



JOÃO ANTONIO RESENDE PAVIANI

**SISTEMA IOT LORAWAN OPEN-SOURCE PARA
MONITORAMENTO E GESTÃO HÍDRICA: IMPLEMENTAÇÃO
E VALIDAÇÃO EM CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

LAVRAS – MG

2025

JOÃO ANTONIO RESENDE PAVIANI

**SISTEMA IOT LORAWAN OPEN-SOURCE PARA MONITORAMENTO E GESTÃO
HÍDRICA: IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EM CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, área de concentração em Sistemas de Computação, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Paviani, João Antonio Resende.

Sistema IoT LoRaWAN Open-Source para Monitoramento e Gestão Hídrica :
Implementação e Validação em Campus Universitário / João Antonio Resende Paviani.
- 2025.

107 p. : il.

Orientador: Luiz Henrique Andrade Correia

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Internet das Coisas (IoT). 2. LoRaWAN. 3. Gestão Hídrica. 4. Software Livre.
5. Cidades Inteligentes. I. Andrade Correia, Luiz Henrique. II. Universidade Federal
de Lavras. III. Título.

JOÃO ANTONIO RESENDE PAVIANI

**SISTEMA IOT LORAWAN OPEN-SOURCE PARA MONITORAMENTO E GESTÃO
HÍDRICA: IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO EM CAMPUS UNIVERSITÁRIO**

**OPEN-SOURCE LORAWAN IOT SYSTEM FOR WATER MONITORING AND
MANAGEMENT: IMPLEMENTATION AND VALIDATION ON A UNIVERSITY
CAMPUS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, área de concentração em Sistemas de Computação, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de Dezembro de 2025.

Prof. André de Lima Salgado UFLA

Prof. Hermes Pimenta de Moraes UFLA

Prof. Daniel Fernandes Macedo UFMG

Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

*Aos meus pais, Antonio João Paviani e Mary Lucia Resende Paviani, pelo amor e incentivo. À
minha esposa, Paula, pela paciência, compreensão e apoio incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio. À UFLA e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação pela infraestrutura e formação. Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Henrique Andrade Correia, pela orientação rigorosa. Aos membros da banca pelas contribuições. Aos amigos e à família pelo suporte.

A ciência é uma vela no escuro.

— Carl Sagan

RESUMO

Esta dissertação demonstra a viabilidade técnica e gerencial de um sistema *end-to-end* aberto para monitoramento inteligente do consumo de água em campus universitário. A arquitetura integra hidrômetros inteligentes SAGATECH US-5.0, rede *LoRaWAN* com *gateway Browan*, servidor de rede *ChirpStack* (v4), *pipeline Python–MySQL* e visualização em *Grafana*. O sistema foi implantado em 182 pontos e operou no conjunto operacional (22/09/2024–22/09/2025), gerando séries temporais auditáveis. A qualidade dos dados foi quantificada em três frentes: completude global ponderada de 78,54% (mediana por dispositivo de 83,68%; Q1–Q3: 78,55–89,01%; 22,9% dos pontos com completude $\geq 90\%$); regularidade do intervalo com mediana de 60,0 min e 89,9% dos registros no corredor 45–75 min; e consistência interna com 0,00% de incrementos negativos e mediana de eventos de *reset* igual a zero, além de $P_{50} = 0,00L$, $P_{90} = 84,00L$ e $P_{99} = 631,00L$ para o incremento horário. A acurácia foi validada no conjunto D_{val} (28/04/2025–12/06/2025, 11 pontos), por comparação intervalar AMI–AMM sem interpolação, usando os carimbos de tempo mais próximos ao par $[t_0, t_1]$; os erros relativos variaram de $-0,434\%$ a $+0,459\%$, dentro do limite de $\pm 2\%$ do regulamento metrológico aplicável. Como entrega prática, foi implementada uma triagem operacional reproduzível para priorização de atendimentos, baseada em silêncio de comunicação e consumo noturno atípico (limiar por percentil elevado do próprio conjunto). Conclui-se que a solução, além de escalável e de baixo custo, apresenta qualidade de dados compatível com uso gerencial e acurácia alinhada à referência manual, oferecendo base sólida para expansão institucional e replicação.

Palavras-chave: Internet das Coisas (IoT); LoRaWAN; arquitetura open-source; gestão hídrica; medição inteligente; AMI; AMM; PDR; campus universitário

ABSTRACT

This dissertation demonstrates the technical and managerial feasibility of an open end-to-end system for intelligent monitoring of water consumption on a university campus. The architecture integrates SAGATECH US-5.0 smart meters, a *LoRaWAN* network with a Brown gateway, the ChirpStack (v4) network server, a Python–MySQL pipeline, and Grafana visualization. The system was deployed at 182 points and operated in the operational dataset (22/09/2024–22/09/2025), producing auditable time series. Data quality was quantified along three dimensions: weighted global completeness of 78.54% (per-device median of 83.68%; Q1–Q3: 78.55–89.01%; 22.9% of points with completeness $\geq 90\%$); interval regularity with a median of 60.0 min and 89.9% of records within the 45–75 min corridor; and internal consistency with 0.00% negative increments and a median of zero reset events, together with $P_{50} = 0.00\text{L}$, $P_{90} = 84.00\text{L}$, and $P_{99} = 631.00\text{L}$ for hourly increments. Accuracy was validated on the D_{val} dataset (28/04/2025–12/06/2025; 11 points) through interval-based AMI–AMM comparison without interpolation, using the timestamps closest to $[t_0, t_1]$; relative errors ranged from -0.434% to $+0.459\%$, remaining within the $\pm 2\%$ limit specified by the applicable metrological regulation. As a practical deliverable, a reproducible operational triage was implemented to prioritize maintenance, based on communication silence and atypical night-time consumption (threshold defined by a high percentile of the dataset itself). The solution, in addition to being scalable and low cost, provides data quality suitable for managerial use and accuracy consistent with manual reference measurements, offering a solid basis for institutional expansion and replication.

Keywords: Internet of Things (IoT); LoRaWAN; open-source architecture; water management; smart metering; AMI; AMM; packet delivery rate (PDR); university campus

INDICADORES DE IMPACTO

Este trabalho apresenta impactos institucionais concretos e mensuráveis no âmbito da UFLA ao implantar e validar uma arquitetura *end-to-end* open-source de monitoramento hídrico (LoRaWAN, ChirpStack, *pipeline* Python–MySQL e Grafana), implantada em 182 pontos de medição e operando no período 22/09/2024–22/09/2025, com produção de séries temporais auditáveis; a qualidade dos dados foi quantificada por completude global ponderada de 78,54% e regularidade de coleta com mediana de 60,0 min (89,9% dos registros no corredor 45–75 min), e a acurácia foi validada por comparação AMI–AMM em 11 pontos (28/04/2025–12/06/2025), com erros relativos entre $-0,434\%$ e $+0,459\%$, evidenciando viabilidade técnica e confiabilidade para apoio à gestão hídrica institucional; como entrega prática, foi implementada uma triagem operacional reproduzível para priorização de atendimentos baseada em silêncio de comunicação e consumo noturno atípico (limiar por percentil do próprio conjunto), contribuindo para tomada de decisão baseada em evidências, uso racional da água, resposta mais rápida a anomalias e potencial de replicação em outras instituições públicas devido ao uso de componentes e métodos abertos, alinhando-se aos ODS 6, 9, 11 e 12.

IMPACT INDICATORS

This work delivers concrete and measurable institutional impacts at UFLA by deploying and validating an open-source end-to-end water monitoring architecture (LoRaWAN, ChirpStack, a Python–MySQL pipeline, and Grafana), deployed across 182 metering points and operating from 22/09/2024 to 22/09/2025, producing auditable time series; data quality was quantified through a weighted global completeness of 78.54% and collection regularity with a median interval of 60.0 min (89.9% of records within the 45–75 min corridor), and accuracy was validated via AMI–AMM comparison in 11 points (28/04/2025–12/06/2025), with relative errors ranging from -0.434% to $+0.459\%$, supporting technical feasibility and reliability for institutional water management; as a practical deliverable, a reproducible operational triage was implemented to prioritize interventions based on communication silence and atypical night-time consumption (threshold defined by a high percentile of the dataset), contributing to evidence-based decision-making, rational water use, faster response to anomalies, and replication potential in other public institutions due to the use of open components and methods, aligned with SDGs 6, 9, 11, and 12.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Vista aérea da UFLA.	46
Figura 4.2 – Mapa da UFLA.	47
Figura 4.3 – Exemplos de corpos d’água superficiais na UFLA.	48
Figura 4.4 – Estação de Tratamento de Água (ETA) da UFLA.	48
Figura 4.5 – Modelo de hidrômetro US da <i>Sagatech</i>	52
Figura 4.6 – Hidrômetros <i>Sagatech</i> US-5.0 instalados no campus UFLA.	52
Figura 4.7 – <i>Browan Outdoor Micro Gateway V1</i>	53
Figura 4.8 – Distribuição dos valores de <i>offset</i> dos canais.	55
Figura 4.9 – <i>Gateway</i> Instalado na UFLA.	56
Figura 4.10 – Tela inicial do <i>ChirpStack</i>	57
Figura 4.11 – Representação esquemática da arquitetura de <i>containers Docker</i>	57
Figura 4.12 – Estrutura do <i>Payload</i>	59
Figura 4.13 – Data Center da UFLA.	62
Figura 4.14 – Representação das métricas.	65
Figura 4.15 – Integração com <i>MySQL</i>	71
Figura 5.1 – Arquitetura Geral.	72
Figura 6.1 – Dashboard do <i>ChirpStack</i> com estados de dispositivos, <i>gateways</i> e distribuição de DR.	78
Figura 6.2 – <i>Gateway</i> Browan — cadastro, status e geolocalização no <i>ChirpStack</i>	79
Figura 6.3 – <i>Gateway</i> Browan — estatísticas operacionais (contadores RX/TX e distribuição de <i>data-rate</i>).	79
Figura 6.4 – <i>Grafana</i> — painel geral com cartões de estado e listagem por recência.	80
Figura 6.5 – <i>Grafana</i> — painel por dispositivo: indicadores operacionais, series e contagem de leituras	81
Figura 6.6 – <i>Grafana</i> — recorte do painel por dispositivo com consumo acumulado e indicadores de enlace	82
Figura 6.7 – <i>Grafana</i> — mapa dos hidrômetros com codificação por recência da última comunicação	83
Figura 6.8 – Relação entre completude (PDR) e instabilidade do sinal (desvio-padrão do SNR) por dispositivo no período D_{oper}	85

Figura 6.9 – Distribuição dos intervalos entre mensagens.	88
Figura 6.10 – Consumo Acumulado Comparativo: AMI vs. AMM (Hidrômetro Ecologia).	91
Figura 6.11 – Distribuição de ΔV por hora no campus	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Especificações técnicas e metrológicas do hidrômetro <i>SAGATECH US-5.0</i> . . .	51
Tabela 4.2 – Especificações técnicas do <i>Gateway</i> Browan Outdoor Micro Gateway V1. . .	54
Tabela 6.1 – Inventário e estado operacional no período D_{oper}	77
Tabela 6.2 – Completude da telemetria no período D_{oper} (22/09/2024–22/09/2025). . . .	84
Tabela 6.3 – Regularidade dos intervalos no período D_{oper}	87
Tabela 6.4 – Consistência interna das séries no período D_{oper}	89
Tabela 6.5 – Comparativo de consumo entre medição manual (AMM) e medição inteligente (AMI).	90
Tabela 6.6 – Top 10 pontos por fração de horas noturnas sinalizadas (00:00–05:59) ao longo de D_{oper}	93
Tabela 7.1 – Síntese quantitativa das contribuições (acurácia e escala).	94
Tabela 7.2 – Comparação por critério (sem marcas comerciais).	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Síntese comparativa de sistemas IoT para gestão hídrica.	38
Quadro 3.2 – Comparação entre arquiteturas <i>IoT</i> com <i>LoRaWAN</i> para monitoramento. .	41
Quadro 3.3 – Comparação entre metodologias de validação.	43
Quadro 5.1 – Resumo das camadas da arquitetura do sistema IoT.	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Definição do Problema	18
1.2	Motivação	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Objetivos	20
1.5	Objetivos específicos	20
1.6	Solução Proposta	21
1.7	Estrutura do Documento	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Cidades inteligentes	23
2.2	Campus Inteligente	24
2.3	IoT para Gestão de Água	25
2.4	Plataformas IoT <i>Open-Source</i>	26
2.5	Plataformas de monitoramento <i>open-Source</i>	28
2.6	Tecnologias <i>LPWAN</i>	30
2.6.1	<i>LoRa</i> e <i>LoRaWAN</i>	31
2.7	Aspectos metrológicos na medição de água	33
3	TRABALHOS RELACIONADOS	35
3.1	Sistemas IoT para Monitoramento e Gestão Hídrica	35
3.2	Arquiteturas IoT e o Papel do LoRaWAN	39
3.3	Metodologias de Validação e Resultados de Estudos	41
4	METODOLOGIA	44
4.1	Tipo de Pesquisa	45
4.2	Cenários	45
4.2.1	Abordagens metodológicas comparativas	45
4.2.2	Contexto da Aplicação (UFLA)	46
4.2.3	Caracterização do Sistema Hídrico Abordagem de Medição Manual	47
4.2.4	Critérios de seleção dos pontos de medição	49
4.2.5	Procedimentos de coleta de dados	49
4.2.5.1	Amostra e distribuição dos pontos instrumentados	50
4.3	Materiais	50

