório um prisma reto de seção transversal constante A na faixa operacional (LI *et al.*, 2021). Dessa forma, a conversão de rebaixamento para volume é linear, expressa pela Eq. 17:

$$V_t^{(N)} = A \cdot \Delta h_t^{(N)} [m^3] \quad (17)$$

Para obter o volume diário, é realizada a soma sobre as janelas contidas no dia civil D , como mostra a Eq. 18:

$$V_D^{(N)} = \sum V_t^{(N)} \quad (18)$$

Na prática, o cálculo de $\Delta d_t^{(N)}$ é realizado em relação a janela válida imediatamente anterior na ordem temporal assistida. No caso de existirem lacunas longas (em quedas da conexão de internet), os dados medidos podem se concentrar no instante em que a conexão é retomada e as leituras são registradas na base de dados, o que precisa ser levado em consideração durante a análise de $\Delta d_t^{(N)}$.

3.2.2.3 Análise de correlação estatística

A partir das medições realizadas pelo hidrômetro, foi criada uma base de dados para a calibração do código de cálculo do consumo de água. Além disso, foram utilizados como parâmetro, para determinar a aceitabilidade das medições do modelo, o Erro Máximo Admissível (EMA) definido pela Portaria Inmetro nº 155/2022 em seu anexo D, que trata das regras de transição dos instrumentos de medição aprovados segundo a Portaria Inmetro Nº 246, de 2000 (Inmetro, 2022).

A fórmula para o cálculo do EMA, ou erro de medição relativo ($E_{R\%}$) (Inmetro, 2022) está descrita na Eq. 19:

$$E_{R\%} = \frac{V_i - V_e}{V_e} \quad (19)$$

Onde:

V_i é o volume indicado

V_e é o volume escoado

De acordo com a Portaria Inmetro nº 155/2022 (Inmetro, 2022), para o medidor unijato velocimétrico residencial utilizado, o EMA é de $\pm 5\%$ entre Q1 inclusive e Q2 exclusive, e $\pm 2\%$ entre Q2 inclusive e Q4 inclusive. Como o parâmetro analisado foi o consumo diário, a faixa de erro adotada foi a seguinte:

Tabela 6 - Faixa de medição adotada como referência

Faixa de Medição	Superior	Inferior
Valores de Referência (m ³ /dia)	$2,88 \leq Q \leq 72$	$0,36 \leq Q < 2,88$

Fonte: Adaptado do Anexo D da Portaria Inmetro nº 155 (2022)

Utilizando os valores de referência descritos na Tabela 6, os consumos diários médios

de cada período analisado (setembro, outubro, novembro e a série histórica completa) foram categorizados em uma das faixas de medição, sendo adotado o EMA de sua respectiva faixa de medição como critério de verificação se as diferenças entre os consumos calculados pelo código e os consumos medidos pelo hidrômetro podem ser aceitas.

Para testar a correlação entre os dados do hidrômetro e do código, foram utilizados os testes de erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (RMSE), erro médio por viés (MBE), teste de correlação de Pearson (r), teste de correlação de Spearman (r_s) e o p-valor. Também foi necessário utilizar um escopo menor de dados do hidrômetro, pois estes testes comparam cada valor de um grupo com sua contraparte do outro grupo, sendo necessário que ambos os grupos tenham a mesma quantidade de itens para que seja possível utilizá-los. O período adotado para as análises foi de 10/09/2025 à 27/11/2025. O pareamento dos dados pode ser observado no Apêndice C.

Os erros obtidos por meio dos testes de MAE, RMSE e MBE foram, então, avaliados como aceitáveis ou não ao compará-los com os valores adotados do EMA. Quanto aos coeficientes de correlação de Pearson e de Spearman, o critério adotado foi o que está descrito na Tabela 7 (LAERD STATISTICS, 2020):

Tabela 7 - Valores para interpretação do coeficiente de Pearson e do coeficiente de Spearman

Força da correlação	Coeficiente C (r ou r_s)	
	Positivo	Negativo
Baixa	$0 < C \leq 0,3$	$0 < C \leq - 0,3$
Média	$0,3 < C \leq 0,5$	$- 0,3 < C \leq - 0,5$
Alta	$0,5 < C \leq 1,0$	$- 0,5 < C \leq - 1,0$

Fonte: Adaptado de LAERD STATISTICS (2020)

O p-valor, por sua vez, foi aplicado usando uma faixa de corte $\alpha = 0,05$. As hipóteses testadas foram as seguintes:

- A hipótese nula (H_0) indica que não é possível comprovar a eficácia do código em calcular o consumo de água.
- A hipótese alternativa (H_1) indica que é possível comprovar a eficácia do código em calcular o consumo de água.

3.2.2.4 Envio dos dados

Após o cálculo do consumo, os valores correspondentes ao volume, a cota e a janela temporal são armazenados em um *dataframe*. A última célula do código é responsável por gerar uma planilha com os dados de leituras das últimas 24 horas. É feito então o *upload* da planilha gerada no Drive, onde ela substituirá a planilha do dia anterior. Ao manter o mesmo formato e nome, a nova planilha herdará o ID da planilha anterior, substituindo automaticamente os dados defasados pelos novos, dentro do Looker Studio.

3.2.3 Painel no Looker Studio

O Looker Studio é uma ferramenta da Google, de uso gratuito, que permite ao usuário criar painéis e relatórios interativos. Ao importar uma ou mais bases de dados, o usuário pode desenvolver gráficos, adicionar filtros de busca, imagens, links ou mesmo mapas. Os painéis criados na ferramenta podem tanto ser visualizados online por meio de um link gerado pelo desenvolvedor do painel, quanto ser incorporados em um site ou serem baixados em formato de PDF (Pineda-Tobón; Espinosa-Bedoya; Branch-Bedoya, 2024).

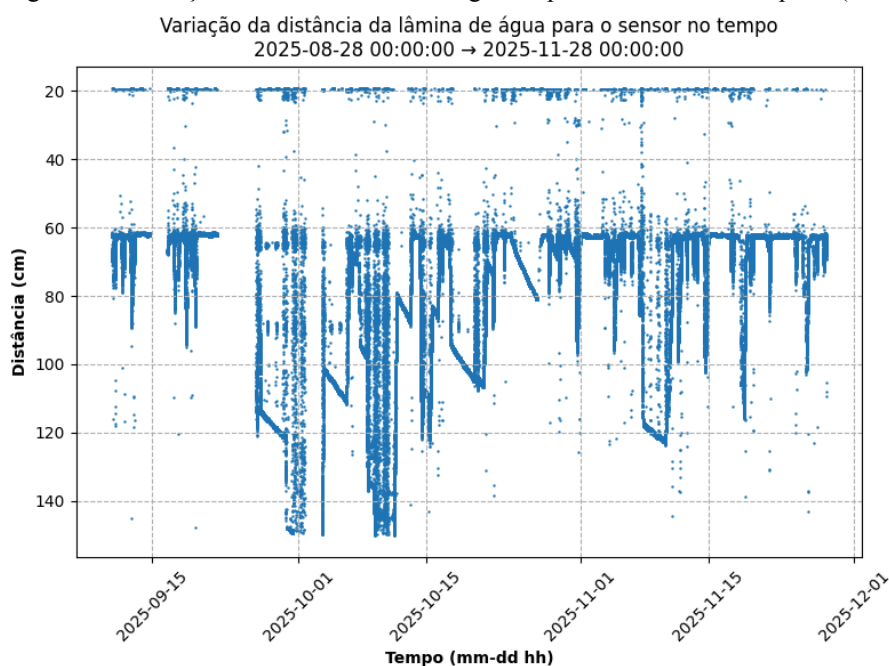
Os dados obtidos por meio das leituras do sensor ultrassônico são visualizados em um painel desenvolvido no Looker Studio, cujo link para acessá-lo está disponível no site UFCA Sustentável, que é gerido pela CGS/Proplan da UFCA. O painel mostra a variação da altura do nível d'água da cisterna no decorrer do tempo, além do consumo de água medido no hidrômetro da edificação onde o estudo ocorreu.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Monitoramento do nível de água do reservatório

Ao todo, a variação do nível de água do reservatório foi monitorada durante um período de três meses (28 de agosto a 28 de novembro de 2025). As medições foram representadas no formato de um gráfico de dispersão, com o eixo das abscissas representando a série temporal e o eixo das ordenadas a variação do nível de água, em centímetros (cm). Na Figura 23, estão representados os dados brutos obtidos durante o monitoramento.

Figura 23 - Variação do nível da lâmina d'água do período de testes completo (dados brutos)



Fonte: Autor (2026)

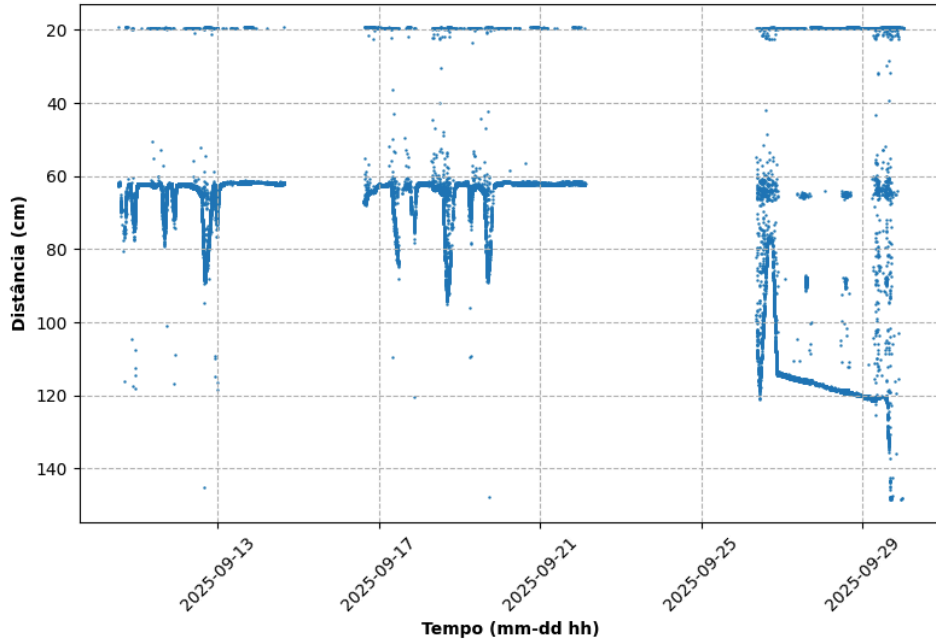
Os dados brutos apresentam um volume considerável de *outliers*, tornando difícil a compreensão e comprometendo sua acurácia. Estão presentes alguns períodos de ausência de dados, que foram causados por quedas na rede de internet da universidade. Para evitar essas falhas, foi acrescentada ao código no ESP32 uma nova funcionalidade, que permite salvar os dados coletados pelo sensor na memória interna da placa durante períodos de ausência de conexão à internet, e enviá-los para a planilha no Drive uma vez que a conexão com a internet seja restabelecida. Os resultados dessa nova funcionalidade podem ser observados nos registros durante o mês de novembro, onde não é possível visualizar ausência de registros.

Para uma visualização um pouco mais detalhada, nas figuras 24, 25 e 26 estão representados os gráficos individuais dos meses de setembro, outubro e novembro,

respectivamente:

Figura 24 - Variação do nível da lâmina d'água no mês de setembro, em cm

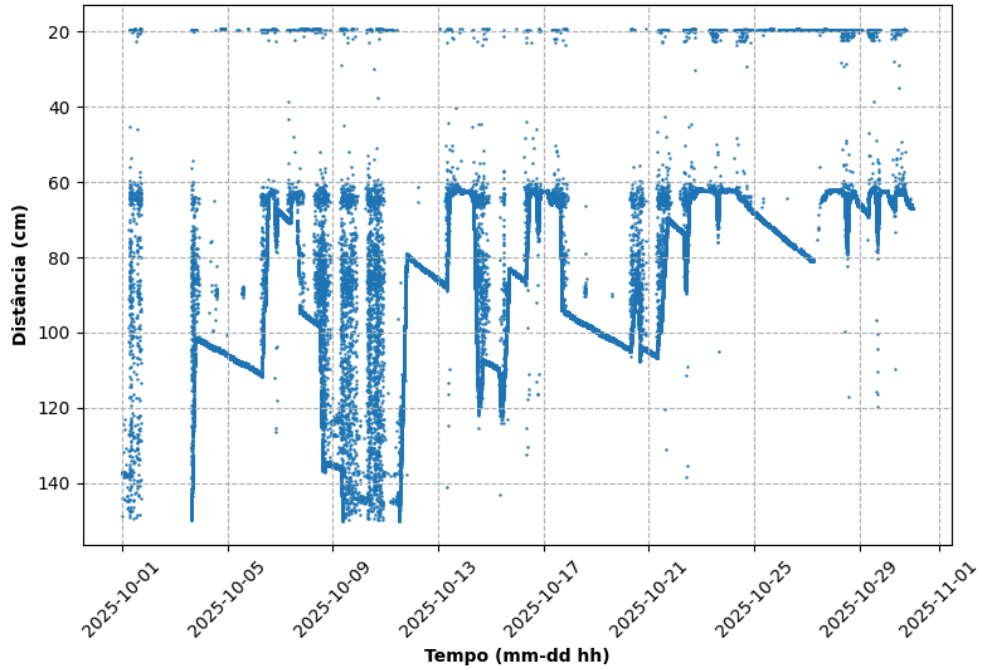
Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
2025-09-01 00:00:00 → 2025-09-30 00:00:00



Fonte: Autor (2026)

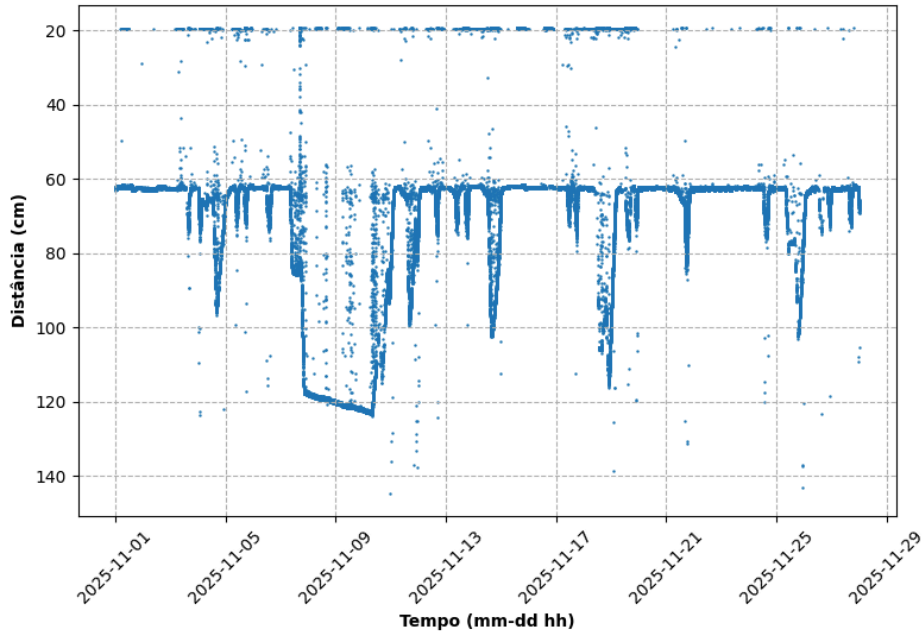
Figura 25 - Variação do nível da lâmina d'água no mês de outubro, em cm

Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
2025-10-01 00:00:00 → 2025-10-31 00:00:00



Fonte: Autor (2026)

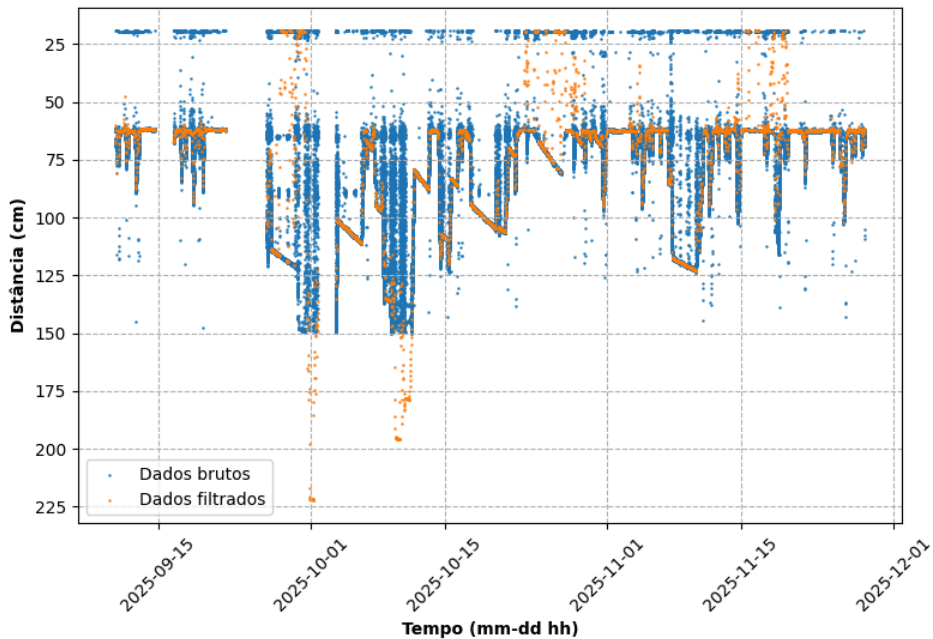
Figura 26 - Variação do nível da lâmina d'água no mês de novembro, em cm
Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
2025-11-01 00:00:00 → 2025-11-28 00:00:00



Fonte: Autor (2026)

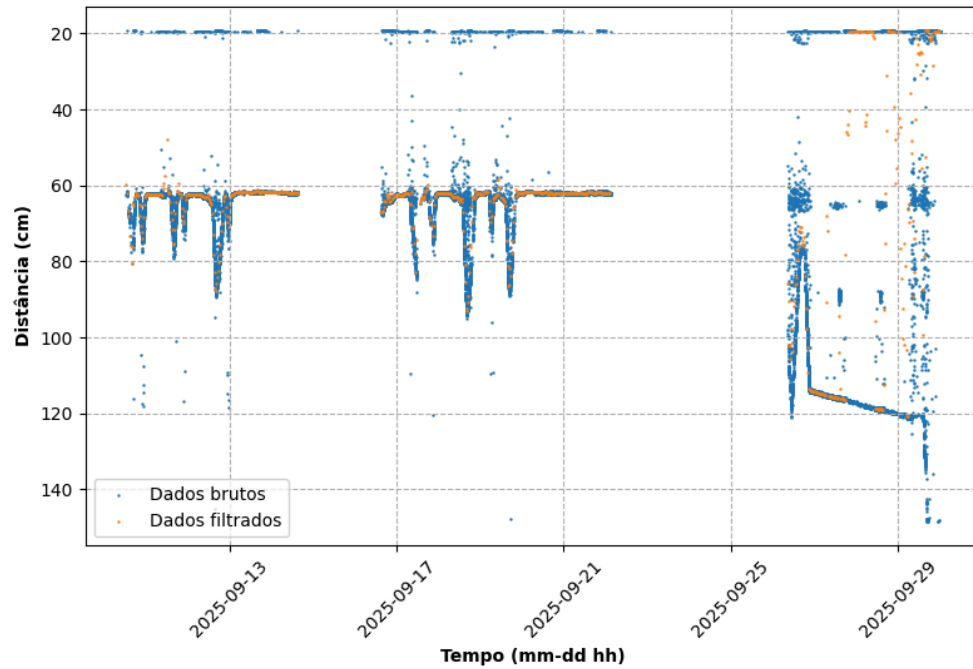
Após o tratamento dos dados, o volume de medições representadas nos gráficos diminuiu drasticamente. Nas figuras 27, 28, 29 e 30, estão representadas as comparações entre os dados brutos (em azul) e os dados filtrados (em laranja):

Figura 27 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados durante o período completo
Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
2025-08-28 00:00:00 → 2025-11-28 00:00:00



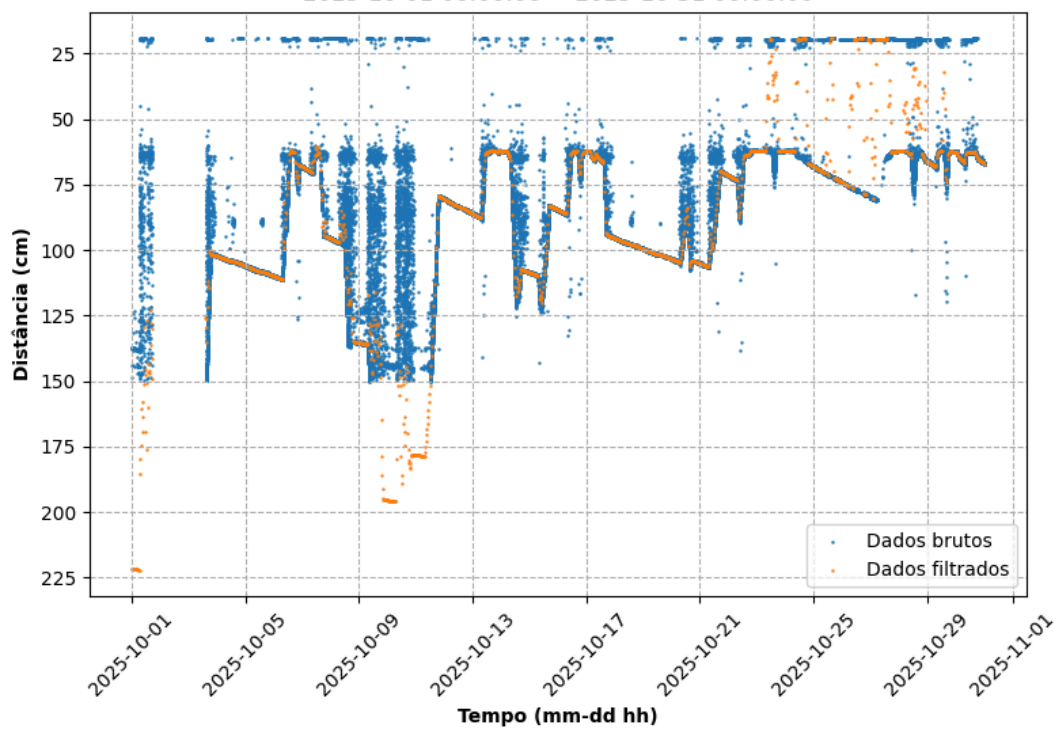
Fonte: Autor (2026)