4.3.1	Sensores - Hidrômetros	50
4.3.2	Gateway LoRaWAN	53
4.3.3	Servidor de Rede LoRaWAN - Chirpstack	56
4.3.4	Visualização dos dados com <i>Grafana</i>	60
4.3.5	Infraestrutura de Hospedagem	61
4.3.6	Protocolo de análise de dados	62
4.3.6.1	Definição dos Conjuntos de Dados	62
4.3.6.2	Premissas gerais	63
4.3.6.3	Preparação dos dados	63
4.3.6.4	Indicadores operacionais de suporte	63
4.3.6.5	Qualidade das séries	63
4.3.6.6	Validação da acurácia AMI-AMM	64
4.3.6.7	Procedimentos da triagem operacional	64
4.4	Métricas	64
4.4.1	Métricas de desempenho operacional da AMI	65
4.4.1.1	Disponibilidade do Dispositivo	66
4.4.1.2	Nível de bateria	66
4.4.1.3	Qualidade do Sinal <i>LoRaWAN</i> RSSI e SNR	66
4.4.1.4	Total de Leituras Registradas	67
4.4.2	Métricas de Medição de Consumo	67
4.4.2.1	Volume Acumulado	67
4.4.2.2	Consumo Diário	68
4.4.3	Procedimento de validação comparativa AMI-AMM	68
4.4.3.1	Utilização de Dados Contextuais	69
4.5	Integração dos Dados com o Banco de Dados <i>MySQL</i>	70
5	ARQUITETURA	72
5.1	Aquisição de dados	72
5.2	Transmissão de dados	74
5.3	Rede	74
5.4	Integração com Banco de Dados	75
5.5	Visualização dos dados	75
6	RESULTADOS	77

6.1	Evidências de implantação (OE1)	77
6.1.1	Inventário e estado operacional	77
6.1.2	Registro no servidor LoRaWAN (<i>ChirpStack</i>)	78
6.1.3	Painéis de visualização (<i>Grafana</i>)	80
6.1.4	Painel por dispositivo (<i>Grafana</i>)	81
6.1.5	Georreferenciamento dos pontos (<i>Grafana</i>)	82
6.2	Qualidade das séries de consumo (OE2)	83
6.2.1	Compleitude	84
6.2.2	Análise da Qualidade da Rede <i>LoRaWAN</i>	85
6.2.3	Regularidade do intervalo (OE2)	86
6.2.4	Consistência interna das séries (OE2)	88
6.3	Validação da acurácia do sistema (OE3)	89
6.4	Triagem operacional para atenção técnica (OE4)	91
6.4.1	Limiares a partir da Distribuição de Consumo Horário	91
6.4.2	Atenção noturna por persistência de consumo	92
6.4.3	Leitura e limitações	92
6.4.4	Resultado gerencial	93
7	INOVAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES	94
7.1	Contribuição metodológica: acurácia e escalabilidade	94
7.2	Contribuição econômica, estratégica e de governança	95
7.3	Contribuição arquitetural: um modelo replicável	95
7.4	Contribuição operacional: habilitação da gestão proativa	96
7.5	Síntese das contribuições	96
8	CONCLUSÕES	97
9	TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água potável apresenta tendência de redução em diversas regiões, com impactos crescentes sobre abastecimento urbano, produção agrícola e atividades econômicas. Entre os fatores associados estão o crescimento populacional, a expansão urbana e as mudanças climáticas Bezerra *et al.* (2022). Em escala global, o consumo de água doce cresceu nas últimas décadas a uma taxa média próxima de 1% ao ano; a agricultura responde por cerca de 70% desse consumo, seguida pela indústria (aprox. 20%) e pelos usos domésticos (12%) (Unesco, 2024). O mesmo relatório indica que mais da metade da população mundial enfrenta algum nível de escassez ao longo do ano, devido a limitações naturais e a déficits de infraestrutura.

No Brasil, embora o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento registre índices de atendimento total de água superiores a 80% em grande parte do território, as perdas na distribuição permanecem em 37,78%, valor equivalente a mais de sete vezes a capacidade do Sistema Cantareira (SNIS, 2022). Esse quadro evidencia a necessidade de aprimorar a eficiência operacional e a gestão da demanda, em consonância com o ODS 6 da Agenda 2030 (ONU, 2024).

Em instituições de ensino superior, sistemas de monitoramento em tempo real baseados em Internet das Coisas (IoT) têm sido adotados para coleta contínua de dados de consumo, análise de séries temporais e detecção de anomalias, como vazamentos e picos de uso (Taha *et al.*, 2024). Tais sistemas empregam sensores inteligentes, microcontroladores de baixo consumo, protocolos de longo alcance — a exemplo do *LoRaWAN* — e plataformas analíticas para processamento e armazenamento de dados. A cobertura ampla e o baixo consumo energético característicos do *LoRaWAN* atendem ao cenário de campus com grande área e múltiplos pontos de medição. A integração entre hardware e software fornece uma base unificada de dados para avaliação operacional e para o desenvolvimento de modelos preditivos.

No país, há iniciativas em campi universitários e companhias de saneamento com medição inteligente de consumo de água, incluindo a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Unicamp, além de projetos em empresas como a Corsan e a Sabesp (Embrapii, 2024; Unicamp, 2025; Corsan, 2023; ZiliaTech, 2023).

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) é uma instituição pública federal situada em Lavras, Sul de Minas Gerais, com captação em nascentes e poços tubulares profundos e Estação

de Tratamento de Água (ETA) própria (Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2025b; Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pró-Reitoria de Infraestrutura e Logística (PROINFRA), 2025; UFLA DQMA, 2025). O processo vigente de medição do consumo, fora do escopo deste estudo, baseia-se em leituras manuais distribuídas entre setores, com heterogeneidade na identificação de hidrômetros e georreferenciamento incompleto, o que eleva custos operacionais e o risco de erro de registro (Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pró-Reitoria de Infraestrutura e Logística (PROINFRA), 2025). No sistema IoT analisado nesta pesquisa, havia 182 hidrômetros integrados e operacionais em setembro de 2025, subconjunto do total instalado no campus; esses pontos compõem o conjunto de dados utilizado nas análises.

A escolha pelo Campus da UFLA justifica-se por sua característica de ambiente de validação em escala real, que permite o controle de infraestrutura necessário para uma prova de conceito de *IoT*, servindo como base técnica para futuras aplicações em contextos urbanos mais amplos.

Com o contexto estabelecido e o escopo delimitado, a subseção seguinte formaliza a definição do problema, descrevendo as limitações do processo de medição vigente e seus efeitos sobre a qualidade dos dados, a detecção de anomalias e a priorização de intervenções.

1.1 Definição do Problema

Instituições com infraestrutura predial extensa e distribuída — como campi universitários, hospitais e parques industriais — ainda recorrem, em grande medida, a leituras manuais e não padronizadas para medição do consumo hídrico. A literatura reporta que essa prática produz séries temporais esparsas, dificulta a identificação de anomalias (vazamentos, picos) e limita o planejamento de manutenção baseado em evidências Carrasco-Jiménez, Baldaro e Cucchietti (2020). No contexto brasileiro, o quadro é agravado por perdas elevadas na distribuição e por metas de eficiência associadas à Agenda 2030 (ODS 6) (SNIS, 2022; ONU, 2024). Paralelamente, estudos em gestão hídrica inteligente indicam o potencial de arquiteturas *IoT* para coleta contínua, análise de dados e resposta operacional, com uso de redes de longo alcance e baixo consumo (Gichuhi; Khakata; Kofi, 2023; Taha *et al.*, 2024; Master *et al.*, 2024).

Formula-se, assim, o seguinte problema de pesquisa: como projetar, implementar e validar, em ambiente operacional, um sistema *IoT* open-source baseado em LPWAN (LoRaWAN) para medição e gestão do consumo de água, capaz de produzir séries temporais confiáveis e

georreferenciadas, detectar anomalias em tempo real e apresentar acurácia comparável às medições manuais tradicionais? A literatura descreve benefícios potenciais dessas soluções, mas carece de avaliações comparativas de acurácia e validações sob condições reais em ambientes institucionais de larga escala (Gichuhi; Khakata; Kofi, 2023; Taha *et al.*, 2024; Master *et al.*, 2024).

Este estudo aborda o problema por meio da implantação e avaliação de um sistema *end-to-end* com LoRaWAN, servidores e painéis *open-source*, tomando um campus universitário como estudo de caso para instanciar e validar a abordagem.

1.2 Motivação

A crescente crise hídrica global e o aumento da demanda por soluções eficientes para a gestão de recursos naturais tornam essencial a adoção de novas tecnologias para o monitoramento do consumo de água. Universidades, como a UFLA, têm um papel fundamental na implementação de práticas sustentáveis, não apenas para reduzir desperdícios e custos operacionais, mas também para promover a conscientização ambiental entre estudantes, professores e funcionários.

Os sistemas inteligentes de gestão de água oferecem inúmeros benefícios, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real para a identificação rápida de vazamentos, desperdícios e padrões de consumo. A implementação de tecnologias *IoT*, como hidrômetros inteligentes e comunicação via *LoRaWAN*, possibilita a tomada de decisões baseada em dados precisos, melhorando a eficiência no uso dos recursos hídricos e contribuindo para a sustentabilidade institucional.

Além disso, a integração dessas tecnologias em um campus universitário contribui para a consolidação de um ambiente alinhado aos conceitos de cidades inteligentes, onde a automação e a análise de dados possibilitam a otimização da infraestrutura e o aprimoramento dos serviços públicos. A UFLA pode se tornar um exemplo de inovação na gestão hídrica, inspirando outras instituições a adotarem estratégias semelhantes para garantir o uso responsável da água.

Outro aspecto motivador é a possibilidade de replicação desse modelo em outras universidades e até mesmo em cidades, auxiliando gestores públicos e privados na implementação de políticas eficazes para o uso sustentável da água. A disponibilidade de um mapa interativo com a geolocalização dos hidrômetros inteligentes adiciona uma camada de inteligência ao sistema,

facilitando a manutenção, o planejamento de expansão da infraestrutura e a rápida identificação de problemas.

Portanto, este estudo visa contribuir com o avanço da pesquisa e desenvolvimento de soluções para a gestão sustentável da água, alinhando-se às diretrizes globais de preservação ambiental e uso racional dos recursos naturais.

1.3 Justificativa

A implementação de um sistema de monitoramento inteligente do consumo de água na UFLA se justifica pela necessidade de aprimorar a gestão hídrica, reduzir desperdícios e garantir um uso mais eficiente dos recursos. A adoção de tecnologias *IoT* permitirá uma melhor alocação dos recursos financeiros da universidade, minimizando custos operacionais e promovendo ações preventivas em relação a vazamentos e desperdícios. Além disso, o estudo contribui para a criação de um modelo replicável, servindo como referência para outras instituições de ensino superior e órgãos públicos interessados na sustentabilidade e na modernização da infraestrutura hídrica. A pesquisa também se alinha a iniciativas globais de preservação dos recursos naturais, reforçando o compromisso institucional com a sustentabilidade e inovação tecnológica.

1.4 Objetivos

Projetar, implementar e validar, em ambiente operacional de campus universitário, um sistema *open-source* de telemetria do consumo de água baseado em *LoRaWAN*, quantificando o desempenho de comunicação e a acurácia das leituras em comparação às medições manuais.

1.5 Objetivos específicos

Para alcançar e operacionalizar o objetivo geral, esta pesquisa se estrutura nos seguintes objetivos específicos:

1. **Implementar a arquitetura de monitoramento:** Desenvolver e implantar uma arquitetura *end-to-end* composta por hidrômetros inteligentes (SAGATECH US-5.0), rede *LoRaWAN* (gateways Browan e servidor ChirpStack) e um *pipeline* de dados para ingestão

(Python), armazenamento (MySQL) e visualização (Grafana), incluindo o georreferenciamento dos pontos de medição.

2. **Avaliar a qualidade dos dados gerados:** Analisar as séries temporais de consumo, verificando métricas de completude, regularidade do intervalo de amostragem e consistência interna dos dados coletados pelo sistema IoT.
3. **Validar a acurácia da medição:** Quantificar o erro de medição do sistema de telemetria (AMI) em relação às medições manuais de referência (AMM), por meio do cálculo do erro absoluto e relativo para cada ponto de consumo e de forma agregada.
4. **Demonstrar a aplicabilidade gerencial dos dados:** implementar uma triagem operacional reproduzível para priorizar atendimentos, baseada na identificação de consumo noturno atípico (calculado por percentis do próprio conjunto sobre os dispositivos ativos), produzindo uma relação de dispositivos para ação técnica.

1.6 Solução Proposta

Diante dos desafios apresentados na gestão hídrica da UFLA, a solução proposta envolve a implementação de um sistema de monitoramento inteligente do consumo de água, baseado na Internet das Coisas (*IoT*) e em análise de dados em tempo real. O sistema será composto por hidrômetros inteligentes do modelo *LoRa Saga*, que oferecem medição precisa da vazão, alarmes para corte de cabo e ataques magnéticos e comunicação *LoRaWAN* integrada.

A comunicação entre os dispositivos será realizada por meio de *LoRaWAN*, um protocolo de transmissão de longo alcance e baixo consumo energético, ideal para grandes áreas como o campus universitário, permitindo a coleta de dados de maneira eficiente e com ampla cobertura. Os dados coletados serão transmitidos via *LoRaWAN* para *gateways* centralizados (modelo *Browan WAPS-232N_LW* ou similar), que possuem longo alcance e alta capacidade de processamento.

Os *gateways* enviam os dados para um servidor *ChirpStack*, onde são processados por *scripts* em *Python* e armazenados em um banco de dados *MySQL*. A partir daí, os dados são integrados ao *Grafana*, uma plataforma de visualização que permite a análise detalhada do consumo, a identificação de anomalias, a geração de relatórios e a visualização em um mapa

interativo com a localização exata de cada hidrômetro, seus dados de consumo e alertas de vazamentos.

Essa solução visa não apenas reduzir desperdícios e melhorar a eficiência no uso da água, mas também fortalecer a cultura de sustentabilidade na universidade, alinhando-se às diretrizes da Agenda 2030 da ONU e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6). Além disso, o modelo proposto poderá ser replicado em outras instituições e cidades inteligentes, contribuindo para a modernização da gestão de recursos hídricos em larga escala.

1.7 Estrutura do Documento

Esta dissertação está organizada em nove capítulos. O Capítulo 1 apresenta o contexto, a questão de pesquisa, os objetivos e a solução proposta. O Capítulo 2 reúne a fundamentação teórica sobre gestão hídrica, IoT, LPWAN/LoRaWAN, plataformas open-source e aspectos metrologicos. O Capítulo 3 revisa trabalhos relacionados sobre sistemas IoT para monitoramento do consumo de água, arquiteturas com LoRaWAN e métodos de validação. O Capítulo 4 descreve a metodologia, o cenário de estudo, os materiais e métodos, os procedimentos AMI/AMM e o protocolo de análise. O Capítulo 5 detalha a arquitetura do sistema, da aquisição ao armazenamento e à visualização dos dados. O Capítulo 6 apresenta os resultados da implantação, as análises de qualidade das séries, a validação AMI–AMM e a triagem operacional. O Capítulo 7 sintetiza as inovações e contribuições do estudo. O Capítulo 8 traz as conclusões e implicações para a gestão hídrica institucional. Por fim, o Capítulo 9 indica possibilidades de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica apresenta conceitos relativos a cidades e campi inteligentes e discute a aplicação de IoT ao monitoramento hídrico em instituições de ensino superior. São examinadas redes *LPWAN* — com ênfase em *LoRaWAN* — e plataformas *open-source* como *ChirpStack*, além de ferramentas de visualização de dados, exemplificadas pelo *Grafana*. Discutem-se requisitos metrológicos e regulatórios para assegurar precisão e confiabilidade das medições. Por fim, analisa-se o panorama da gestão hídrica em universidades brasileiras, identificando lacunas que justificam esta investigação.

2.1 Cidades inteligentes

O conceito de *cidades inteligentes* surgiu como resposta aos desafios trazidos pelo crescimento populacional, urbanização acelerada e necessidade crescente de sustentabilidade ambiental. Essas cidades são definidas como ambientes urbanos que utilizam Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) para melhorar a qualidade de vida da população, otimizar o uso de recursos e promover a sustentabilidade (Law; Lynch, 2019). Historicamente, embora o conceito tenha se desenvolvido desde os anos 1990 com a introdução das tecnologias digitais na infraestrutura urbana, seu avanço tornou-se mais evidente a partir da popularização da Internet das Coisas (*IoT*) nos anos 2000 (Zohrabi *et al.*, 2021).

Entre os principais elementos das cidades inteligentes destacam-se a integração tecnológica dos sistemas urbanos, a participação ativa dos cidadãos e o uso da inovação tecnológica. A integração tecnológica permite conectar serviços essenciais como transporte, energia e gestão hídrica em plataformas unificadas, resultando em respostas mais rápidas e eficazes para os desafios urbanos (Law; Lynch, 2019). A participação cidadã, por outro lado, assegura que as soluções adotadas estejam alinhadas às necessidades específicas das comunidades locais (Law; Lynch, 2019). Já a inovação tecnológica atua como impulsionadora das iniciativas de eficiência e sustentabilidade por meio da implementação de sensores inteligentes e análise em tempo real dos dados coletados (Zohrabi *et al.*, 2021).

Dentro desse cenário, as tecnologias voltadas à gestão hídrica destacam-se como um componente essencial. Soluções baseadas em *IoT*, como medidores inteligentes, viabilizam o monitoramento contínuo do consumo, permitindo a identificação rápida de vazamentos e redu-

ção do desperdício de água (González-Vidal; Cuenca-Jara; Skarmeta, 2019). Além disso, dados coletados em tempo real possibilitam a criação de políticas públicas mais eficazes e estratégias de conservação hídrica que aumentam a resiliência das cidades diante das mudanças climáticas (Kumar *et al.*, 2022).

Pesquisas recentes apontam ainda que as cidades inteligentes beneficiam-se significativamente da aplicação de abordagens interdisciplinares e integradas. Arquiteturas abertas, como *OpenCity*, são destacadas como ambientes experimentais eficazes para testar e implementar soluções inovadoras que melhoram a gestão urbana e promovem o engajamento comunitário (Zohrabi *et al.*, 2021). Além disso, princípios da economia circular têm sido cada vez mais incorporados nessas iniciativas, fortalecendo a relação entre tecnologia e sustentabilidade ambiental (Aguilar *et al.*, 2019).

Estudos também indicam que a gestão eficiente dos recursos hídricos em cidades inteligentes vai além da sustentabilidade ambiental, impactando positivamente a economia financeira. Evidências empíricas, como as apresentadas por (Alam *et al.*, 2021), mostram que tecnologias avançadas para gestão hídrica reduzem custos operacionais e aprimoram a qualidade dos serviços prestados à população. Portanto, as cidades inteligentes emergem como soluções promissoras e necessárias para enfrentar os desafios contemporâneos da gestão urbana e ambiental.

2.2 Campus Inteligente

Os campi inteligentes (*smart campuses*) aplicam os princípios das cidades inteligentes ao contexto das instituições de ensino superior, promovendo inovação tecnológica e práticas sustentáveis dentro do ambiente acadêmico. Caracterizados pela implementação de soluções baseadas na Internet das Coisas (*IoT*), esses campi buscam aprimorar a eficiência operacional, melhorar o uso dos recursos disponíveis e proporcionar maior engajamento entre estudantes, docentes e administração institucional (Narendrakumar; Pillai, 2017). Neste sentido, a modernização de processos internos por meio da *IoT* tem se mostrado especialmente eficaz para a gestão eficiente de recursos hídricos (Raikar; Yaligar, 2023).

A utilização de dispositivos *IoT* nos campi inteligentes possibilita a coleta constante e análise imediata de dados sobre o uso dos recursos hídricos. Por exemplo, sistemas automatizados de irrigação inteligente permitem monitorar as condições ambientais e ajustar dinamicamente

mente o uso da água, proporcionando uma redução significativa no desperdício e otimizando os custos operacionais (Pan; Chen; Chen, 2023). Além disso, a implementação de sensores inteligentes para monitoramento do consumo hídrico em edificações acadêmicas facilita a identificação precoce de vazamentos ou consumos anormais, favorecendo ações corretivas rápidas e conscientizando a comunidade acadêmica sobre práticas sustentáveis (Siddamal *et al.*, 2021). Esses sistemas representam aplicações práticas das tecnologias *IoT*, adaptadas especificamente às necessidades institucionais.

Outro aspecto destacado pela literatura refere-se ao potencial dos campi inteligentes como espaços propícios para pesquisa e desenvolvimento de soluções tecnológicas sustentáveis. Ao atuarem como laboratórios vivos, as universidades podem testar, validar e aperfeiçoar tecnologias emergentes antes de expandi-las para contextos urbanos mais amplos (Aguilar *et al.*, 2019). Esse papel duplo das instituições acadêmicas — como beneficiárias e produtoras de inovação — também é relevante para a formação de profissionais capacitados e conscientes, preparados para enfrentar os desafios ambientais do futuro (Li *et al.*, 2017).

A literatura acadêmica ressalta também a importância da participação ativa da comunidade universitária como elemento fundamental para o sucesso das iniciativas implementadas. A integração de alunos, docentes e servidores no processo decisório não apenas aumenta a aceitação das soluções tecnológicas propostas, mas também contribui para a criação de uma cultura institucional voltada à responsabilidade ambiental e sustentabilidade (Siddamal *et al.*, 2021).

Dessa forma, os campi inteligentes configuram-se como espaços estratégicos para inovação e sustentabilidade, favorecendo a otimização dos recursos institucionais, particularmente os hídricos. Além disso, essas iniciativas proporcionam uma importante oportunidade para a formação e capacitação de profissionais qualificados, preparados para enfrentar os desafios ambientais e tecnológicos atuais e futuros (Li *et al.*, 2017; Pinheiro *et al.*, 2023).

2.3 IoT para Gestão de Água

A Internet das Coisas (*IoT*) refere-se à interconexão de dispositivos físicos à internet, permitindo a coleta, transmissão e análise contínua de dados. Essa tecnologia possibilita transformar a gestão dos recursos hídricos, por meio da identificação rápida e precisa de eventos críticos como vazamentos, além de favorecer decisões proativas (Ismail *et al.*, 2022). A demanda por tecnologias sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de soluções *IoT* especifi-

camente voltadas ao gerenciamento hídrico. Essas soluções viabilizam o monitoramento da qualidade e quantidade de água, utilizando sensores e redes de comunicação eficientes, como as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), especialmente a tecnologia *LoRaWAN* (*Long Range Wide Area Network*). Segundo Murdan e Hardin (2024), redes *LoRaWAN* destacam por proporcionar uma cobertura ampla com baixo consumo de energia para transmissão dos dados coletados, facilitando aplicações em diversos contextos geográficos.

Os sistemas *IoT* aplicados à gestão hídrica frequentemente incluem sensores inteligentes e atuadores capazes de realizar ações automáticas, como fechamento de válvulas em resposta à detecção imediata de vazamentos. Conforme descrito por Master *et al.* (2024), essas tecnologias permitem análises em tempo real, proporcionando alertas e notificações instantâneas que contribuem diretamente para melhorias operacionais. Além disso, Abusukhon e Altamimi (2021) ressaltam que tais abordagens tecnológicas têm resultados comprovados na redução do desperdício e otimização do uso da água.

A adoção de sistemas *IoT* na gestão hídrica, porém, enfrenta desafios técnicos e operacionais importantes. Os autores Predescu *et al.* (2019) destacam a complexidade envolvida na integração tecnológica, especialmente devido à diversidade de sistemas e sensores envolvidos. As questões de segurança dos dados coletados são frequentemente apontadas como preocupações relevantes na implementação dessas tecnologias (Adams; Jokonya, 2022). Outro aspecto significativo envolve a necessidade de capacitação específica dos profissionais responsáveis pelo gerenciamento e manutenção dessas soluções.

Dessa forma, não obstante aos desafios identificados, as tecnologias de Internet das Coisas apresentam potencial expressivo para aprimorar a gestão de recursos hídricos, conforme demonstrado em investigações recentes, particularmente na identificação antecipada de irregularidades e na minimização do desperdício hídrico (Gichuhi; Khakata; Kofi, 2023).

2.4 Plataformas IoT Open-Source

Considerando a importância da Internet das Coisas (IoT) na gestão de recursos hídricos, conforme abordado anteriormente, as plataformas de código aberto emergem como alternativas viáveis por permitirem maior flexibilidade e adaptabilidade às necessidades específicas dos projetos. Além disso, tais plataformas favorecem a colaboração entre pesquisadores e desenvol-

vedores, facilitando o compartilhamento de conhecimento técnico e o aprimoramento contínuo das tecnologias envolvidas (Gustin; Jasperneite, 2022; Ismail; Hamza; Kotb, 2018).

No contexto das plataformas IoT de código aberto, destacam-se algumas soluções específicas para diferentes demandas relacionadas à conectividade e gerenciamento de dispositivos. De acordo com Ottolini, Zyrianoff e Kamienski (2022), a plataforma *The Things Network (TTN)* concentra-se na comunicação utilizando a tecnologia LoRaWAN, oferecendo uma arquitetura aberta e descentralizada que favorece personalizações e a expansão conforme a necessidade do projeto. Outra ferramenta amplamente mencionada na literatura é o Node-RED, que oferece um ambiente de programação visual baseado em fluxos, simplificando a conexão entre dispositivos, APIs e diversos serviços, além de frequentemente ser utilizada em conjunto com outras tecnologias complementares (Gustin; Jasperneite, 2022).

Outra plataforma mencionada frequentemente na literatura é a *FIWARE*, que possui uma arquitetura modular com foco em interoperabilidade. Entre seus principais componentes está o *Orion Context Broker*, responsável por facilitar o gerenciamento e integração dos dados IoT, possibilitando a comunicação eficaz entre diferentes dispositivos e serviços. Tal característica tem contribuído para a aplicação da plataforma em iniciativas voltadas para ambientes urbanos inteligentes (Hernández *et al.*, 2021). Em contraste, a plataforma *Kaa IoT* sobressai por sua considerável escalabilidade, segurança aprimorada e compatibilidade com múltiplos dispositivos e protocolos. Adicionalmente, a plataforma se beneficia do suporte de uma comunidade de desenvolvedores ativa (Ismail; Hamza; Kotb, 2018; Ottolini; Zyrianoff; Kamienski, 2022).

Adicionalmente às plataformas previamente mencionadas, o *ChirpStack* se apresenta como um servidor de rede LoRaWAN de código aberto, projetado para a administração eficaz de redes de comunicação IoT fundamentadas na tecnologia LoRaWAN. A plataforma disponibiliza uma interface web que simplifica o monitoramento e a parametrização de *gateways*, dispositivos conectados e usuários. Adicionalmente, o *ChirpStack* oferece suporte à integração com variados provedores de nuvem, bancos de dados e serviços externos comumente empregados no processamento e análise de dados IoT. A plataforma também apresenta uma API baseada em *gRPC*, a qual possibilita a extensão ou a integração de suas funcionalidades a sistemas externos (Chirpstack, 2025).