Figura 28 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados no mês de setembro

Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
2025-09-01 00:00:00 → 2025-09-30 00:00:00

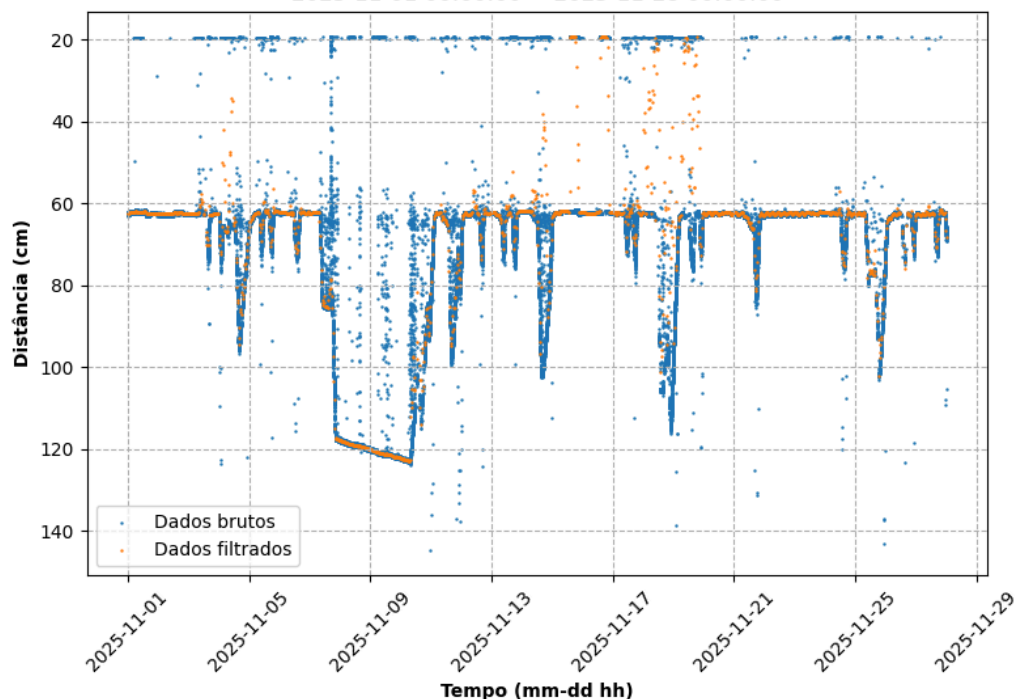
Fonte: Autor (2026)

Figura 29 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados no mês de outubro

Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
2025-10-01 00:00:00 → 2025-10-31 00:00:00

Fonte: Autor (2026)

Figura 30 - Comparativo entre dados brutos e dados tratados no mês de novembro
 Variação da distância da lâmina de água para o sensor no tempo
 2025-11-01 00:00:00 → 2025-11-28 00:00:00



Fonte: Autor (2026)

Na Tabela 8, a análise estatística dos dados filtrados pode ser observada. Apesar da média dos dados ter sido 74,17 cm, os valores mais observados estão por volta de 60 cm, quando não há consumo e a cisterna está cheia.

Tabela 8 - Análise estatística dos dados filtrados, em cm

Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
19,30	222,01	74,17	28,73	0,39

Fonte: Autor (2026)

Apesar de os dados ao estarem mais filtrados apresentarem visivelmente um volume menor de *outliers*, ainda existe uma quantidade considerável de ruído. Silva *et al.* (2024) desenvolveram um sistema de monitoramento de nível de água em cisterna composto por uma placa ESP32 e um sensor HC-SR04, testando-o em um modelo reduzido. Os testes foram realizados em triplicatas, analisando os valores registrados no início e no final dos testes tanto na condição de abastecimento quanto a de drenagem (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores de cota da lâmina d'água inicial e final

Drenagem				Abastecimento			
Teste	Valor	Inicial (cm)	Final (cm)	Teste	Valor	Inicial (cm)	Final (cm)
1	Média	3,76	24,40	4	Média	34,19	16,45
	Desv. Pad.	0,2334	0,2395		Desv. Pad.	0,1874	0,2005
2	Média	4,05	23,63	5	Média	34,18	16,73
	Desv. Pad.	0,3054	0,1909		Desv. Pad.	0,0497	0,1838
3	Média	3,76	23,29	6	Média	34,12	16,61
	Desv. Pad.	0,3413	0,2494		Desv. Pad.	0,0574	0,3530

Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2024)

Os resultados obtidos no modelo foram promissores, com o maior desvio padrão sendo igual a 0,3530 e o menor igual a 0,0497. Isso parece indicar a interferência de fatores no meio em que o sensor está inserido, como sujeira no interior do reservatório ou o acúmulo de gotículas de água na superfície externa do transdutor. A suscetibilidade a interferências externas é uma das desvantagens dos sensores ultrassônicos (Coutinho Filho, 2024).

Além disso, a frequência das leituras do sensor pode ter aumentado o ruído dos dados e influenciado o volume de *outliers* nos valores de consumo calculado, visto que as ondulações na superfície da água foram captadas nas leituras e repetidamente agregadas no cálculo do consumo em cada janela temporal. A ausência de uma análise consciente do ambiente e de possíveis problemas nos equipamentos em sistemas de monitoramento automatizados, que dependem de sensores e sistemas que não tem a mesma capacidade de percepção que um operador humano teria em observar e encontrar problemas como o ruído causado por ondulações na superfície da água, obstruções ou falhas do equipamento, acaba por criar uma interferência ambiental que precisa ser considerada (Foletto, 2025).

Para encontrar uma forma de reduzir os ruídos, recomenda-se em futuras pesquisas testar intervalos de tempo maiores entre cada leitura do sensor, instalando no mínimo 3 sensores ultrassônicos, cada um com frequências de medição diferentes. O volume de ruído nos dados de cada sensor seriam comparados, bem como o valor de cota da lâmina d'água em determinadas janelas temporais, escolhendo os valores mais próximos e eliminando os mais discrepantes. Outro método seria testar o uso de uma sonda hidrostática de nível, a fim de

comparar o volume de ruídos presentes nas medições deste sensor e do sensor ultrassônico de nível. Ding *et al.* (2025) utilizaram sensores de nível d'água hidrostáticos DFRobot KIT0139 e OTT PLS no seu sistema de monitoramento, chegando a conclusão de que estes sensores necessitam de uma baixa calibração (embora ainda recomendem realizá-la de acordo com o ambiente) e os dados provenientes de suas leituras tem uma alta confiabilidade.

4.2 Monitoramento do consumo de água

Para realizar a calibração do modelo, foram coletados durante um período de 3 meses (28 de agosto de 2025 à 28 de novembro de 2025) os volumes medidos pelo hidrômetro do Bloco I. Os dados de consumo e vazão diária estimada podem ser observados no Apêndice A.

Os finais de semana e feriados não foram contabilizados. Para o cálculo da variação do tempo (Δt), assumiu-se que não há consumo nos finais de semana e feriados, devido ao edifício não estar sendo utilizado. Além disso, o volume que foi aferido em um registro qualquer r_t corresponde ao que foi consumido no intervalo de tempo $\Delta t = r_t - r_{t-1}$, onde r_{t-1} é o registro anterior. Da mesma maneira, $\Delta v = v_t - v_{t-1}$, onde Δv representa a variação do volume entre registros, v_t corresponde ao volume registrado em uma medição r_t qualquer, e v_{t-1} ao volume registrado na medição imediatamente anterior r_{t-1} .

Por fim, o consumo diário estimado é dado pela expressão $C(\Delta t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} \cdot 1 \text{ dia}$. Como Δt é expresso em dias, multiplica-se a expressão por 1 dia, para remover a unidade de tempo e manter somente o volume consumido no dia correspondente. Além disso, $C(\Delta t)$ corresponde ao consumo total do dia anterior ao da medição (ou seja, corresponde ao dia em que foi realizada a medição r_{t-1}). Ademais, uma análise do consumo diário estimado não abrange as variações do consumo ao longo do dia, porém ainda auxilia na compreensão dos fenômenos que influenciam a demanda por água em um período de tempo mais prolongado, como um semestre por exemplo.

A partir dos dados coletados, foi realizada uma análise estatística do consumo de água registrado durante o período desse estudo, sendo os resultados disponíveis na Tabela 10. O mês de outubro teve o maior coeficiente de variação, o que condiz com uma ocupação do edifício inconstante devido ao final do período letivo. Já novembro teve o menor coeficiente de variação, traduzindo-se em um grau de uso da edificação mais regular, estando de acordo com o esperado para o início de um novo período letivo. As médias dos meses de setembro e novembro resultaram em valores muito próximos, porém os seus valores de desvio padrão

destoam muito entre si. Isso pode ser explicado por uma maior inconstância no consumo observado em setembro, que teve o maior consumo máximo observado ($37,66 \text{ m}^3$) e um consumo mínimo inferior à metade do consumo mínimo de novembro ($3,00 \text{ m}^3$ e $7,99 \text{ m}^3$, respectivamente), o que reflete em seu coeficiente de variação também superior ($58,73\%$), indicando assim um maior grau de dispersão dos dados nesse mês. No entanto, mesmo apresentando coeficientes de variação muito superiores ao coeficiente de variação de novembro, os meses de setembro e outubro tiveram medianas mais próximas de suas respectivas médias.

Tabela 10 - Análise estatística do consumo calculado a partir do hidrômetro, em m^3

	Número de semanas	Média \pm Desvio padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Coeficiente de variação
Setembro/2025	3	$12,49 \pm 7,34$	12,94	3,00	37,66	58,73%
Outubro/2025	5	$6,34 \pm 5,76$	6,03	0,00	25,92	90,78%
Novembro/2025	4	$12,02 \pm 2,25$	10,12	7,99	16,15	18,70%
Período completo	12	$10,16 \pm 6,16$	10,37	0	37,66	60,59%

Fonte: Autor (2026)

Analisando a Tabela 10 de maneira geral, comparando os resultados encontrados para os meses de setembro, outubro e novembro, é possível observar uma grande influência da sazonalidade nos perfis de consumo de cada mês. A sazonalidade é o conjunto de variações regulares e previsíveis ocasionadas em um determinado período do ano, devido a influências climáticas, socioeconômicas, culturais e/ou geográficas (FACIAP, 2025). Na tabela 10, torna-se claro a influência da sazonalidade mensal no consumo de água. Porém, um período de 12 semanas não engloba as influências sazonais semestrais e anuais, que podem desempenhar um papel importante no mapeamento do perfil de consumo de água da edificação e na calibração do sistema de monitoramento.

Por sua vez, os dados de consumo fornecidos pelo código podem ser observados no Apêndice B. Os dados dessa tabela utilizaram de janelas temporais de N igual a 25 minutos, pois foram as que apresentaram os dados com menor dissonância com relação aos observados no hidrômetro. Devido aos problemas com corrosão dos equipamentos, o início da coleta de dados para cálculo da vazão foi retardado, começando no dia 10/09/2025. Além disso, o sistema manteve-se operante nos finais de semana, por isso foram excluídos os valores de consumo calculados durante esses dias.

A análise estatística do consumo calculado pelo código pode ser vista na Tabela 11.

Tabela 11 - Análise estatística do consumo calculado pelo código no Python, em m³

	Número de semanas	Média ± Desvio Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Coefficiente de Variação
Setembro/2025	3	17,33 ± 25,12	6,96	0,02	80,19	144,93%
Outubro/2025	5	10,95 ± 10,26	7,16	0,59	35,63	93,78%
Novembro/2025	4	11,54 ± 14,41	6,10	0,64	63,03	124,84%
Período completo	12	12,49 ± 15,69	6,96	0,02	80,19	125,53%

Fonte: Autor (2026)

Apesar de o mês de novembro de 2025 apresentar uma média próxima à média obtida pelo mesmo mês nas medições do hidrômetro, o restante dos dados foi muito destoante dos apresentados na Tabela 10. Além disso, os coeficientes de variação apresentaram resultados acima de 100%, indicando uma grande heterogeneidade dos dados e demonstrando que a média não é representativa. Isso implica que embora as médias apresentadas no mês de novembro em ambas as tabelas sejam semelhantes, os dados que elas representam são muito díspares entre si. Em contrapartida, os valores mínimo e coeficiente de variação do mês de outubro foram semelhantes em ambas as tabelas, o que significa uma tendência semelhante na distribuição dos dados. Isso indica que, apesar das discrepâncias nos valores medidos (com os valores calculados pelo código sendo mais inflados), os valores obtidos pelo código no mês de outubro foram mais próximos dos valores medidos no hidrômetro do que suas contrapartes de outros meses.

Na Tabela 12, encontra-se a correlação estatística entre os dados do hidrômetro e os dados obtidos através do código. Para as médias de consumo registrados pelo hidrômetro de cada intervalo de tempo analisados, foi realizado o recálculo utilizando somente os valores presentes no Apêndice C, respeitando assim o número de amostras utilizadas para a correlação entre os dados do hidrômetro e os dados do código.

Tabela 12 - Correlação estatística entre os dados do hidrômetro e do código

	MAE	MAE (%)	RMSE	RMSE (%)	MBE	MBE (%)	Pearson	Spearman	p-valor
Setembro/2025	17,29	29,89	26,81	101,42	44,25	30,22	-0,116	0,064	0,314
Outubro/2025	7,09	32,18	11,06	106,40	100,50	93,74	0,277	0,324	0,027
Novembro/2025	9,48	- 21,14	14,01	16,55	8,80	4,07	0,280	0,226	0,446
Período completo	10,26	6,92	16,84	75,51	153,55	32,67	0,098	0,225	0,105

Fonte: Autor (2026)

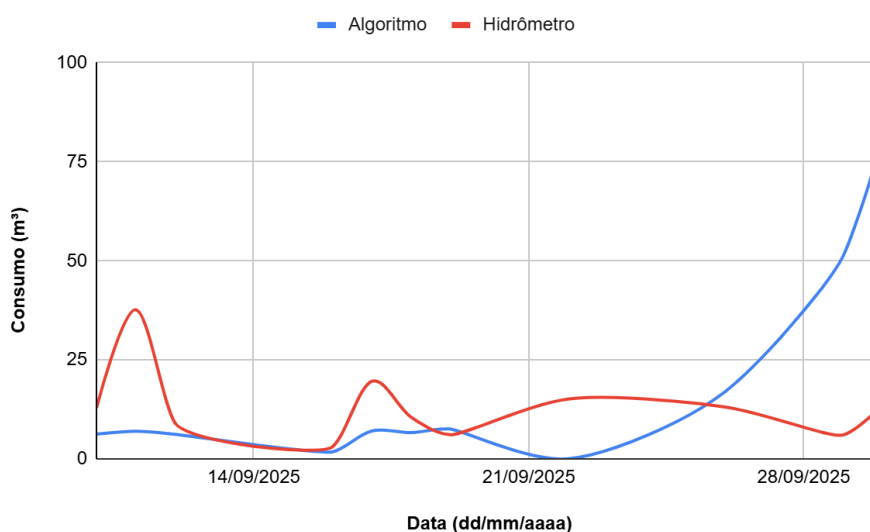
Para analisar os resultados dos erros relativos baseados no MAE, no RMSE e no MBE, o parâmetro utilizado foi o estabelecido pela Portaria Inmetro nº 155/2022 em seu anexo D. A faixa de medição adotada foi de acordo com o consumo diário médio de cada período analisado (setembro de 2025, outubro de 2025, novembro de 2025 e a série histórica completa). Sendo assim, o Erro Máximo Admissível adotado foi de $\pm 2\%$, pois todos os valores médios se enquadram dentro dos limites da faixa de medição superior.

4.2.1 Setembro/2025

Como pode ser observado na Tabela 12, o mês de setembro apresentou os piores dados absolutos de MAE e RMSE, com os respectivos resultados de aproximadamente $17,29 \text{ m}^3$ e $26,81 \text{ m}^3$. Já os erros relativos do MAE e do RMSE foram de $29,89\%$ e $101,42\%$, respectivamente, muito acima da faixa aceitável de 2% . O valor do MBE relativo foi de $30,22\%$, um valor muito próximo ao do MAE. Quanto aos coeficientes de correlação, o coeficiente de Pearson de apresentou um valor muito baixo e negativo, o que estatisticamente indica a ausência de um padrão que ambos os parâmetros estejam seguindo. O mesmo vale para o coeficiente de Spearman, que apresentou um valor extremamente baixo de $0,064$. Somado a isso, o p-valor obteve um resultado de $0,314$, que representa uma chance expressiva da hipótese nula ser verdadeira.

Na Figura 31, encontra-se o gráfico comparativo dos consumos registrados pelo hidrômetro e pelo código, em formato de série temporal:

Figura 31 - Gráfico do consumo em função do tempo (setembro)



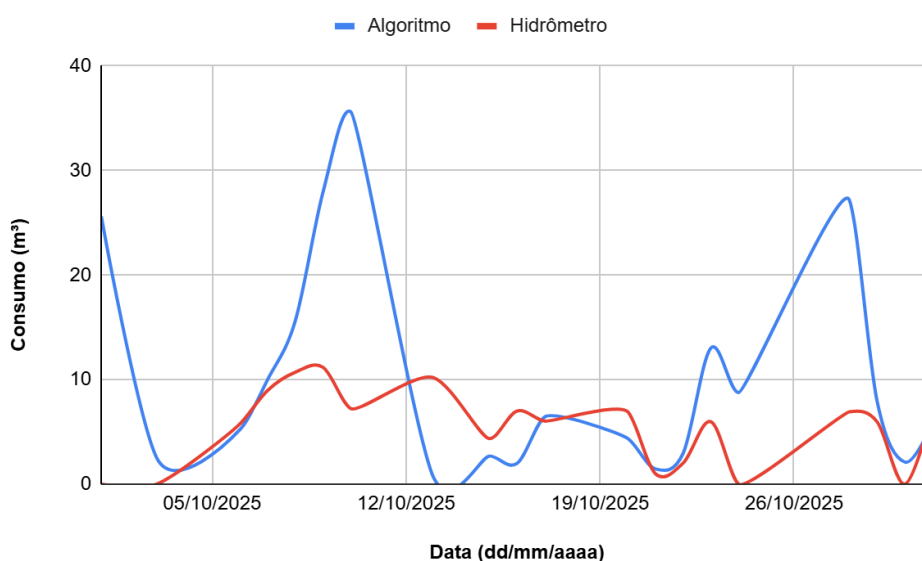
Fonte: Autor (2026)

4.2.2 Outubro/2025

Apesar de o mês de outubro ter obtido os menores valores absolutos de MAE e RMSE, o que poderia indicar que a diferença entre os dados do hidrômetro e do código neste mês foi menor, os valores de MAE relativo, RMSE relativo, MBE e MBE relativos foram os maiores, com estes dois últimos sendo maiores que os valores combinados dos mesmos parâmetros dos outros meses. Assim como no mês de setembro, os erros encontrados entre a medição do código e do hidrômetro foram muito superiores a 2%, tornando inviável o uso das medições do sistema remoto como parâmetro confiável para esse mês. No entanto, o p-valor apresentado foi menor que 0,05, sugerindo uma chance baixa da hipótese nula ser verdadeira.

Esse resultado pode ter sido causado devido a um padrão similar de alternância entre aumento e diminuição do consumo ao longo da série temporal entre o modelo e o hidrômetro, principalmente após o dia 19/10/2025, como pode ser observado na Figura 32. Embora o coeficiente de correlação de Pearson tenha apresentado uma força de correlação baixa, o coeficiente de correlação de Spearman apresentou um valor de 0,324, se enquadrando como uma correlação de força média. Esse resultado para o coeficiente de Spearman parece reforçar a presença de uma similaridade na forma como o consumo se comporta, apesar dos valores muito discrepantes entre os dois métodos de aferição.