A escolha da plataforma IoT open-source *ChirpStack* para este projeto, focado no monitoramento hídrico em um campus universitário, baseou-se em critérios técnicos, de integração e de suporte comunitário. Sua arquitetura modular oferece flexibilidade para implementação e es-

calabilidade, característica pertinente à gestão de redes *LoRaWAN*. Em termos de desempenho, o *ChirpStack* demonstrou resultados comparáveis ou superiores aos de plataformas como o *The Things Stack*, especialmente em contextos com alta densidade de dispositivos e tráfego de dados (Hernandez; Iova; Valois, 2024). Soma-se a isso a capacidade de integração com ferramentas como *Node-RED* e *Grafana*, que possibilitam a visualização e análise de dados em tempo real, fornecendo subsídios para a gestão operacional dos recursos hídricos (Sacoto-Cabrera *et al.*, 2024). Por fim, a existência de uma comunidade ativa de desenvolvedores e usuários em torno da plataforma contribui para sua manutenção, segurança e atualização, aspecto relevante para a sustentabilidade da solução a longo prazo (Gustin; Jasperneite, 2022).

Plataformas IoT open-source, apesar de suas vantagens, apresentam desafios inerentes, particularmente quanto à interoperabilidade, escalabilidade e segurança dos dados. Contudo, fatores como a potencial economia de custos e a maior autonomia sobre o ambiente de desenvolvimento justificam o interesse por essas soluções, especialmente por organizações que necessitam de sistemas customizados para atender a requisitos específicos (Gustin; Jasperneite, 2022; Ottolini; Zyrianoff; Kamienski, 2022).

No contexto de instituições educacionais e de pesquisa, a aplicação de plataformas de código aberto proporciona a estudantes e pesquisadores contato com implementações práticas de sistemas IoT. Essa vivência contribui para o desenvolvimento de competências técnicas e profissionais aplicáveis aos desafios tecnológicos e ambientais contemporâneos, como a gestão sustentável de recursos hídricos em ambientes urbanos ou campi universitários (Podolskiy *et al.*, 2018; Zaharov *et al.*, 2018).

2.5 Plataformas de monitoramento open-Source

A expansão no uso de sistemas de monitoramento impulsionou o desenvolvimento de soluções baseadas em tecnologias de código aberto (*open-source*) para visualização e análise de dados. Diversas ferramentas de visualização e análise de dados se estabeleceram nesse cenário, incluindo *Grafana*, *Metabase*, *Looker Studio* e *Power BI*. Dentre estas, o *Grafana* é frequentemente adotado para a visualização e análise de dados em projetos de Internet das Coisas (*IoT*), dada a sua compatibilidade com múltiplas fontes de dados, como *Prometheus* e *InfluxDB*, tornando-o adequado para aplicações que demandam monitoramento contínuo (Sobral *et al.*, 2023). A ferramenta viabiliza a criação de painéis (*dashboards*) personalizados por

meio de uma interface gráfica, o que facilita a interpretação dos dados por diferentes perfis de usuários.

Sistemas *open-source* apresentam como vantagens o custo reduzido de aquisição e uma elevada flexibilidade para customização. Ferramentas como o *Grafana* exemplificam esses benefícios: são disponibilizadas gratuitamente e, ao mesmo tempo, permitem aos usuários o desenvolvimento de integrações e funcionalidades próprias, ajustadas a requisitos específicos. Essa combinação de gratuidade e extensibilidade contribui para a redução do Custo Total de Propriedade (TCO - *Total Cost of Ownership*), um fator relevante em projetos com potencial para grande volume de dados e diversidade de sensores (González; Portalo; Calderón, 2021). A literatura científica reporta a utilização de plataformas de monitoramento baseadas em *Grafana* em domínios como agricultura de precisão e gerenciamento de energia em microrredes. Nesses contextos, a visualização de dados atualizados é um recurso importante para subsidiar processos de tomada de decisão (Peladarinos *et al.*, 2023; Cacciuttolo *et al.*, 2023).

Grafana é uma ferramenta de código aberto (*open-source*) voltada para a visualização e análise de dados. Sua função principal é permitir a criação de painéis (*dashboards*) que auxiliam na interpretação visual das informações coletadas. A plataforma possui como característica notável a capacidade de integração com diversas fontes de dados, como bancos de dados tradicionais, sistemas de monitoramento de séries temporais e serviços de computação em nuvem. Essa flexibilidade na coleta e apresentação de dados torna o *Grafana* aplicável a diferentes domínios, incluindo análise de sistemas e engenharia de dados, com particular relevância para o monitoramento de sistemas *IoT* (Grafana Labs, 2025).

A seleção do *Grafana* para esta dissertação baseia-se em um conjunto de atributos técnicos e de suporte. Sua capacidade de integrar dados de múltiplas fontes em tempo real é particularmente pertinente para aplicações *IoT* que exigem monitoramento contínuo, como o acompanhamento do consumo hídrico proposto neste trabalho. Adicionalmente, a existência de uma comunidade ativa de desenvolvedores contribui para a evolução e atualização da ferramenta. Estudos também indicam que a utilização de *Grafana* pode estar associada à redução de custos de implementação em sistemas de monitoramento, como os de energia (González; Calderón; Folgado, 2022; Rincón *et al.*, 2023). Desse modo, a adoção do *Grafana* justifica-se por suas funcionalidades de visualização e integração, pelo suporte comunitário existente e pela sua adequação econômica no contexto de projetos *IoT* baseados em soluções *open-source*.

2.6 Tecnologias LPWAN

Redes de longo alcance e baixo consumo energético, conhecidas pela sigla *LPWAN* (*Low Power Wide Area Network*), constituem uma categoria de tecnologia de comunicação sem fio projetada para aplicações de Internet das Coisas (*IoT*) que requerem cobertura em áreas extensas e baixa demanda energética dos dispositivos terminais. O conjunto de tecnologias *LPWAN* engloba diferentes soluções, como *LoRa*, *SigFox* e *NB-IoT*, cada qual com especificidades técnicas e domínios de aplicação próprios (Raza; Kulkarni; Sooriyabandara, 2017). Dentre estas, a tecnologia de modulação *LoRa* (*Long Range*) e o protocolo de rede *LoRaWAN* caracterizam-se pela combinação de comunicação a longas distâncias com baixa taxa de transferência de dados. Tais atributos permitem a implementação de soluções *IoT* em contextos como cidades inteligentes, monitoramento ambiental e sistemas inteligentes de gestão de água (*Smart Water Grid*) (Lalle *et al.*, 2019).

Raza, Kulkarni e Sooriyabandara (2017), em sua análise sobre redes *LPWAN*, compararam *LoRa/LoRaWAN* com tecnologias alternativas como *SigFox* e *NB-IoT*. A tecnologia *SigFox*, que opera em banda ultra estreita (*Ultra-Narrow Band* - UNB), apresenta vantagens quanto ao alcance e ao baixo consumo energético, porém com restrições na taxa de transferência de dados e no tamanho do *payload*. Em contrapartida, o *NB-IoT* (*Narrowband IoT*), uma tecnologia derivada da arquitetura celular *LTE* (*Long-Term Evolution*), possibilita maior escalabilidade e Qualidade de Serviço (*QoS*) quando comparado a *LoRa* e *SigFox*. Contudo, o *NB-IoT* demanda um consumo energético mais elevado, limitando sua adequação para dispositivos *IoT* alimentados por bateria, especialmente em instalações remotas ou de difícil acesso para manutenção energética.

Uma avaliação do desempenho de tecnologias *LPWAN* em uma aplicação de sistema inteligente de gestão de água (*Smart Water Grid*) foi conduzida por Lalle *et al.* (2019). Os resultados reportados nesse estudo indicam que as tecnologias *LoRaWAN* e *SigFox* apresentaram menor custo de implantação e maior eficiência no consumo energético. Por outro lado, o *NB-IoT* mostrou maior capacidade de escalonamento (escalabilidade) e Qualidade de Serviço (*QoS*), revelando-se mais apropriado para redes com alta densidade de dispositivos conectados.

As limitações inerentes à escalabilidade do *LoRaWAN* são analisadas por Adelantado *et al.* (2017). Os autores argumentam que o uso do protocolo *ALOHA* em cenários com alta densidade de dispositivos eleva a probabilidade de colisões de pacotes, o que pode comprometer

ter o desempenho da rede, particularmente em ambientes urbanos. Adicionalmente, embora a modulação *LoRa* ofereça comunicação de longo alcance com baixo consumo energético, sua taxa de transferência de dados intrinsecamente limitada e a latência associada podem restringir sua aplicabilidade em sistemas que demandam comunicação em tempo real.

No contexto específico de sistemas inteligentes de gestão de água (*Smart Water Grid*), Lalle *et al.* (2019) mostra que, embora o *LoRaWAN* seja viável, a tecnologia *NB-IoT* oferece maior escalonamento, maior taxa de transferência de dados e menor Taxa de Erro de Pacotes (PER) em redes densas. Entretanto, o *NB-IoT* depende de infraestrutura celular licenciada e planos de dados de operadoras, o que acarreta custos recorrentes e consumo de energia superior, reduzindo a autonomia de dispositivos alimentados por bateria — fatores que tornam o *LoRaWAN* mais adequado para implementações distribuídas de baixo custo.

2.6.1 *LoRa e LoRaWAN*

A tecnologia *LoRa* foi desenvolvida inicialmente pela empresa francesa *Cycleo*, que introduziu uma modulação proprietária baseada em *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, uma técnica anteriormente utilizada em comunicações militares por sua resiliência a interferências e alta eficiência em consumo energético. Em 2012, a *Semtech* adquiriu a *Cycleo*, incorporando a tecnologia e desenvolvendo o *LoRa* como uma solução para redes de longo alcance e baixo consumo de energia voltadas para a Internet das Coisas (*IoT*) (Saari *et al.*, 2018; Lalle *et al.*, 2019; Semtech, 2024).

Com o crescimento da demanda por conectividade em larga escala, especialmente para dispositivos *IoT*, a *Semtech* colaborou com a criação da *LoRa Alliance* em 2015, uma organização sem fins lucrativos dedicada a promover a interoperabilidade e o desenvolvimento do protocolo *LoRaWAN*. Este protocolo, gerido pela *LoRa Alliance*, define as regras para comunicação entre dispositivos *LoRa* e redes, permitindo que diferentes fabricantes desenvolvam soluções compatíveis entre si, facilitando a expansão de redes de *IoT* em nível global (Saari *et al.*, 2018; Lalle *et al.*, 2019).

Desde então, o *LoRa* e o *LoRaWAN* têm sido adotados de forma frequente em setores como cidades inteligentes, agricultura de precisão, e monitoramento de recursos naturais, tornando-se uma das principais opções para redes LPWAN, especialmente em aplicações onde

o baixo consumo energético e a durabilidade da bateria são essenciais (Saari *et al.*, 2018; Semtech, 2024).

A revisão dos autores Sun *et al.* (2022) sobre os desenvolvimentos recentes na tecnologia *LoRa* documenta a expansão de suas aplicações em domínios como monitoramento ambiental, gestão de recursos e agricultura. O trabalho sumariza avanços relacionados a mecanismos de segurança aprimorados, estratégias para redução de latência e novas utilizações industriais da tecnologia. Adicionalmente, o estudo identifica vulnerabilidades de segurança inerentes ao protocolo *LoRaWAN* e discute contramedidas e atualizações protocolares que visam aprimorar a segurança e a confiabilidade da comunicação em redes.

Outro estudo importante, "*LoRa - A Survey of Recent Research Trends*", analisa as tendências atuais de pesquisa em *LoRa* e sugere áreas de aprimoramento em desempenho e comunicação. Este estudo indica que, embora o *LoRa* tenha avançado, desafios como a segurança e o controle de congestionamento ainda necessitam de soluções, especialmente em contextos de redes altamente densas (Saari *et al.*, 2018).

A literatura técnica sobre *LoRa* e *LoRaWAN* identifica áreas que requerem desenvolvimento contínuo. Entre estas, citam-se o aprimoramento dos mecanismos de segurança, a otimização do desempenho da rede em cenários de alta densidade de dispositivos e a criação de novos métodos para gerenciar o ciclo de serviço (*duty cycle*) e a taxa de transferência de dados. Vangelista (2017), por exemplo, sugerem que a modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*) utilizada pelo *LoRa* apresenta características ainda não completamente exploradas para operação em canais com seletividade em frequência. Os autores postulam que investigações nessa área poderiam resultar em melhorias na capacidade da rede e no alcance da comunicação, especialmente em ambientes com níveis elevados de ruído.

As direções futuras destacadas na literatura incluem o desenvolvimento de mecanismos de controle de congestionamento e novas aplicações em cenários de cidades inteligentes e gestão ambiental. Há também um foco crescente em abordagens de rede híbrida, integrando o *LoRa* com outras tecnologias *LPWAN* para combinar os pontos fortes de cada uma, especialmente em casos que exigem uma maior confiabilidade e baixa latência.

2.7 Aspectos metrológicos na medição de água

A confiabilidade e a uniformidade dos resultados obtidos em processos de medição são requisitos basilares para o avanço científico, o desenvolvimento tecnológico, as transações comerciais e a proteção ao consumidor. No âmbito nacional, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) atua como órgão central do Sistema Brasileiro de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Sinmetro), sendo responsável por normatizar e coordenar as atividades metrológicas no país (INMETRO, 2025).

O INMETRO adota a definição internacionalmente consagrada pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), segundo a qual "Metrologia é a ciência das medições e suas aplicações, abrangendo todos os seus aspectos teóricos e práticos"(INMETRO, VIM, 2021). Este conceito é amplo e não se restringe apenas à execução da medição em si. Inclui o estudo e o estabelecimento de unidades de medida e padrões rastreáveis, o desenvolvimento, a validação e a caracterização de métodos e instrumentos de medição, a realização de calibrações para garantir a exatidão dos equipamentos, e a avaliação e expressão da incerteza associada a cada resultado de medição.

No Brasil, os hidrômetros utilizados para a medição de água potável fria são instrumentos regulamentados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). A Portaria INMETRO nº 246/2000 (com suas atualizações) estabelece o Regulamento Técnico Metrológico (RTM) que define as condições e os requisitos que esses medidores devem atender (INMETRO, Portaria, 2021).