Figura 32 - Gráfico do consumo em função do tempo (outubro)



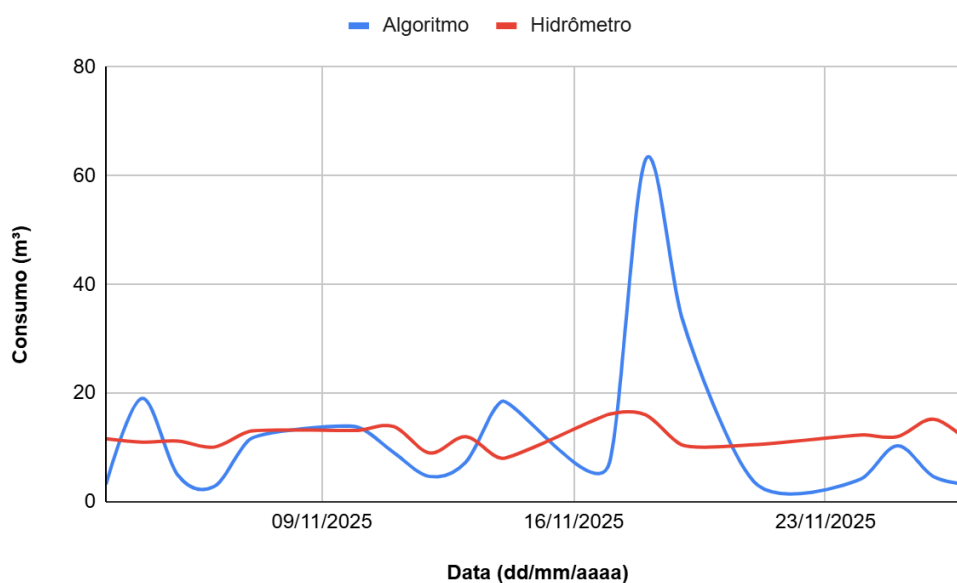
Fonte: Autor (2026)

4.2.3 Novembro/2025

O mês de novembro, por sua vez, obteve os menores valores de MAE, RMSE e MBE relativos, com este último apresentando um valor de 4%. Isso coincide com este mês também tendo apresentado o menor coeficiente de variação do consumo de água registrado no hidrômetro, o que pode indicar uma correlação entre um padrão de consumo mais estável e erros menores de cálculo do sistema de monitoramento. Apesar disso, estes erros ainda são superiores ao limite aceitável de 2%, embora representem uma grande melhora com relação aos meses anteriores. Esses resultados podem ter sido influenciados pelo início de um novo período letivo na universidade, em contrapartida ao período de término do período letivo no mês de outubro, mas seriam necessárias mais observações por um período mais longo de tempo para testar essa hipótese. Os coeficientes de Pearson e Spearman, no entanto, apresentaram valores de correlação baixa, embora o coeficiente de Pearson tenha se aproximado do limite superior da faixa de correlação baixa, com um valor de 0,280.

Além disso, o p-valor obtido foi o maior dentre os períodos de tempo analisados, indicando uma alta chance da hipótese nula não poder ser descartada. Estes resultados sugerem uma baixa similaridade entre as mudanças nos padrões de consumo registradas por ambos os métodos. No entanto, como pode ser observado na Figura 33, a razão dessa baixa correlação pode ter sido causada principalmente pelo pico de consumo registrado pelo código entre os dias 16/11/2025 e 23/11/2025, mais especificamente nos dias 18/11/2025 e 19/11/2025, que registraram consumos de 63,03 m³ e 34,06 m³, respectivamente.

Figura 33 - Gráfico do consumo em função do tempo (novembro)

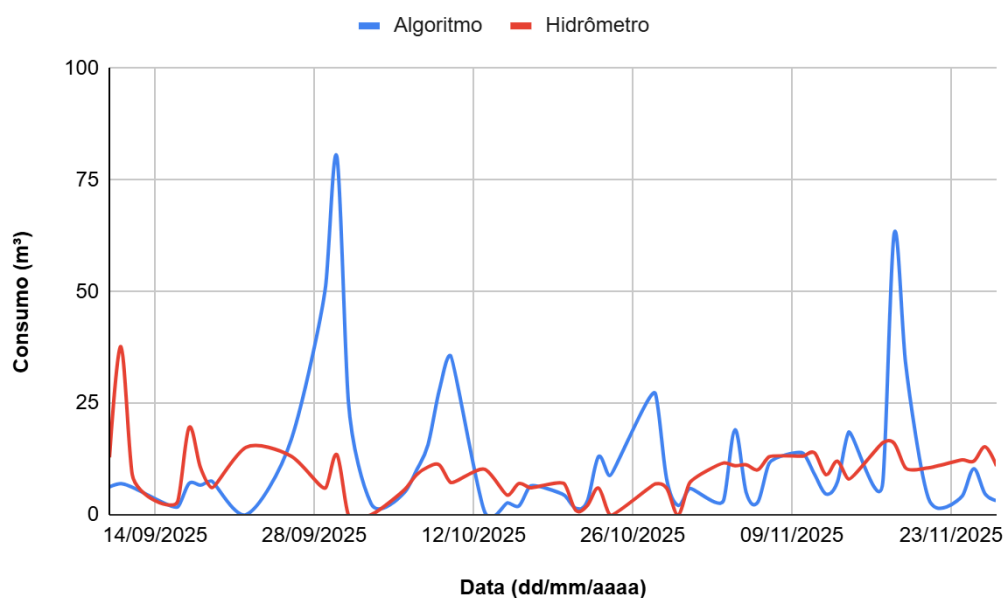


Fonte: Autor (2026)

4.2.4 Série histórica completa

Na Figura 34, se encontra o gráfico do consumo em função do tempo, exibindo tanto a série temporal dos dados provenientes do hidrômetro quanto do código:

Figura 34 - Gráfico do consumo em função do tempo (série histórica completa)



Fonte: Autor (2026)

A série histórica completa apresentou valores de MAE, RMSE e MBE relativos menores que os de setembro e outubro, por conta dos dados referentes ao mês de novembro. O valor relativo do MAE foi o menor de todos os períodos analisados, com 6%. O motivo disso foi o valor negativo do mês de novembro, que foi o único mês em que o valor absoluto do MAE (ou seja, o valor médio dos erros de medição do código ao longo do período estudado) foi menor que a média dos valores registrados pelo hidrômetro, indicando que o modelo de medição remota subestimou os valores de consumo. Além disso, os valores de correlação calculados através dos testes de Pearson e Spearman apresentaram valores dentro da faixa de correlação fraca, indicando uma baixa similaridade entre os padrões de consumo medidos por um método em comparação com o outro.

A partir desses resultados, é possível inferir que as mudanças nos padrões de consumo afetam na eficácia dos cálculos do consumo realizados pelo código, podendo torná-los mais próximos ou mais distantes do consumo registrado pelo hidrômetro. Essa hipótese atribui um peso maior à influência da sazonalidade no monitoramento do consumo de água, mas também abre margem para assumir que os erros altos apresentados pelos meses de setembro (MAE

igual a 29,89%, RMSE igual a 101,42% e MBE igual a 30,22%) e outubro (MAE igual a 32,18%, RMSE igual a 106,40% e MBE igual a 93,74%) sejam devido à alta sensibilidade provocada por um tempo insuficiente de monitoramento, que não permite contemplar toda a influência da sazonalidade no funcionamento do sistema de monitoramento do consumo. Outros parâmetros, combinados com a sazonalidade do consumo, também podem ter influenciado nesses resultados, como os próprios aspectos físicos do ambiente e os sensores utilizados.

Para um trabalho futuro, recomenda-se a adição de um sensor de vazão para comparar a precisão entre as medições realizadas por ele e pelo código, utilizando o registro do hidrômetro como referência. Alves (2015) utilizou dois modelos de sensor de fluxo, sendo diferenciados pelo diâmetro do bocal de entrada e a capacidade por minuto de vazão de água. Americo e Izidoro (2022) utilizaram um sensor de vazão modelo YF-S201 em seu sistema de monitoramento do consumo de água, obtendo resultados satisfatórios. Além disso, recomenda-se ampliar o período de estudo, para reduzir a sensibilidade e compreender a influência da sazonalidade na eficácia do sistema de medição remoto.

4.3 Ferramenta de monitoramento contínuo - Painel Looker Studio

Na Figura 35, pode ser observado o painel de monitoramento remoto do consumo de água e da variação da altura da lâmina d'água. A esquerda, está o gráfico de série temporal contendo os dados tratados das leituras de variação do nível d'água na cisterna. Os valores da série temporal apresentam diferenças mínimas dos valores tratados pelo código, diferença essa causada pela agregação que o Looker Studio realiza em suas métricas de forma automática e embutida. Já à direita, está a tabela contendo os dados de consumo e valor registrado no relógio do hidrômetro. Devido ao consumo calculado pelo código apresentar erros grandes com relação ao hidrômetro, optou-se por não utilizar o consumo calculado por ele no painel.

Figura 35 - Painel de monitoramento remoto do consumo e nível de água

Monitoramento da cisterna do Bloco I campus Juazeiro do Norte

(PIBIC) EDITAL 01/2024/PRPI/UFCA CHAMADA PIICT/CNPq, FUNCAP E UFCA
 Projeto: Descarte de efluente residual livre em rede de distribuição d'água de uma instituição federal de ensino superior
 Orientadora: Jaqueline Vigolo Coutinho
 Bolsistas envolvidos: Fellype Guilherme Ramalho Guerra da Silva, Lucas Menezes Alves e Pedro da Silva Viana



Fonte: Autor (2026)

O desenvolvimento do painel de monitoramento utilizando o Looker Studio apresentou tanto pontos positivos quanto negativos. Dentre os pontos positivos, destaca-se a facilidade de interação com os dados contidos no *dashboard*, que apresenta diversas opções diferentes de como apresentar os dados como séries temporais, tabelas, gráficos de barra, gráficos de pizza, dentre outros. A opção de adicionar controles, que permitem aos usuários facilmente adicionar filtros aos dados, torna a busca e análise de informações mais eficiente. Além disso, a criação de dashboards no LookerStudio se demonstrou mais acessível do que outras opções como o PowerBI, que necessita de uma assinatura para utilizar, pois o Looker Studio conta com uma versão gratuita. A integração do Looker Studio com outras ferramentas do Google, como o Google Drive, também facilita na importação da base de dados para o painel e a atualização contínua e remota dos dados (Aksoy; Özdem; Daş, 2025).

Em contrapartida, um dos principais pontos negativos encontrados no Looker Studio foi a baixa quantidade de dados que ele comporta, no que se refere às necessidades de um painel que recebe um fluxo de dados contínuo. Após um certo número de dados, que não foi possível determinar a quantidade exata correspondente em linhas da planilha importada como base de dados, as tabelas e gráficos não conseguem processar e exibir as informações, aparecendo

uma mensagem de erro. Além disso, o painel apresentou lentidão em carregar as informações quando um grande número de dados já havia sido importado.

4.4 Conclusão

A partir desse trabalho, conclui-se que a automação dos processos de monitoramento do nível de água em reservatórios e do consumo de água são campos bem promissores, com capacidade para gerar um salto de eficiência nos processos de gestão de recursos hídricos, e uma variedade de equipamentos modernos e metodologias a serem exploradas.

Além disso, através do monitoramento do nível de água do reservatório, é possível detectar com antecedência possíveis problemas, como vazamentos, infiltrações ou problemas na bomba, através de variações da altura da lâmina d'água fora do padrão normalmente observado.

Dos objetivos propostos, o desenvolvimento do código em Python para redução dos ruídos da leitura do sensor e a elaboração de um painel para acompanhamento da variação do nível de água da cisterna e do consumo de água da edificação foram os que alcançaram resultados mais significativos.

Ao longo dos meses, foi possível perceber uma redução no volume de *outliers* nos gráficos que descrevem a variação da cota da lâmina de água da cisterna, com o mês de novembro apresentando um padrão mais claro do comportamento do nível da água em comparação com os meses de setembro e outubro. Além disso, o problema de perda de dados devido a quedas do sinal de internet foi solucionado após ajustes do código no ESP32, que possibilitou salvar as leituras na memória interna do microcontrolador e registrar na planilha de acompanhamento no momento em que a conexão com a rede wi-fi fosse restaurada.

Já o cálculo do consumo de água e a calibração do código não alcançaram os resultados desejados, com os valores calculados sendo, no geral, muito inflados com relação aos valores observados no hidrômetro da edificação. Isso ocorreu devido à alta sensibilidade causada pelas séries históricas pequenas, além de outros parâmetros que não puderam ser observados devido à falta de outros modelos de sensores para comparar com o AJ-SR04M. O painel, por sua vez, atingiu a sua finalidade de expor a variação do nível de água na cisterna e o consumo de água no Bloco I do Campus Juazeiro do Norte da UFCA, embora não tenha sido adicionado a ele os valores de consumo calculados pelo código, já que estes foram muito discrepantes dos valores observados na realidade.

No entanto, a possibilidade de monitorar de forma remota, contínua e acessível o nível

de água e de encontrar facilmente os registros do consumo de água ao longo do tempo traz um impacto positivo aos responsáveis por operar o sistema de abastecimento da edificação. Nesse sentido, a contribuição do painel é de grande valor, auxiliando a detectar problemas no abastecimento de água do reservatório com antecedência. Por estar acessível no site da universidade, também auxilia a democratizar o acesso à informação de uso da água em uma das edificações da instituição, contribuindo assim com a transparência e a sustentabilidade.

Para auxiliar na continuidade dessa linha de pesquisa, sugere-se a ampliação da frequência de leituras do sensor de nível de água, para contribuir no entendimento do número de registros no volume de ruído e nos erros do cálculo de vazão. Também, incentiva-se o teste de sensores hidrostáticos de nível, para comparar sua eficácia com relação ao sensor ultrassônico de nível e descobrir possíveis interferências no funcionamento do modelo ultrassônico presentes no ambiente do estudo.

Quanto ao monitoramento da vazão de consumo, recomenda-se estender a coleta de dados por um período de tempo mais longo, com o intuito de entender os efeitos da sazonalidade na precisão do cálculo do consumo. Também sugere-se o uso de um sensor de vazão, para comparar a sua eficácia com o hidrômetro e com o código de cálculo do consumo.

Por fim, embora o Looker Studio tenha se mostrado uma ótima ferramenta para tratamento e apresentação de dados, encoraja-se que em futuras pesquisas se explorem novas metodologias para o desenvolvimento do painel, para que a limitação de dados comportados e a lentidão sejam minimizados ou resolvidos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Sanne Anderson de Moura; MENDONÇA, Luiz Alberto Ribeiro; PEREIRA, José de Araújo; FRISCHKORN, Horst. Interferências antrópicas na recarga de aquíferos no Vale do Cariri - Ceará. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23737>. Acesso em: 28 abr. 2025

CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno; VERÍSSIMO, Liano Silva. A importância das águas subterrâneas do Vale do Cariri, Chapada do Araripe – Estado do Ceará. *In*: ARAÚJO, Raimundo Luiz de; PONTES, Laércio Mesquita (org). **Recursos hídricos do Ceará**. Fortaleza, CE: IPECE, 2005. p. 65–70. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Recursos_Hidricos_do_Ceara.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

SILVA, Fellype Guilherme Ramalho Guerra da, *et al.* Sistema de medição de nível d'água usando microcontrolador e sensor ultrassônico para estimativas de consumo em rede de abastecimento d'água de uma instituição de ensino superior. *In*: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (SILUBESA), 21., 2024, Recife. **Anais eletrônicos** [...] Belo Horizonte: ABES, 2023. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/21silubesa_download/812_tema_i.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

HELLER, Léo. Abastecimento de água, sociedade e ambiente. *In*: HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio de. **Abastecimento de água para consumo humano**. 1. UFMG. 2016. p. 29-64.

MELNIK, Roderick. Universality of Mathematical Models in Understanding Nature, Society, and Man-Made World. **Mathematical and Computational Modeling: With Applications in Natural and Social Sciences, Engineering, and the Arts**, p. 1-16, 2015.

MELO, Bruno Miquéias de; HENRIQUE, Fabrício Gustavo. Sistema de aquisição de dados em saneamento utilizando Arduino. **Águas Subterrâneas**, 2018.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3, p. 33-44, 2001.

TORRES, João Delfino; MONTEIRO, Igor Oliveira; SANTOS, Jefferson Rodrigues dos; ORTIZ, Maurício Soares. Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 2015.

COSTA, Daniel Jadyr Leite; CÓRDOBA, Rodrigo Eduardo; AKUTSU, Jorge; BARRETO, Rodrigo; Santos, Lucas Barreto dos. Medição do consumo de água em propriedades

rurais: desafios e alternativas tecnológicas. *In*: PALHARES, Julio Cesar Pascale (org). **Produção animal e recursos hídricos: uso da água nas dimensões quantitativa e qualitativa e cenários regulatórios e de consumo**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 97 – 156.

COSTA, Daniel Jadyr Leite; CAMARGO, Bene Eloi Mendes; TOLENTINO, André Guilherme Pradebon; AKUTSU, Jorge; PERIOTTO, Natalia Andricioli; TANAKA, Marcel Okamoto. Análise comparativa de métodos de medição de vazão em corpos d'água superficiais. **Engenharia Urbana em Debate**, v. 4, n. 1, p. 6-25, 2023.

JÚNIOR, Antônio Pereira Magalhães. **A nova cultura de gestão da água no século XXI: lições da experiência espanhola**. São Paulo: Blucher, 2017. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 05 abr. 2025.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Planos de recursos hídricos das regiões hidrográficas do Ceará: Síntese do plano da Região Hidrográfica do Rio Salgado**. Fortaleza, 2025. p. 131.

CEARÁ. Instituto de Estudos e Pesquisas para o Desenvolvimento do Estado do Ceará. **Cenário atual dos recursos hídricos do Ceará**. Fortaleza, 2008. p. 174.

LOPES, Cícero Roberto Martins *et al.* Qualidade das águas subterrâneas no Vale do Cariri - área em Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha - estado do Ceará, Brasil. **Águas Subterrâneas**, 2005.

ANDRADE, Jucilaine Aparecida de; NUNES, Marcos Antônio. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço**, 2014.

MONTEIRO, Luciana Gomes; CORDEIRO, Rosemary de Matos; ARAGÃO, Janisi Sales; SILVA, Eveline Menezes Rodrigues da; SILVA, Lucivania Gomes da. Perdas em sistemas de abastecimento de água em comunidades rurais na região metropolitana do Cariri. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 524-544, 2020. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/8016.. Acesso em: 11 maio. 2025.

PEREIRA, Leonel Gomes; DE OLIVEIRA ILHA, Marina Sangoi. Avaliação da submedição de água em edificações residenciais unifamiliares: o caso das unidades de interesse social localizadas em Campinas, no estado de São Paulo. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 2, p. 7-21, 2008.

DELMÉE, Gérard Jean. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2003. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 05 abr. 2025.

SEKYERE, Charles Kofi Kafui *et al.* Techno-Economic Assessment of Non-Revenue Water: A Case Study at AER, GWCL. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 12, n. 06, p. 480, 2020.

ARAGÃO, Helder Guimarães; PEREIRA, Vilmar Alves; SILVA, Rodrigo Florêncio da. Geotecnologias livres e gratuitas aplicadas na gestão do saneamento básico: um estudo de caso na empresa baiana de águas e saneamento. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 1-16, 2022.

SANTOS, José Joeferson Soares dos *et al.* Outorgas de direito de uso dos recursos hídricos na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Salgado. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [S. l.], v. 17, n. 8, p. e10040, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.8-541. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/10040>. Acesso em: 06 jun. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Usos da água**. [Brasília]: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua>. Acesso em: 22 jun. 2025.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), v. 336, 2013.

MUNSON, Bruce R; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Editora Blucher, 2004.

BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo. Pearson. 2008.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos. 2014.

MARANHÃO, Ney; AYRIMORAES, Sérgio. Os usos da água e o desenvolvimento regional. *In*: BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico e Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (org.). **A questão da água no Nordeste**. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/wp-content/uploads/pdf/agua-nordeste.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025. p. 121-153.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual 2024**. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/acervo/detalhe/106160. Acesso em: 10 jun. 2025.

BARBOSA, Flávia Darre. **Relatório técnico: Entrega 02**. Belo Horizonte: Interáguas, 2023.

ALEXANDRE, Ananda Cardoso; KALBUSCH, Andreza; HENNING, Elisa. Avaliação do impacto da substituição de equipamentos hidrossanitários convencionais por equipamentos economizadores no consumo de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 05, p. 1005-1015, 2017.

SILVA, Carlos Alberto Miranda da; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Automação de sistemas de abastecimento de água. *In*: TSUTIYA, Milton Tomoyuki (org.). **Abastecimento de água**. 1. USP. 2006. p. 577- 643.

RAZA, Nazia; MOAZENI, Faegheh. Optimal cybersecurity framework for smart water system: Detection, localization and severity assessment. **Water Research**, v. 281, p. 123517, 2025.

TAORMINA, Riccardo *et al.* Characterizing cyber-physical attacks on water distribution systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 143, n. 5, p. 04017009, 2017.

RUEZZENE, Camila Bermond; MIRANDA, Renato Billia de; TECH, Adriano Rogério Bruno; MAUAD, Frederico Fábio. PREENCHIMENTO DE FALHAS EM DADOS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DE MÉTODOS TRADICIONAIS E POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 29, p. 177–204, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/15184>. Acesso em: 07 set. 2025.