Um dos elementos centrais desse regulamento é a especificação dos Erros Máximos Admissíveis (EMAs) para os hidrômetros, definidos tanto para verificações iniciais quanto para verificações periódicas em serviço. O Regulamento Técnico Metrológico (RTM) estabelece limites percentuais de erro conforme as diferentes faixas de vazão, sendo para a verificação inicial:

- $\pm 5\%$ na faixa compreendida entre a vazão mínima ($Q_{\min}$) e a vazão de transição (Q_t);
- $\pm 2\%$ na faixa compreendida entre a vazão de transição (Q_t) e a vazão máxima ($Q_{\max}$).

Esses limites servem como critério para avaliar se um hidrômetro está medindo dentro da exatidão considerada aceitável para sua função (INMETRO, Portaria, 2021).

Diante desse contexto normativo e da importância da exatidão na medição do consumo de água, torna-se fundamental validar o desempenho de novos sistemas propostos para essa finalidade, como o sistema de monitoramento baseado em IoT desenvolvido nesta dissertação. Uma etapa essencial nessa validação consiste em comparar os resultados fornecidos pelo sistema (leitura acumuladas via IoT) com os resultados obtidos por um método de medição estabelecido ou de referência (neste caso, a leitura manual direta dos hidrômetros). Essa comparação permite avaliar, em condições práticas, a concordância entre os métodos e verificar se as medições do sistema IoT se situam dentro de limites de erro compatíveis com as exigências metrológicas aplicáveis, fornecendo assim evidências sobre sua confiabilidade e adequação para a gestão hídrica no campus universitário.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, revisam-se as contribuições científicas e técnicas sobre sistemas IoT baseados em *LoRaWAN* e plataformas *open-source* para monitoramento hídrico em campi universitários. Os trabalhos selecionados abordam o tema sob diversas perspectivas, variando entre o foco no desenvolvimento de *hardware*, protocolos de comunicação ou camadas de *software*. A análise fundamenta as contribuições desta dissertação e evidencia que o seu diferencial frente ao estado da arte reside na validação empírica da arquitetura *open-source* com um volume expressivo de dispositivos (182 pontos) em ambiente operacional real, preenchendo uma lacuna de validação prática observada em estudos similares que utilizam pilhas de *software* como *ChirpStack* e *Grafana*.

3.1 Sistemas IoT para Monitoramento e Gestão Hídrica

A busca por soluções eficientes para monitoramento e gestão hídrica impulsionou diversas propostas baseadas em Internet das Coisas (IoT), particularmente utilizando a tecnologia *LoRaWAN*. Slaný *et al.* (2020), por exemplo, propuseram uma arquitetura modular para medição inteligente em ambientes residenciais (vilas) na República Tcheca. O sistema empregava sensores de pulso do tipo *reed switch* acoplados a hidrômetros convencionais, com comunicação *LoRaWAN* (modem RN2483) para um *gateway* customizado (*Raspberry Pi* + iC880A) e utilizava a rede *The Things Network* (TTN), banco de dados *InfluxDB* e visualização em *Grafana*. A validação combinou testes laboratoriais, comparação com leituras manuais em campo e análise do fluxo mínimo noturno (MNF), reportando erro médio inferior a 3% e 95% de sucesso na detecção de vazamentos simulados. Embora esta abordagem compartilhe elementos tecnológicos com a presente dissertação (sensores de pulso, *LoRaWAN*, *Grafana*), seu foco em escala residencial piloto e o uso da rede pública TTN diferem do contexto institucional complexo e da implementação com servidor de rede próprio (*ChirpStack*) deste trabalho. Ademais, a validação comparativa AMI vs AMM não foi o foco central como nesta pesquisa.

Reforçando os benefícios da tecnologia, Murdan e Hardin (2024) realizaram uma análise aprofundada de um sistema *LoRaWAN* para *smart water metering*, destacando as vantagens intrínsecas do *LoRa* em alcance, eficiência energética e adaptabilidade à infraestrutura existente. Por meio de simulações em *MATLAB*, os autores validaram a eficácia da tecnologia e

realizaram uma análise de custo-benefício, calculando *ROI* e período de *payback*, concluindo pela viabilidade econômica da solução. O trabalho fornece uma forte justificativa para a escolha do *LoRaWAN*, mas, por se basear em simulação, carece da validação empírica em ambiente real e da análise de desempenho da rede sob condições operacionais, aspectos centrais desta dissertação.

A questão da capacidade e desempenho da rede *LoRaWAN* foi especificamente investigada por Lalle *et al.* (2019) por meio de simulações no NS-3 para um cenário de Smart Water Grid. O estudo analisou o impacto de diferentes estratégias de alocação de Spreading Factor (SF) na taxa de entrega de pacotes (PDR), concluindo que a alocação baseada na sensibilidade do gateway otimiza o desempenho. Seus resultados indicaram que um único gateway poderia suportar aproximadamente 1000 medidores com PDR de 92% (sob regulamentação da UE e carga útil de 32 bytes), evidenciando limites de escalabilidade que requerem consideração em implantações densas. Embora forneça uma estimativa de capacidade valiosa, os resultados simulados podem não capturar todas as nuances de ambientes reais complexos, como um campus universitário.

Complementarmente, Taha *et al.* (2024) avaliaram experimentalmente o desempenho de uma rede *LoRaWAN* em um campus universitário (Universiti Malaya), com foco no monitoramento de qualidade da água. O estudo analisou métricas como RSSI, SNR, perda de pacotes e *path loss* sob diferentes configurações de fatores de espalhamento e ganho de antena. Os resultados empíricos demonstraram a viabilidade do *LoRaWAN* em ambiente urbano/campus, mas também quantificaram a degradação do sinal (RSSI/SNR) com a distância e a ocorrência de perda de pacotes (chegando a 22% no ponto mais distante com SF7 e antena de menor ganho), destacando a importância da configuração da rede e os desafios de confiabilidade em condições reais de NLOS (*Non-Line-of-Sight*). Esses dados são diretamente relevantes para a presente pesquisa, que opera em ambiente similar e necessita garantir a confiabilidade da transmissão de dados de consumo.

Os desafios específicos da adoção tecnológica em universidades foram analisados por Adams e Jokonya (2022). Com base no framework TOE (Tecnologia, Organização e Ambiente) e em uma revisão sistemática, os autores identificaram fatores críticos, como custos, adequação da infraestrutura, apoio da gestão e benefícios percebidos (principalmente economia de água e de custos). O estudo, de natureza não técnica, fornece um contexto institucional relevante para

projetos como o implementado na UFLA, ao explicitar barreiras e condicionantes que precisam ser consideradas para assegurar a adoção bem-sucedida e a sustentabilidade da solução.

Explorando também o ambiente de campus, Eldeeb e Alves (2024) apresentaram um *dataset LoRaWAN* da Universidade de Oulu, coletado por centenas de sensores. Embora o caso de uso principal analisado tenha sido a contagem de pessoas a partir de sensores ambientais (com KNN para imputação de dados faltantes e LSTM/DNN para análise), o trabalho é relevante por documentar uma rede *LoRaWAN* em larga escala em campus, evidenciando desafios práticos como perda de pacotes e a necessidade de tratamento sistemático de dados ausentes — aspectos também pertinentes ao presente projeto de monitoramento hídrico distribuído.

Do ponto de vista de plataformas e arquiteturas, Sacoto-Cabrera *et al.* (2024) descreveram a plataforma SGW-CUENCA para gestão hídrica urbana no Equador. A arquitetura integra o servidor de rede *LoRa ChirpStack* com *Node-RED*, bancos *SQL* e *Google Cloud Platform*, além de LSTM para previsão de consumo. Esse estudo demonstra uma implementação de ponta a ponta baseada em LNS *open-source* similar à adotada nesta dissertação, porém em contexto urbano e com foco preditivo. A presente pesquisa diferencia-se por aplicar uma pilha *open-source* (*ChirpStack*, Python, MySQL, Grafana) em ambiente de campus, com ênfase na validação da medição volumétrica por comparação AMI–AMM em operação.

Finalmente, olhando para a interação com o usuário final, Master *et al.* (2024) propuseram um sistema *IoT* focado em engajamento, com aplicativo móvel, definição de metas, notificações e gamificação. Embora utilize tecnologias de comunicação distintas (menciona Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee) e não aborde a validação rigorosa ou o contexto institucional complexo, o trabalho destaca a importância de interfaces e funcionalidades que promovam o uso consciente da água, aspecto complementar à gestão técnica realizada por sistemas como o proposto aqui.

O Quadro 3.1 apresenta uma síntese comparativa dos principais trabalhos identificados na literatura que abordam o uso de tecnologias *IoT* aplicadas à gestão hídrica. Destacam-se o contexto de aplicação, as tecnologias utilizadas e os métodos de validação, além dos principais pontos fortes e limitações. Observa-se que, embora existam propostas com validação prática — como Slaný *et al.* (2020) e Eldeeb e Alves (2024) — e outras com arquiteturas tecnológicas consistentes — como Sacoto-Cabrera *et al.* (2024) —, persiste uma lacuna na combinação simultânea de quatro elementos: uso de sensores comerciais de hidrômetro, pilha tecnológica *open-source*, validação em campo com comparação AMI–AMM e aplicação em ambiente institucional real.

Quadro 3.1 – Síntese comparativa de sistemas IoT para gestão hídrica.

Autor/Ano	Contexto	Tecnologias	Validação	Achados e Limitações
Slaný <i>et al.</i> (2020)	Residencial (vilas)	Reed switch; LoRaWAN (RN2483); TTN; InfluxDB; Grafana	Lab. e campo; MNF; erro médio < 3%	Deteção de vazamentos (95%); TTN pública; escopo residencial
Murdan e Hardin (2024)	Análise (simulação)	LoRaWAN; MATLAB	ROI e <i>payback</i> (simulação)	Viabilidade econômica; sem validação em campo
Lalle <i>et al.</i> (2019)	<i>Smart Water Grid</i> (sim.)	LoRaWAN; ns-3	PDR vs. SF; capacidade de <i>gateway</i>	~1000 nós com PDR 92% (EU, 32 B); limites em alta densidade
Taha <i>et al.</i> (2024)	Campus (qualidade da água)	LoRaWAN	RSSI; SNR; perda de pacotes	Perdas de até 22% (SF7, antena baixa); desafios NLOS
Eldeeb e Alves (2024)	Campus (rede ampla)	LoRaWAN; sensores ambientais	Tratamento de dados ausentes; LSTM/DNN	Perdas e dados ausentes; <i>dataset</i> de campus
Sacoto-Cabrera <i>et al.</i> (2024)	Urbano (gestão)	ChirpStack; Node-RED; SQL; GCP; LSTM	Previsão de consumo	Pilha <i>open-source</i> e nuvem; foco em previsão
Master <i>et al.</i> (2024)	Usuário final	App móvel; metas; gamificação	Engajamento	Foco em UX; sem comparação AMI-AMM

Fonte: Elaboração própria (2025).

A comparação apresentada evidencia que, embora diversos estudos abordem soluções para monitoramento hídrico com tecnologias IoT, cada um o faz com focos e limitações distintas — seja na escala de aplicação, na profundidade da validação empírica ou na composição da arquitetura tecnológica. Destacam-se abordagens com validação prática restrita a ambientes residenciais, simulações teóricas, e contextos urbanos com soluções escaláveis, mas sem vínculo direto com medição volumétrica ou ambientes institucionais. Em contraste, a presente dissertação propõe e valida uma solução baseada exclusivamente em ferramentas *open-source*, aplicada a dez pontos de consumo em campus universitário, com foco específico na comparação entre medições automáticas (AMI) e manuais (AMM). Essa combinação de características posiciona o trabalho como um avanço relevante dentro do espaço identificado na literatura.

3.2 Arquiteturas IoT e o Papel do LoRaWAN

Os sistemas de *Internet of Things (IoT)* dedicados ao monitoramento e à gestão hídrica tipicamente se estruturam em camadas funcionais que incluem dispositivos de sensoriamento em campo, *gateways* para agregação e transmissão de dados, um *LoRaWAN Network Server (LNS)* para gerenciamento da comunicação e autenticação, e um servidor de aplicação responsável por armazenamento, processamento, análise e visualização dos dados coletados Slaný *et al.* (2020), Sacoto-Cabrera *et al.* (2024). A escolha da tecnologia de comunicação entre os sensores e os *gateways* é um ponto crítico de projeto; a *LoRaWAN* tem se destacado por suas características de longo alcance, baixo consumo energético e custos de implantação relativamente baixos, sendo atrativa para cenários com dispositivos geograficamente dispersos e alimentados por bateria Murdan e Hardin (2024). A adequação da cobertura *LoRaWAN* para áreas como vilas Slaný *et al.* (2020) e campi universitários Taha *et al.* (2024) tem sido explorada, indicando sua viabilidade nesses contextos.

Apesar de suas vantagens, o desempenho e a escalabilidade da rede *LoRaWAN* demandam investigação e planejamento cuidadosos. Análises baseadas em simulação, como a de Lalle *et al.* (2019) para um cenário de *Smart Water Grid*, sugerem que, embora um único *gateway* possa, em condições específicas, suportar centenas de dispositivos (aproximadamente 1000 nós com PDR de 92% para carga útil de 32 bytes sob regulamentação europeia), a capacidade efetiva é sensível à densidade de dispositivos e à estratégia de alocação do *Spreading Factor (SF)*. Tais simulações fornecem estimativas importantes, mas não abarcam todas as complexidades de ambientes reais, como interferências e atenuação por obstáculos. Estudos empíricos em campi universitários, como Taha *et al.* (2024), que avaliaram o desempenho de uma rede *LoRa* para monitoramento de qualidade da água, e Eldeeb e Alves (2024), que documentaram uma rede *LoRaWAN* em larga escala para coleta de dados ambientais e contagem de pessoas, corroboram a viabilidade da tecnologia, mas também expõem desafios práticos. Taha *et al.* (2024) reportaram degradação do RSSI e da SNR com a distância e perdas de pacotes significativas (até 22% em pontos distantes sob certas configurações), especialmente em condições sem visada direta (NLOS, *Non-Line-of-Sight*). De modo similar, Eldeeb e Alves (2024) destacaram a ocorrência de perda de pacotes e a necessidade de tratamento de dados ausentes. Esses achados reforçam a importância da otimização da configuração da rede (SF, ganho de antena, posicionamento de

gateways) e da adoção de mecanismos para assegurar a confiabilidade da coleta de dados em cenários institucionais complexos.