LI, Y. *et al.* Constructing Reservoir Area–Volume–Elevation Curve from TanDEM-X DEM Data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 14, p. 2249–2257, 2021.

HUBERT, M.; VANDERVIEREN, E. An adjusted boxplot for skewed distributions. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 52, n. 12, p. 5186–5201, ago. 2008.

MACHEFER, Méliissande *et al.* Challenges and Evolution of Water Level Monitoring towards a Comprehensive, World-Scale Coverage with Remote Sensing. **Remote Sensing**, v. 14, n. 15, p. 3513, 22 jul. 2022.

MAZAREI, Arefeh *et al.* Online boxplot derived outlier detection. **International journal of data science and analytics**, v. 19, p. 83–97, 20 maio 2024.

ROOS-HOEFGEEST TORIBIO, Mario *et al.* A Novel Approach to Speed Up Hampel Filter for Outlier Detection. **Sensors**, v. 25, n. 11, p. 3319, 25 maio 2025.

ROSS, N. *et al.* Monitoring reservoir water elevation changes using Jason-2/3 altimetry

satellite missions: exploring the capabilities of JASTER (Jason-2/3 Altimetry Stand-Alone Tool for Enhanced Research). **International Journal of Digital Earth**, v. 17, n. 1, 23 set. 2024.

SCHWERTMAN, N. C.; OWENS, M. A.; ADNAN, R. A simple more general boxplot method for identifying outliers. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 47, n. 1, p. 165–174, ago. 2004.

MARTINS, Letícia Lopes; MARTINS, Wander Araújo; DE MORAES, Jener Fernando Leite; JÚNIOR, Mário José Pedro; DE MARIA, Isabella Clerici. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 576–594, 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.2.p576-594. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243477>. Acesso em: 29 nov. 2025.

LOBÃO, Elídio de Carvalho; PORTO, Arthur José Vieira. Evolução das técnicas de simulação. **Production**, v. 9, p. 13-21, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65131999000100002>. Acesso em: 09 dez. 2025.

WHEELER, Mary F.; PESZYŃSKA, Małgorzata. Computational engineering and science methodologies for modeling and simulation of subsurface applications. **Advances in Water Resources**, v. 25, n. 8-12, p. 1147-1173, 2002.

SAKURADA, Nelson; MIYAKE, Dario Ikuo. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão & Produção**, v. 16, p. 25-43, 2009.

PEREIRA, Marcelo Robson Sousa. **A aplicação do microcontrolador ESP32 no ensino: Medindo posições em função do tempo utilizando o sensor VL53L0X associado ao ESP32**. Especialização em Ensino de Física. Universidade Federal do Amapá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unifap.br/items/2614d9e6-6c7d-4c77-b7aa-2c04777be5b5>. Acesso em: 12 dez. 2025.

KERSCHBAUMER, Ricardo. **Microcontroladores**. Luzerna, [s.n.], 2018. Apostila. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2025.

PEREIRA, Bibiane Aparecida Viana; CHAGAS, João Marcos Novaes; VAZ, Livia Leopoldino. Aplicação da instrumentação no controle de nível. **Bolsista de Valor**, v. 3, 2013.

ALVES, Gabriel Belizário. **Monitoramento do nível de água em reservatórios residenciais utilizando sensor ultrassônico**. Curso Superior em Engenharia Elétrica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/3459>. Acesso em: 15 dez. 2025.

GUIMARÃES, Yara; GIORDAN, Marcelo. Elementos para validação de sequências didáticas. **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 9, p. 1-8, 2013.

DE BARROS, Cleide Bassani. Validação de métodos analíticos. **Biológico, São Paulo**, v. 64, n. 2, p. 175-177, 2002.

DO NASCIMENTO, Bryan Nicolas *et al.* **Medidor de nível de água**. Curso técnico em Eletrônica. ETEC Júlio de Mesquita, 2023. Disponível em: <http://ric-cps.eastus2.cloudapp.azure.com/handle/123456789/17263>. Acesso em: 17 dez. 2025.

TUNDISI, José Galizia. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, 2006.

VILLASANTE, Antonio *et al.* Methodology for stiffness prediction in structural timber using cross-validation RMSE analysis. **Journal of Building Engineering**, p. 112767, 2025.

DE SOUSA, Rodrigo Carvalho. **O impacto da correção do viés nos dados dos satélites METOP-A e NOAA-19 na geração de campos de TSM**. 84f. (Mestrado em Meteorologia) - Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/10/dissert/949412.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2026.

ALVES, Renato Augusto de Paula. **Solução de monitoramento de consumo de água residencial**. 70f. (Graduação em Sistemas de Informação) - Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação, Centro Universitário Eurípides de Marília, Marília, 2015. Disponível em: <https://aberto.univem.edu.br/handle/11077/1385>. Acesso em: 24 jan. 2026.

NASCIMENTO JÚNIOR, Lourival Maurício. **Monitoramento da qualidade da água de consumo humano em Belém-PA: uso de dashboards visando aprimorar a gestão municipal**. Orientador: André Luiz da Silva Salgado Coelho. 2024. 91f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16546>. Acesso em: 24 jan. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Manual do Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Brasília, 2020. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_sisagua_consumo_humano_empresa.pdf. Acesso em: 24 jan. 2026.

JONAS, Paulino. **Sistema integrado de monitorização e gestão de consumos de água e energia em edifícios inteligentes**. Orientador: Frederico Augusto dos Santos Branco. Coorientador: Ana Cristina Briga de Sá. 2024. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Informática e Tecnologias Web) - Departamento de Engenharias, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2024.

DUARTE, Tiago Daltro. **Sistema integrado de monitoramento de consumo de água residencial**. Orientador: Lincoln Machado de Araújo. 2023. 84f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Coordenação do Curso Superior em Engenharia Elétrica, Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

AMERICO, Gabriel Michels; IZIDORO, Cleber Lourenço. Sistema de baixo custo para monitoramento do consumo de água . **Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 292–317, 2022. Disponível em: <https://revistavincci.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincci/article/view/272>. Acesso em: 09 fev. 2026.

KAMBEZIDIS, Harry Demetrios. The Solar Resource. **Earth and Planetary Sciences**. v. 3, p. 27-84, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/root-mean-square-error>. Acesso em: 18 fev. 2026.

SOUSA, Áurea. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados?. **Correio dos Açores**, p. 19-19, 2019. Disponível em: https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/5365/1/Sousa_CA_21%2520Mar%25C3%25A7o%25202019.pdf. Acesso em: 19 fev. 2026.

LAERD STATISTICS. **Pearson's product moment correlation**. Laerd Statistics: Statistical tutorials and software guides, 2020. Disponível em: <https://statistics.laerd.com/statistical-guides/pearson-correlation-coefficient-statistical-guide.php>. Acesso em: 19 fev. 2026.

GUIMARÃES, Paulo Ricardo B. Análise de Correlação e medidas de associação. **Curitiba: Universidade Federal Do Paraná**, p. 1-26, 2017. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~jomarc/correlacao.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2026.

MIOLA, Anna Carolina; MIOT, Hélio Amante. P-valor e dimensão do efeito em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 20, p. e20210038, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jvb/a/ZJmZ6rJNH3NvLV77vVgBW8w/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 22 fev. 2026.

LAERD STATISTICS. **Independent-samples t-test using SPSS Statistics**. Laerd Statistics: Statistical tutorials and software guides, 2019. Disponível em: <https://statistics.laerd.com/spss-tutorials/independent-t-test-using-spss-statistics.php>. Acesso em: 22 fev. 2026.

THORNE & DERRICK INTERNATIONAL. **M170 Residential Multi-Jet Water Meter Cold Water: Product Specification**. Chester-le-Street, [s.d.]. Disponível em: <https://www.heatingandprocess.com/wp-content/uploads/2016/03/Elster-M170-Water-Meter-Product-Data-Sheet.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2026.

BRASIL. Ministério da Economia. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). **Portaria nº 155, de 30 de março de 2022**. Aprova o Regulamento Técnico Metrológico consolidado para medidores para consumo de água potável fria e água quente. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 mar. 2022. Disponível em: <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002971.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2026.

COUTINHO FILHO, Elias Frota. **Simulação de sensor de fluxo ultrassônico**. Orientador: Luis Rodolfo Rebouças Coutinho. 2024. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Quixadá, 2024.

FOLETTTO, Angelo Victor Kraemer. **Metodologia para aferição do nível de canais fluviais por meio de sensores de distância**. Orientador: Jó Ueyama. Coorientador: Caetano Mazzoni Ranieri. 2025. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2025.

AKSOY, Faruk; ÖZDEM, Mehmet; DAŞ, Resul. Comparative review of graphical user interface based data visualization tools. **Turkish Journal of Nature and Science**, v. 14, p. 124-133, 2025. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4558057>. Acesso em: 11 mar. 2026.

RENOVA MEDIÇÃO. **Como funciona o hidrômetro unijato e o hidrômetro multijato?**. Renova Medição, 2023. Disponível em: <https://empresa.renovamedicao.com.br/como-funciona-o-hidrometro-unijato-e-o-hidrometro-multijato/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

PINEDA-TOBÓN, Daniel M.; ESPINOSA-BEDOYA, Albeiro; BRANCH-BEDOYA, John W. Aquality32: A low-cost, open-source air quality monitoring device leveraging the ESP32 and google platform. **HardwareX**, v. 20, p. e00607, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468067224001019>. Acesso em: 14 mar. 2026.

FACIAP. **Sazonalidade: como entender e usar os ciclos do mercado a favor do seu negócio**. Faciap – Federação das Associações Comerciais e Empresariais do Paraná, 2025. Disponível em: <https://site.faciap.org.br/sazonalidade-como-entender-e-usar-os-ciclos-do-mercado-a-favor-do-seu-negocio/>. Acesso em: 04 abr. 2026.

CONSIDERAÇÕES SOBRE O CLIMA E OS RECURSOS HÍDRICOS DO SEMIÁRIDO NORDESTINO. **Caderno Prudentino de Geografia**, [S. l.], v. 1, n. 36, p. 126–142, 2014. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/3176>. Acesso em: 19 ago. 2025.

VERHEYE, Willy H. (Ed.). **Land use, land cover and soil sciences-volume V: Dry lands and desertification**. EOLSS Publications, 2009.