Do ponto de vista das plataformas e pilhas de software, a literatura apresenta diversas configurações. Slaný *et al.* (2020) detalham uma arquitetura que utiliza sensores de pulso conectados a um *gateway* customizado, com os dados gerenciados pela rede pública The Things Network (TTN) e persistidos em InfluxDB para visualização em Grafana. Por outro lado, Sacoto-Cabrera *et al.* (2024) propuseram uma plataforma para gestão hídrica urbana no Equador baseada no LNS (*LoRaWAN Network Server*) *open-source* ChirpStack, integrada ao Node-RED para fluxos de dados, a bancos SQL e à Google Cloud Platform (GCP), incluindo funcionalidades de previsão de consumo com LSTM. Este último exemplo é relevante por demonstrar uma implementação de ponta a ponta com um LNS *open-source* similar ao adotado nesta dissertação.

A presente pesquisa insere-se nesse contexto, implementando uma solução completa de monitoramento de consumo hídrico no campus da UFLA. A arquitetura adota hidrômetros comerciais (SAGATECH) com comunicação *LoRaWAN*, *gateways* Browan e uma pilha de software integralmente *open-source* composta pelo LNS ChirpStack, *scripts* de integração e processamento em Python, banco de dados MySQL e plataforma de visualização Grafana. Diferencia-se de estudos com foco principal em simulação (Murdan; Hardin, 2024; Lalle *et al.*, 2019) ou em contextos e objetivos distintos — qualidade da água (Taha *et al.*, 2024), *dataset* e contagem de pessoas (Eldeeb; Alves, 2024), e gestão urbana com previsão (Sacoto-Cabrera *et al.*, 2024) — ao concentrar-se na implementação prática e na validação empírica da acurácia da medição volumétrica (comparação AMI–AMM) em ambiente institucional real, utilizando uma arquitetura aberta e replicável.

O Quadro 3.2 apresenta uma comparação concisa entre as arquiteturas IoT investigadas na literatura e aquela desenvolvida nesta dissertação. Ao agrupar sensores, *gateways* e servidores de rede (LNS), observa-se a variedade de abordagens, desde simulações teóricas até implementações práticas em contextos reais. Destacam-se os trabalhos que utilizam plataformas *open-source* como *ChirpStack*, *Node-RED* e *Grafana*, refletindo a tendência por soluções replicáveis e escaláveis. A presente dissertação diferencia-se por adotar exclusivamente tecnologias abertas e realizar validação prática em um ambiente institucional real, buscando atender aos requisitos de confiabilidade, baixo custo e integração com políticas públicas de gestão hídrica.

Quadro 3.2 – Comparação entre arquiteturas *IoT* com *LoRaWAN* para monitoramento.

Artigo	Sensor, gateway e LNS	Pilha de software	Processamento e visualização
Slaný <i>et al.</i> (2020)	Hidrômetro com <i>reed switch</i> ; gateway customizado (Raspberry Pi + iC880A); TTN (rede pública)	InfluxDB; Grafana	Visualização no Grafana; validação AMI-AMM; método MNF
Murdan e Hardin (2024)	Simulação de sensores e gateways <i>LoRaWAN</i>	MATLAB	Análises gráficas; cálculo de ROI
Lalle <i>et al.</i> (2019)	1000 nós simulados; gateway e rede modelados no ns-3	ns-3	Análise de PDR e alocação de SF
Taha <i>et al.</i> (2024)	Sensores de qualidade da água; gateways LoRa; LNS não especificado	não especificado	Métricas empíricas: RSSI, SNR; perda de pacotes
Eldeeb e Alves (2024)	Sensores ambientais; gateways <i>LoRaWAN</i> ; LNS não especificado	Node-RED; ThingSpeak	Interpolação com KNN; predição com LSTM
Sacoto-Cabrera <i>et al.</i> (2024)	Medidores urbanos inteligentes; gateways LoRa; ChirpStack	Node-RED; SQL; GCP	Dashboards personalizados; predição de consumo com LSTM
Esta dissertação	Hidrômetros SA-GATECH com <i>reed switch</i> ; gateways Browan; ChirpStack	Python; MySQL; Grafana	Dashboards no Grafana; <i>scripts</i> de validação em Python

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.3 Metodologias de Validação e Resultados de Estudos

A validação empírica de sistemas de monitoramento baseados em IoT é um aspecto fundamental para garantir sua aplicabilidade prática, confiabilidade e eficácia em ambientes reais. A literatura analisada apresenta abordagens diversas, variando entre simulações computacionais, testes laboratoriais e implantações em campo. Esta subseção discute os métodos de validação empregados pelos trabalhos revisados, suas métricas principais e os resultados obtidos, destacando as diferenças em relação à abordagem adotada nesta dissertação.

Slaný *et al.* (2020) realizaram uma validação prática combinando testes em laboratório e campo. O sistema proposto foi comparado com leituras manuais, resultando em um erro médio inferior a 3%. Além disso, os autores utilizaram o método do fluxo mínimo noturno (MNF)

para detecção de vazamentos, atingindo 95% de sucesso nas simulações realizadas. Apesar da solidez da metodologia, o escopo da validação foi limitado a poucos pontos e a um cenário residencial.

Taha *et al.* (2024) concentraram a validação na avaliação do desempenho de rede *LoRa* em campus universitário, analisando RSSI, SNR, perda de pacotes e *path loss* sob diferentes fatores de espalhamento (SF) e configurações de antena. Foram observadas perdas superiores a 20% em condições sem visada direta (NLOS) com SF7 e antena de menor ganho, evidenciando desafios de confiabilidade da comunicação em ambientes complexos e a necessidade de adequado planejamento de cobertura e parametrização da rede.

Eldeeb e Alves (2024) adotaram uma abordagem centrada na confiabilidade dos dados em redes *LoRaWAN* operando em campus, registrando perdas de pacotes em diversos pontos de coleta e propondo interpolação baseada em aprendizado de máquina (KNN) e modelagem LSTM para mitigar ausências de dados. Embora o objetivo principal não envolvesse consumo hídrico, a metodologia de recuperação e análise temporal é aplicável a sistemas *IoT* em operação real.

Sacoto-Cabrera *et al.* (2024) validaram uma plataforma urbana com ênfase em previsão de consumo por meio de redes neurais LSTM, reportando coeficiente de correlação de 94,3% e RMSE de 0,22 sobre dados históricos. A avaliação, centrada em modelagem preditiva, não contemplou a comparação metrológica de leituras físicas com dados de referência manuais.

Murdan e Hardin (2024) realizaram análise de viabilidade com base em simulações matemáticas de consumo de água e cobertura de rede, incorporando estimativas de retorno financeiro (ROI) e tempo de *payback*. O estudo reforça benefícios potenciais do uso de *LoRa*, porém não inclui testes empíricos nem aferição da acurácia das leituras.

Lalle *et al.* (2019) validaram sua proposta por meio de simulações no ns-3, avaliando a taxa de entrega de pacotes (PDR) sob diferentes estratégias de alocação de *Spreading Factor* (SF). As simulações indicaram PDR de até 92% para mil dispositivos, mas os resultados são teóricos e não contemplam atenuação, obstáculos ou interferências presentes em ambientes reais.

Nesta dissertação, a metodologia de validação foi conduzida em campo, no campus da UFLA, com a instalação de 11 hidrômetros SAGATECH conectados via *LoRaWAN*. Os dados coletados automaticamente foram comparados com leituras manuais (AMM), e o erro relativo foi calculado ponto a ponto. Essa abordagem permitiu a análise da acurácia do sistema sob con-

dições reais de operação contínua, aliando confiabilidade à aplicação institucional e utilizando exclusivamente ferramentas *open-source* para coleta, armazenamento, análise e visualização dos dados.

Quadro 3.3 – Comparação entre metodologias de validação.

Artigo	Tipo de Validação	Métricas Utilizadas	Resultados Reportados	Limitações
Slaný <i>et al.</i> (2020)	Laboratório e campo	Erro médio (<3%), AMI vs AMM, MNF	95% de sucesso na detecção de vazamentos	Escopo reduzido; poucos pontos; cenário residencial
Taha <i>et al.</i> (2024)	Campo (campus universitário)	RSSI, SNR, perda de pacotes	Perda >20% em NLOS com SF7	Sem comparação com medição de referência
Eldeeb e Alves (2024)	Campo (campus universitário)	Perda de pacotes, interpolação com KNN/LSTM	Mitigação de falhas com IA	Sem foco em consumo hídrico
Sacoto-Cabrera <i>et al.</i> (2024)	Modelagem preditiva com dados históricos	Correlação (94,3%), RMSE (0,22)	Boa predição de consumo urbano	Sem leitura real vs. manual
Murdan e Hardin (2024)	Simulação matemática	Cobertura, ROI, <i>payback</i>	Viabilidade econômica do LoRa	Sem testes reais; sem validação física
Lalle <i>et al.</i> (2019)	Simulação em ns-3	PDR, SF, capacidade da rede	PDR de até 92% para 1000 dispositivos	Sem fatores reais de ambiente
Esta dissertação	Campo (campus universitário)	Erro relativo, AMI vs AMM	Validação com 10 hidrômetros em operação real	Cobertura limitada por barreiras físicas

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Tabela 3.3 sintetiza os métodos de validação utilizados nos estudos analisados, destacando as métricas empregadas, os resultados obtidos e as limitações observadas. Nota-se que boa parte das pesquisas utiliza simulações ou validações parciais, geralmente limitadas a poucos pontos ou métricas indiretas. A presente dissertação diferencia-se ao realizar testes em campo com mais de 100 dispositivos em operação real, aplicando validação cruzada com medições manuais e cálculo de erro relativo, o que amplia a robustez metodológica da proposta.

4 METODOLOGIA

A metodologia científica é entendida como o conjunto de procedimentos sistemáticos empregados para produzir e validar conhecimento, com explicitação dos métodos e critérios de análise (Firme; Miranda, 2022). No contexto do ensino superior, abordagens orientadas à resolução de problemas constituem estratégias para condução de investigações empíricas e aplicação prática do conhecimento (Lamim-Guedes, 2017; Mesquita; Meneses; Ramos, 2016). A alfabetização científica, enquanto compreensão do funcionamento da ciência e de seus mecanismos de evidência, subsidia a participação informada na produção e no uso de resultados (Correia; Martins, 2022; Bueno, 2010).

Segundo Jung (2004), a metodologia deve explicitar os procedimentos e métodos utilizados, de modo a permitir replicação e validação independentes. Este capítulo descreve a abordagem adotada para desenvolver, implementar e validar um sistema *IoT open-source* de monitoramento e gestão do consumo hídrico setorial na UFLA.

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, orientada à solução de um problema institucional identificado na UFLA (Jung, 2004). A investigação foi conduzida em ambiente operacional no campus e compreendeu a implementação do sistema IoT open-source, a integração de hardware (hidrômetros comerciais e dispositivos LoRaWAN) e software (scripts em Python, banco MySQL e Grafana), bem como a coleta de dados por telemetria (AMI) e por leitura manual (AMM). O desempenho e a acurácia foram avaliados em condições reais, com cálculo do erro percentual relativo em alinhamento ao Regulamento Técnico Metrológico aplicável a hidrômetros (INMETRO, Portaria, 2021).

A metodologia adotada abrange a caracterização do tipo de pesquisa e do cenário de aplicação no campus da UFLA, a especificação dos materiais e métodos empregados incluindo hardware, como hidrômetros inteligentes e dispositivos *LoRaWAN*, e *software*, como *Python*, *MySQL* e *Grafana*, os procedimentos de coleta automática (AMI) e manual (AMM), bem como a integração e o processamento das informações, a definição das métricas de desempenho e o protocolo de validação em conformidade com (INMETRO, Portaria, 2021).

4.1 Tipo de Pesquisa

Esta pesquisa classifica-se, quanto à natureza, como aplicada, voltada ao desenvolvimento e avaliação de uma solução prática para o monitoramento e a gestão do consumo hídrico no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Adota-se a estratégia de estudo de caso único, centrada na UFLA, em ambiente operacional. A operacionalização empregou procedimentos experimentais — desenvolvimento e implantação do sistema IoT — e pesquisa de campo para a coleta sistemática dos dados de validação (Jung, 2004).

Quanto aos objetivos, e conforme Jung (2004), o estudo apresenta caráter descritivo, ao documentar a arquitetura, a implementação e as funcionalidades do sistema, e explicativo-avaliativo, ao analisar o desempenho e comparar os resultados com o método tradicional de medição. A análise de dados adota abordagem predominantemente quantitativa, baseada em séries temporais de consumo e no tratamento estatístico de erros de medição.

A pesquisa bibliográfica sustentou os referenciais conceituais (IoT, gestão hídrica, metrologia), e a pesquisa documental embasou a leitura de normativos técnicos (INMETRO) e de documentos institucionais pertinentes.

4.2 Cenários

A pesquisa foi conduzida no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em ambiente operacional. A caracterização do cenário contextualiza a implementação do sistema *IoT* e os procedimentos de coleta de dados empregados na validação, compreendendo a descrição do local de estudo e os critérios de seleção dos pontos de medição (hidrômetros).

4.2.1 Abordagens metodológicas comparativas

Adotaram-se duas abordagens para o monitoramento do consumo hídrico e para a validação do sistema desenvolvido:

- **Medição manual (AMM).** Procedimento convencional historicamente utilizado na instituição, baseado em leitura visual periódica dos totalizadores volumétricos dos hidrômetros selecionados (por exemplo, mensal), seguida de registro manual dos valores. Esta abordagem constitui a linha de base para comparação e avaliação da acurácia do sistema

proposto. Caracteriza-se por baixa granularidade temporal, dependência de mão de obra e suscetibilidade a erros de leitura e de transcrição.

- **Monitoramento *IoT* (AMI).** Sistema implantado nesta pesquisa, com aquisição automatizada e transmissão remota de dados por hidrômetros equipados com sensor de contato (*reed switch*) e módulo *LoRaWAN*. Os pulsos convertidos em volume são transmitidos via rede *LoRaWAN*, processados pelo *ChirpStack* e armazenados em *MySQL*; a análise é realizada em *Grafana*. Esta abordagem fornece acompanhamento contínuo do consumo e permite a identificação de padrões de uso.

A distinção entre as abordagens orienta os procedimentos específicos de coleta, a escolha das métricas de comparação e a análise quantitativa da validação do sistema *IoT* em relação ao método de referência.

4.2.2 Contexto da Aplicação (UFLA)

Este estudo de caso foi conduzido na Universidade Federal de Lavras (UFLA), instituição pública de ensino superior situada em Lavras, Minas Gerais. Com origem em 1908 e reconhecimento como universidade em 1994, a UFLA desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão em múltiplas áreas do conhecimento (Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2025b).

Figura 4.1 – Vista aérea da UFLA.



Fonte: Universidade Federal de Lavras (UFLA) (2025a)

O campus possui área aproximada de 600 hectares (Figura 4.1), com infraestrutura diversificada distribuída em edificações acadêmicas e administrativas, laboratórios, bibliotecas, moradia estudantil, restaurante universitário, complexos esportivos e áreas de produção agrícola e pecuária (Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2025a). A Figura 4.2 apresenta um mapa esquemático do campus.

Figura 4.2 – Mapa da UFLA.



Fonte: (Google Earth, 2025).

Esta diversidade de instalações e a concentração de atividades resultam em uma demanda considerável por recursos naturais, notadamente água, tornando a gestão hídrica um fator relevante para a sustentabilidade e a eficiência operacional da instituição. Tal contexto valida a UFLA como um cenário pertinente para a implementação e avaliação de tecnologias aplicadas ao monitoramento e gestão de recursos.

4.2.3 Caracterização do Sistema Hídrico Abordagem de Medição Manual

O abastecimento hídrico da Universidade Federal de Lavras (UFLA) provém de fontes próprias, que incluem poços artesianos e uma Estação de Tratamento de Água (ETA) situada no campus (UFLA DQMA, 2025). A ETA trata água captada de mananciais superficiais (reservatórios e lagoas) localizados na área da universidade, conforme ilustrado na Figura 4.3.

A água proveniente dos poços e da ETA é direcionada para um reservatório central (localizado nas proximidades do viveiro florestal). Neste reservatório, está instalado um medidor central, cuja leitura é realizada manualmente, para registrar o volume total direcionado à rede de distribuição. A partir desse ponto, uma rede de tubulações encaminha a água aos diversos prédios e instalações no campus, onde hidrômetros individuais ou compartilhados estão insta-

Figura 4.3 – Exemplos de corpos d’água superficiais na UFLA.



Fonte: Do Autor.

lados (UFLA DQMA, 2025). O monitoramento do consumo nesta rede é realizado por meio da Abordagem de Medição Manual (AMM), definida na seção anterior como a referência para este estudo.

Figura 4.4 – Estação de Tratamento de Água (ETA) da UFLA.



Fonte: Do Autor.

A AMM consiste na leitura visual periódica (e.g., mensal) dos volumes registrados nos hidrômetros instalados nos pontos de consumo, realizada por equipes de campo. Os dados coletados são registrados manualmente em formulários ou planilhas. Este procedimento impõe limitações operacionais e informacionais: a frequência de coleta é baixa, o que impede a análise de perfis de consumo detalhados ou a detecção ágil de anomalias; o processo manual é suscetível a erros de leitura e transcrição; e a disponibilização dos dados consolidados para a gestão é tardia. Adicionalmente, a falta de dados contínuos e a dificuldade na setorização e quantificação de perdas na rede de distribuição restringem a capacidade de gerenciamento proa-

tivo dos recursos hídricos na instituição. Tais limitações evidenciam a relevância de abordagens automatizadas para o monitoramento hídrico no campus.

Para a validação comparativa entre a telemetria (AMI) e a medição manual (AMM), as leituras manuais e os registros de telemetria foram conciliados por ponto de medição e por janelas temporais coincidentes. A comparação incide sobre os incrementos de volume nessas janelas. Os critérios de exclusão, as métricas adotadas e o procedimento estatístico encontram-se detalhados na Seção 4.4.3.

4.2.4 Critérios de seleção dos pontos de medição

A seleção dos pontos instrumentados considerou: (i) setorização hidráulica do campus e relevância para a gestão; (ii) representatividade de perfis de consumo (acadêmico, administrativo, serviços e áreas produtivas); (iii) viabilidade de instalação e manutenção dos hidrômetros; (iv) condições de enlace *LoRaWAN* (linha de visada, obstruções e proximidade relativa ao *gateway*); e (v) disponibilidade institucional para acesso e acompanhamento de leituras manuais. Essa definição buscou cobrir diferentes regimes de demanda e topologias de ramais, preservando rastreabilidade e comparabilidade entre séries.

4.2.5 Procedimentos de coleta de dados

A coleta adotou duas frentes complementares. Na abordagem AMM, realizaram-se leituras visuais periódicas dos totalizadores volumétricos nos pontos selecionados, com registro em formulários institucionais. Na abordagem AMI, as mensagens de telemetria geradas pelos hidrômetros foram transmitidas via *LoRaWAN*, processadas pelo servidor de rede e encaminhadas a um *pipeline* de ingestão e armazenamento para posterior análise. As séries de AMM e AMI foram conciliadas por identificador do ponto de medição e por carimbo temporal, de modo a permitir comparações em janelas definidas. O tratamento de dados contemplou verificação de consistência (incrementos não negativos), deduplicação de mensagens e alinhamento temporal entre as abordagens, mantendo as configurações operacionais detalhadas nos anexos correspondentes.

4.2.5.1 Amostra e distribuição dos pontos instrumentados

Ao término da implantação, foram instalados e configurados 182 hidrômetros *SAGATECH US-5.0* no campus da UFLA. A distribuição contemplou setores acadêmicos, administrativos, serviços e áreas produtivas, selecionados segundo setorização hidráulica, representatividade de perfis de consumo, viabilidade de instalação/manutenção e condições de enlace *LoRaWAN*. Os pontos foram georreferenciados para rastreabilidade e análise espacial.

Para as análises operacionais, considerou-se telemetria AMI contínua por aproximadamente 12 meses (de 22/09/2024 a 22/09/2025). Além dos indicadores de rede, analisou-se o consumo de água no período (volume total e por ponto), séries horárias/diárias e padrões sazonais, incluindo consumo basal noturno e ocorrências de pico. Para a validação metrológica (AMI-AMM), empregou-se uma amostra de 11 pontos acompanhada durante 46 dias de 28/04/2025 a 12/06/2025, conforme critérios descritos na Seção 4.3.6. Essa distinção entre o universo instrumentado, o conjunto operacional e a amostra de validação é mantida nas seções subsequentes.

4.3 Materiais

Esta seção descreve os recursos tecnológicos utilizados na implantação do sistema de monitoramento no campus da UFLA. Apresentam-se os componentes de *hardware* (hidrômetros SAGATECH US-5.0 com saída por pulsos e módulo *LoRaWAN*, *gateway* Browan e infraestrutura de servidor) e de *software* (ChirpStack, Python, MySQL e Grafana), bem como suas funções no arranjo adotado.

Os procedimentos de implementação e de coleta de dados foram descritos na Metodologia; o protocolo estatístico empregado nas análises consta na Seção 4.3.6.

4.3.1 Sensores - Hidrômetros

Na abordagem de monitoramento *IoT* (AMI) utilizou-se o hidrômetro *SAGATECH US-5.0*, equipamento unijato velocimétrico empregado em aplicações residenciais e institucionais, totalizando 182 unidades instaladas no campus da UFLA. O princípio de medição baseia-se em um jato único direcionado ao rotor interno. O sensor *reed switch* integrado gerou pulsos

elétricos proporcionais ao volume (resolução de 1 pulso/L) e o módulo *LoRaWAN* transmitiu periodicamente os registros de telemetria. O dispositivo disponibilizou ainda sinais de alarme para eventos como corte de cabo e influência de campo magnético (Sagatech, 2025).

As especificações técnicas e metrológicas do *US-5.0* constam na Tabela 4.1, incluindo classes metrológicas, faixas operacionais de vazão e pressão, e resoluções de saída por pulsos.

Tabela 4.1 – Especificações técnicas e metrológicas do hidrômetro *SAGATECH US-5.0*.

Atributo	US-5.0
Vazão nominal (Q_n)	2,5 m ³ /h
Vazão máxima (Q_{max})	5,0 m ³ /h
Vazão de transição (Q_t)	A: 250 L/h; B: 200 L/h; C: 37,5 L/h
Vazão mínima (Q_{min})	A: 100 L/h; B: 50 L/h; C: 25 L/h
Classe	C+H ou B+H/B+H/A-V (conforme aplicação)
Início de funcionamento	1 l/h
Perda de carga máxima (em Q_{max})	< 1 bar
Pressão máxima de trabalho	10 bar
Temperatura máxima de trabalho	40–90 °C
Classe de blindagem	I, II, III
Leitura mínima / resolução	0,02 m ³
Leitura máxima	9,9999998 m ³
Saída de pulsos (<i>reed switch</i>)	1 pulso/L
Saída de pulsos (indutivo)	1 – 10 – 100

Fonte: Adaptado de (Sagatech, 2025).

Conforme a documentação técnica, o modelo admite instalação horizontal ou vertical dentro das classes metrológicas declaradas. A resolução de 1 pulso/L favoreceu a análise de variações de baixo fluxo. O equipamento operou dentro do espectro de temperatura informado (40–90 °C) e suportou pressões de até 10 bar.

O módulo *LoRaWAN* integrado apresentou perfil de baixo consumo energético, com autonomia operacional estimada superior a cinco anos. Os graus de proteção IP68 (corpo do hidrômetro) e IP67 (conjunto do sensor *reed*) foram compatíveis com instalação externa.

O conjunto sensorial *reed switch* operou com tensão de até 30 V AC/DC, corrente de até 0,2 A e frequência máxima de 50 Hz. A faixa térmica de 0–60 °C e a qualificação IP67 foram adequadas às condições ambientais observadas. Os pulsos foram convertidos diretamente em incrementos volumétricos no *pipeline* de dados.

A Figura 4.5 apresenta o design compacto do hidrômetro *SAGATECH US-5.0*, ilustrando a instalação em diversos tipos de tubulações, mesmo em ambientes externos sujeitos a flutuações climáticas.

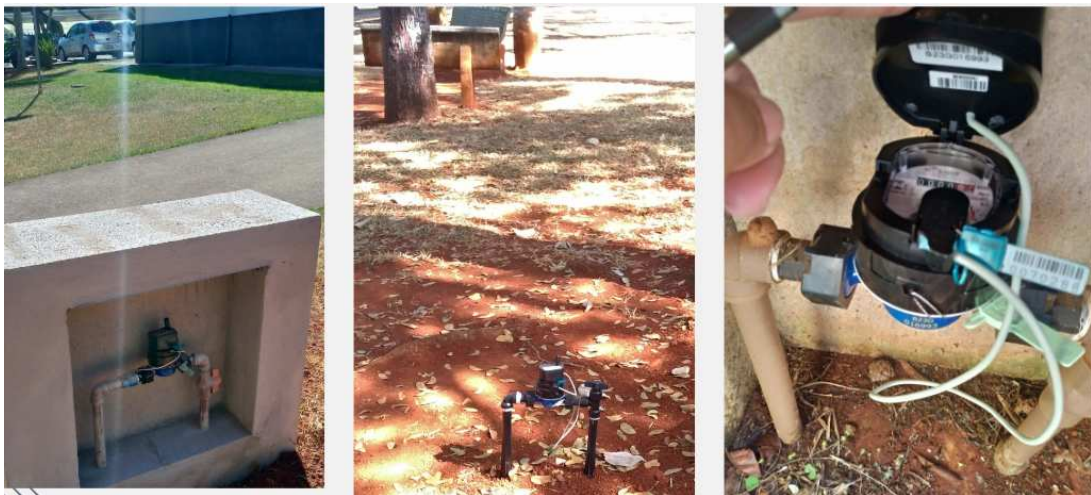
Figura 4.5 – Modelo de hidrômetro US da *Sagatech*.



Fonte: Sagatech (2025).

A Figura 4.6 ilustra uma instalação no campus da UFLA, com adaptação a diferentes arranjos de tubulação e uso da interface de pulsos para telemetria via *LoRaWAN*. Os alarmes internos (campo magnético e integridade do cabo) permaneceram disponíveis para verificação de eventos operacionais.

Figura 4.6 – Hidrômetros *Sagatech* US-5.0 instalados no campus UFLA.



Fonte: Do autor (2024).