UFCA. **Camilo Santana visita obras do Hospital Universitário da UFCA. Agenda inclui assinatura da ordem de serviço do Novo RU e da Biblioteca Central do campus Juazeiro do Norte**. Universidade Federal do Cariri - UFCA, 2026. Disponível em: <https://www.ufca.edu.br/noticias/camilo-santana-visita-obras-do-hospital-universitario-da-ufca-agenda-inclui-assinatura-da-ordem-de-servico-do-novo-ru-e-da-biblioteca-central-do-campus-juazeiro-do-norte/>. Acesso em: 08 abr. 2026

APÊNDICE A - Tabela do registro das medições do hidrômetro do Bloco I

t	r_t	r_{t-1}	Δt (dia)	v_t (m ³)	v_{t-1} (m ³)	Δv (m ³)	C (Δt) (m ³)
1	28/08/2025 08:38	-	-	6986	-	-	-
2	29/08/2025 08:45	28/08/2025 08:38	1,00	6994	6986	8	7,96
3	01/09/2025 08:11	29/08/2025 08:45	0,98	7004	6994	10	10,24
4	02/09/2025 10:03	01/09/2025 08:11	1,08	7020	7004	16	14,85
5	03/09/2025 08:18	02/09/2025 10:03	0,93	7032	7020	12	12,94
6	04/09/2025 08:24	03/09/2025 08:18	1,00	7039	7032	7	6,97
7	05/09/2025 08:05	04/09/2025 08:24	0,99	7055	7039	16	16,21
8	08/09/2025 08:18	05/09/2025 08:05	1,01	7061	7055	6	5,95
9	09/09/2025 08:46	08/09/2025 08:18	1,02	7078	7061	17	16,68
10	10/09/2025 07:59	09/09/2025 08:46	0,97	7091	7078	13	13,44
11	11/09/2025 08:13	10/09/2025 07:59	1,01	7104	7091	13	12,87
12	12/09/2025 08:26	11/09/2025 08:13	1,01	7116	7104	38	37,66
13	16/09/2025 08:23	12/09/2025 08:26	1,00	7127	7116	36	9,00
14	17/09/2025 08:23	16/09/2025 08:23	1,00	7130	7127	3	3,00
15	18/09/2025 07:42	17/09/2025 08:23	0,97	7149	7130	19	19,56
16	19/09/2025 08:41	18/09/2025 07:42	1,04	7160	7149	11	10,57
17	22/09/2025	19/09/2025	0,99	7166	7160	6	6,08

	08:21	08:41					
18	23/09/2025 08:11	22/09/2025 08:21	0,99	7181	7166	15	15,10
19	24/09/2025 08:19	23/09/2025 08:11	1,01	7187	7181	6	5,97
20	25/09/2025 08:30	24/09/2025 08:19	1,01	7203	7187	16	15,88
21	26/09/2025 08:27	25/09/2025 08:30	1,00	7210	7203	7	7,01
22	29/09/2025 08:16	26/09/2025 08:27	0,99	7223	7210	13	13,10
23	30/09/2025 08:13	29/09/2025 08:16	1,00	7229	7223	6	6,01
24	01/10/2025 12:46	30/09/2025 08:13	1,19	7245	7229	16	13,45
25	02/10/2025 08:02	01/10/2025 12:46	0,80	7245	7245	0	0,00
26	03/10/2025 14:35	02/10/2025 08:02	1,27	7278	7245	33	25,92
27	06/10/2025 08:15	03/10/2025 14:35	0,74	7278	7278	0	0,00
28	07/10/2025 13:29	06/10/2025 08:15	1,22	7285	7278	7	5,75
29	08/10/2025 08:14	07/10/2025 13:29	0,78	7292	7285	7	8,96
30	09/10/2025 08:54	08/10/2025 08:14	1,03	7303	7292	11	10,70
31	10/10/2025 08:32	09/10/2025 08:54	0,98	7314	7303	11	11,17
32	13/10/2025 07:46	10/10/2025 08:32	0,97	7321	7314	7	7,23
33	14/10/2025 12:03	13/10/2025 07:46	1,18	7333	7321	12	10,18
34	16/10/2025 08:08	14/10/2025 12:03	1,84	7341	7333	8	4,36
35	17/10/2025 08:11	16/10/2025 08:08	1,00	7348	7341	7	6,99

36	20/10/2025 08:04	17/10/2025 08:11	1,00	7354	7348	6	6,03
37	21/10/2025 08:21	20/10/2025 08:04	1,01	7361	7354	7	6,92
38	22/10/2025 08:29	21/10/2025 08:21	1,01	7362	7361	1	0,99
39	23/10/2025 08:16	22/10/2025 08:29	0,99	7364	7362	2	2,02
40	24/10/2025 08:23	23/10/2025 08:16	1,00	7370	7364	6	5,97
41	28/10/2025 07:57	24/10/2025 08:23	1,98	7370	7370	0	0,00
42	29/10/2025 08:13	28/10/2025 07:57	1,01	7377	7370	7	6,92
43	30/10/2025 08:24	29/10/2025 08:13	1,01	7383	7377	6	5,95
44	31/10/2025 08:20	30/10/2025 08:24	1,00	7383	7383	0	0,00
45	03/11/2025 08:06	31/10/2025 08:20	0,99	7390	7383	7	7,07
46	04/11/2025 11:00	03/11/2025 08:06	1,12	7403	7390	13	11,60
47	05/11/2025 08:49	04/11/2025 11:00	0,91	7413	7403	10	11,00
48	06/11/2025 08:26	05/11/2025 08:49	0,98	7424	7413	11	11,18
49	07/11/2025 08:17	06/11/2025 08:26	0,99	7434	7424	10	10,06
50	10/11/2025 08:18	07/11/2025 08:17	1,00	7447	7434	13	12,99
51	11/11/2025 08:02	10/11/2025 08:18	0,99	7460	7447	13	13,15
52	12/11/2025 08:17	11/11/2025 08:02	1,01	7474	7460	14	13,86
53	13/11/2025 08:21	12/11/2025 08:17	1,00	7483	7474	9	8,98
54	14/11/2025	13/11/2025	1,00	7495	7483	12	12,00

	08:21	08:21					
55	17/11/2025 08:23	14/11/2025 08:21	1,00	7503	7495	8	7,99
56	18/11/2025 08:10	17/11/2025 08:23	0,99	7519*	7503	16	16,15
57	19/11/2025 08:10	18/11/2025 08:10	1,00	7535	7519*	16	16,00
58	21/11/2025 09:20	19/11/2025 08:10	1,00	7546*	7535	10,5	10,50
59	24/11/2025 09:20	21/11/2025 09:20	1,00	7556	7546*	10,5	10,50
60	25/11/2025 08:44	24/11/2025 09:20	0,97	7568	7556	12	12,31
61	26/11/2025 08:44	25/11/2025 08:44	1,00	7580	7568	12	12,00
62	27/11/2025 08:23	26/11/2025 08:44	0,99	7595	7580	15	15,22
63	28/11/2025 08:34	27/11/2025 08:23	1,01	7606	7595	11	10,92

* Os dados de consumo desses dias não estão disponíveis, por isso foi estimada uma vazão igual à metade do consumo total registrado no dia posterior.

APÊNDICE B - Tabela do consumo calculado pelo código em Python, em metros cúbicos

t	Dia	Consumo calculado
1	2025-09-10	6,23
2	2025-09-11	6,96
3	2025-09-12	6,19
4	2025-09-16	1,74
5	2025-09-17	7,03
6	2025-09-18	6,63
7	2025-09-19	7,54
8	2025-09-22	0,02
9	2025-09-26	16,96
10	2025-09-29	51,15
11	2025-09-30	80,19
12	2025-10-01	25,62
13	2025-10-03	2,51
14	2025-10-06	5,20
15	2025-10-07	9,99
16	2025-10-08	15,61
17	2025-10-09	27,91
18	2025-10-10	35,63
19	2025-10-13	0,59
20	2025-10-14	11,47
21	2025-10-15	2,68
22	2025-10-16	1,97
23	2025-10-17	6,43
24	2025-10-20	4,36
25	2025-10-21	1,45
26	2025-10-22	2,95
27	2025-10-23	13,02
28	2025-10-24	8,76
29	2025-10-27	21,62

30	2025-10-28	27,16
31	2025-10-29	7,90
32	2025-10-30	2,11
33	2025-10-31	5,87
34	2025-11-03	3,22
35	2025-11-04	19,05
36	2025-11-05	4,87
37	2025-11-06	2,79
38	2025-11-07	11,51
39	2025-11-10	13,75
40	2025-11-11	9,06
41	2025-11-12	4,66
42	2025-11-13	7,28
43	2025-11-14	18,48
44	2025-11-17	7,28
45	2025-11-18	63,03
46	2025-11-19	34,06
47	2025-11-20	0,64
48	2025-11-21	3,77
49	2025-11-24	4,26
50	2025-11-25	10,32
51	2025-11-26	4,64
52	2025-11-27	3,18
53	2025-11-28	4,93

APÊNDICE C - Tabela do pareamento entre os dados do código e do hidrômetro

Data	Código	Hidrômetro
10/09/2025	6,23	12,87
11/09/2025	6,96	37,66
12/09/2025	6,19	9
16/09/2025	1,74	3
17/09/2025	7,03	19,56
18/09/2025	6,63	10,57
19/09/2025	7,54	6,08
22/09/2025	0,02	15,1
26/09/2025	16,96	13,1
29/09/2025	51,15	6,01
30/09/2025	80,19	13,45
01/10/2025	25,62	0
03/10/2025	2,51	0
06/10/2025	5,20	5,75
07/10/2025	9,99	8,96
08/10/2025	15,61	10,7
09/10/2025	27,91	11,17
10/10/2025	35,63	7,23
13/10/2025	0,59	10,18
15/10/2025	2,68	4,36
16/10/2025	1,97	6,99
17/10/2025	6,43	6,03
20/10/2025	4,36	6,92
21/10/2025	1,45	0,99
22/10/2025	2,95	2,02
23/10/2025	13,02	5,97
24/10/2025	8,76	0
28/10/2025	27,16	6,92
29/10/2025	7,90	5,95
30/10/2025	2,11	0

31/10/2025	5,87	7,07
03/11/2025	3,22	11,6
04/11/2025	19,05	11
05/11/2025	4,87	11,18
06/11/2025	2,79	10,06
07/11/2025	11,51	12,99
10/11/2025	13,75	13,15
11/11/2025	9,06	13,86
12/11/2025	4,66	8,98
13/11/2025	7,28	12
14/11/2025	18,48	7,99
17/11/2025	7,28	16,15
18/11/2025	63,03	16
19/11/2025	34,06	10,5
21/11/2025	3,77	10,5
24/11/2025	4,26	12,31
25/11/2025	10,32	12
26/11/2025	4,64	15,22
27/11/2025	3,18	10,92

ANEXO
DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que este Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia/Tese/Dissertação), escrito sob minha orientação, está em versão final, de acordo com as solicitações realizadas pela banca examinadora.

Informo também que procedi à revisão final do texto, constatando que atende às especificações das normas da ABNT para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFCA, no que diz respeito ao conteúdo e à formatação.

Data e local da assinatura eletrônica



Documento assinado digitalmente
PAULO ROBERTO LACERDA TAVARES
Data: 13/04/2026 10:15:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>