A seleção do modelo *SAGATECH US-5.0* para este projeto considerou sua disponibilidade e adoção como padrão pela UFLA para instalações de monitoramento hídrico, garantindo coerência com a infraestrutura existente e planejamentos institucionais. Tecnicamente, o equipamento apresenta conformidade com os requisitos da Portaria nº 246/2000 do INMETRO, o

que atesta sua adequação para medição no contexto brasileiro. Adicionalmente, suas características foram fundamentais para a execução da pesquisa: a comunicação *LoRaWAN* integrada alinhou-se à arquitetura de rede definida; a saída de pulsos via sensor *Reed Switch* (1 pulso/L) permitiu a leitura automatizada com a granularidade requerida pela validação; e as classificações de proteção IP68/IP67 conferiram a aptidão necessária para as condições de instalação no campus, complementadas por funcionalidades de alarme contra fraude ou falhas. (INMETRO, Portaria, 2021)

4.3.2 Gateway LoRaWAN

A camada de conectividade da arquitetura IoT foi implementada por meio do *gateway* Browan Outdoor Micro Gateway V1 (WAPS-232N_LW), instalado para operação externa. O *gateway* atuou como elemento intermediário entre os hidrômetros *SAGATECH* US-5.0 e o servidor de rede *ChirpStack*, encaminhando os registros de telemetria ao sistema central.

Figura 4.7 – *Browan Outdoor Micro Gateway V1*.



Fonte: Browan (2025).

A Figura 4.7 apresenta o modelo do *gateway* utilizado neste projeto, destacando seu formato compacto e adequado para instalações externas expostas a diferentes condições ambientais.

O *gateway* operou conforme o protocolo *LoRaWAN* 1.0.3, utilizando o espectro AU915–928 MHz, regulamentado pela ANATEL (Resolução nº 680/2017 e Ato nº 14.448/2017) (Anatel, Resolução nº 680, 2017; ANATEL. Ato nº 14.448, 2017). Sua configuração técnica contava com o processador *baseband Semtech* SX1301 e transceptores SX1257 ou SX1255, permitindo a operação simultânea em 16 canais com cobertura de até 15km em condições favoráveis. Além disso, apresenta sensibilidade de recepção de -142dBm e potência de transmissão máxima de

27dBm (0,5W), assegurando comunicação eficiente mesmo em ambientes com alta densidade de obstáculos (Browan, 2025).

O *gateway* utilizou o modo *Packet Forwarder*, para encaminhar os dados ao Servidor de rede *LoRaWAN Chirpstack*, conforme protocolo *Semtech UDP*, para encaminhar os pacotes recebidos diretamente ao servidor *ChirpStack* na porta 1700. Esta configuração foi definida para garantir uma comunicação eficiente entre os dispositivos e o servidor central, permitindo o monitoramento contínuo e em tempo real dos dados de telemetria. (Chirpstack, Semtech UDP, 2025).

A Tabela 4.2 resume as principais especificações técnicas do *Gateway LoRaWAN Browan Outdoor Micro Gateway V1*, enfatizando características que facilitam a instalação externa e integração ao sistema de monitoramento proposto.

Tabela 4.2 – Especificações técnicas do *Gateway Browan Outdoor Micro Gateway V1*.

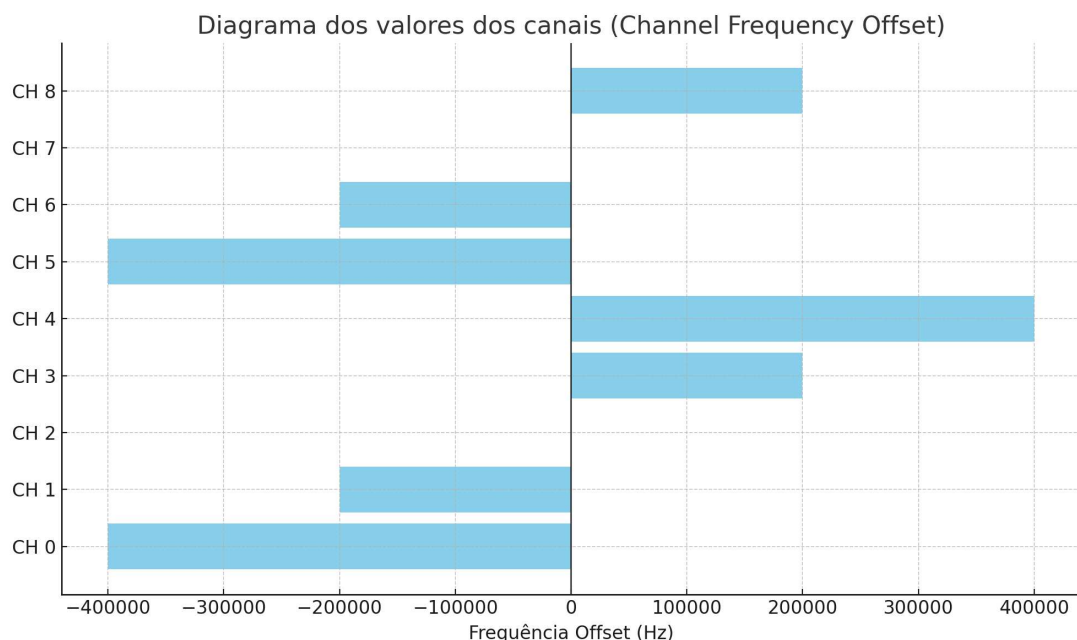
Característica	Especificação
Modelo	WAPS-232N_LW
Padrão LoRaWAN	1.0.3
Faixa de frequência	AU915–928 MHz (regulamentado pela ANATEL)
Número máximo de canais	16
Sensibilidade de recepção	–142 dBm
Potência máxima de transmissão	27 dBm (0,5 W)
Alcance típico	Até 15 km (condições ideais)
Interfaces de conexão	RJ45 WAN <i>PoE</i> ; antena <i>LoRa</i> tipo N; <i>GPS</i> ; 3G/4G (opcional)
Dimensões	230 × 200 × 68 mm
Peso	2,05 kg
Classificação de proteção	IP67
Faixa de temperatura operacional	–40 °C a +60 °C
Criptografia	AES 128 bits
Certificações internacionais	FCC; CE; NCC; TELEC; RCM

Fonte: Adaptado de (Browan, 2025).

Para garantir o funcionamento adequado do *gateway Browan* dentro da faixa regulamentada (AU915–928 MHz), foi realizada uma configuração dos parâmetros de transmissão do equipamento. O dispositivo utilizou dois módulos de rádio internos, denominados Radio 0 e Radio 1, configurados nas frequências centrais de 915,6 MHz e 916,6 MHz, respectivamente. Cada módulo gerenciou um conjunto específico de canais, distribuídos ao redor dessas frequências centrais.

Os canais foram configurados com um espaçamento de frequência (*offset*) específico, variando de -400 kHz a $+400\text{ kHz}$ para cada rádio, com largura de canal (*Channel Bandwidth*) de 500 kHz e fator de espalhamento (*Spreading Factor*) 10, conforme especificado pelo padrão *LoRaWAN* adotado. O ganho da antena foi configurado em 10 dBi para compensar perdas associadas ao cabeamento entre o *gateway* e a antena externa. Esse ajuste é crucial para assegurar a potência efetivamente irradiada necessária ao desempenho desejado, mantendo a qualidade dos sinais recebidos e transmitidos. A distribuição dos valores de *offset* dos canais configurados pode ser visualizada no diagrama da Figura 4.8.

Figura 4.8 – Distribuição dos valores de *offset* dos canais.



Fonte: Do Autor (2025).

A Figura 4.8 apresenta a configuração dos canais utilizados pelo *gateway Browan Outdoor Micro Gateway V1*, ilustrando graficamente os valores dos *offsets* de frequência (em *Hz*) definidos para cada canal ativo. Observa-se que os canais estão distribuídos de maneira equilibrada em torno das frequências centrais dos rádios, abrangendo uma faixa de frequência que varia de -400 kHz a $+400\text{ kHz}$. Essa distribuição permite a utilização eficiente do espectro disponível, minimizando interferências entre os canais e otimizando a recepção dos pacotes provenientes dos sensores *LoRaWAN*.

A escolha do *gateway Browan Outdoor Micro Gateway V1* (modelo WAPS-232N_LW) considerou uma combinação de fatores técnicos e institucionais. Do ponto de vista operacional, o equipamento atende às exigências do projeto por sua compatibilidade com a faixa de frequên-

cia regulamentada pela ANATEL (AU915–928 MHz), pelo suporte a até 16 canais simultâneos e por suas características construtivas (certificação IP67) que conferiram aptidão para operação em ambientes externos e sob condições climáticas variadas. Adicionalmente, sua configuração via protocolo *Semtech* UDP no modo *Packet Forwarder* permite interoperabilidade com o servidor *ChirpStack* utilizado. Do ponto de vista institucional, trata-se de um modelo adquirido e padronizado pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) para sistemas IoT, o que facilitou sua utilização neste projeto e consolida sua padronização para futuras expansões do sistema IoT na instituição.

Figura 4.9 – *Gateway* Instalado na UFLA.

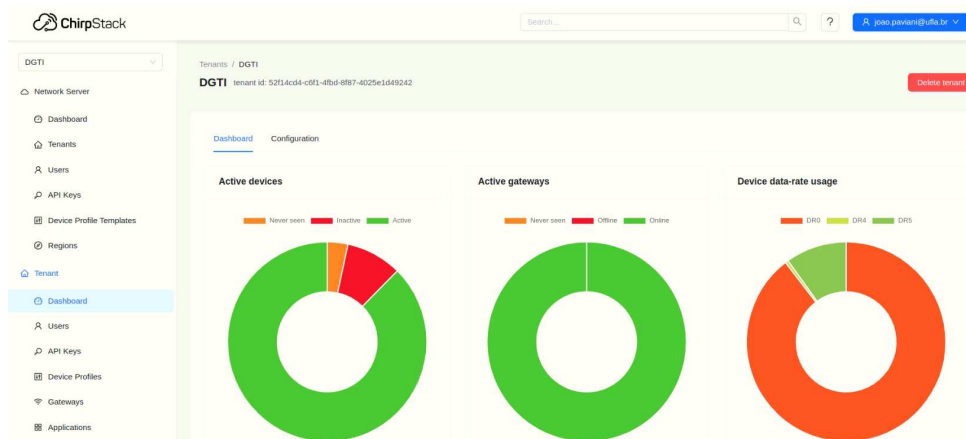


Fonte: Do Autor (2025).

O *gateway* foi instalado em um local estratégico no campus da UFLA para garantir cobertura adequada, minimizando possíveis áreas com sinais fracos ou indisponíveis. A Figura 4.9 exemplifica uma dessas instalações práticas realizadas na universidade, destacando as condições reais de operação e integração do equipamento à infraestrutura existente.

4.3.3 Servidor de Rede LoRaWAN - Chirpstack

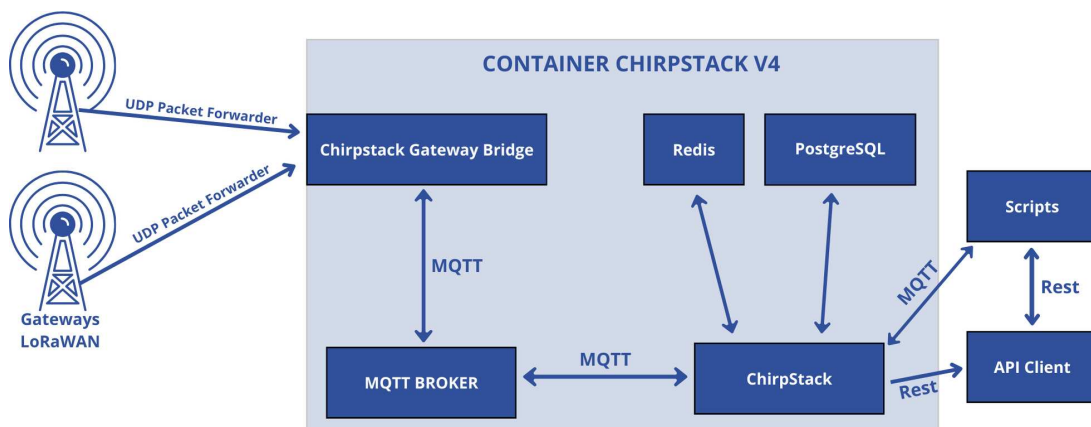
O servidor de rede adotado neste estudo foi o *LoRaWAN ChirpStack* na versão 4, responsável por gerenciar dispositivos, autenticar mensagens e decodificar dados recebidos dos hidrômetros *SAGATECH US-5.0*. A escolha fundamentou-se na arquitetura modular de código aberto, com flexibilidade de configuração e adaptabilidade a requisitos de projeto, adequada a redes *LoRaWAN* em ambientes de P&D (Chirpstack, 2025).

Figura 4.10 – Tela inicial do *ChirpStack*.

Fonte: Do Autor (2025).

A Figura 4.10 apresenta a interface da plataforma, com *dashboard* geral de dispositivos, *gateways* e mensagens, utilizado para gerenciamento e monitoramento dos dispositivos implantados.

A implementação do *ChirpStack* foi realizada em *containers Docker*. Os componentes principais foram: *ChirpStack Gateway Bridge* (recepção dos pacotes via *Semtech UDP* e conversão para MQTT), o servidor principal *ChirpStack* (funções de *Network/Application Server*), *PostgreSQL* (armazenamento persistente) e *Redis* (cache). A comunicação interna entre *containers* utilizou o *broker MQTT Mosquitto*; uma *API REST* expôs dados processados para aplicações externas (painéis e *scripts*).

Figura 4.11 – Representação esquemática da arquitetura de *containers Docker*.

Fonte: Adaptado de Chirpstack (2025).

A Figura 4.11 apresenta uma representação esquemática da integração entre estes componentes, ilustrando o fluxo de dados desde sua recepção no *gateway* até sua disponibilização para sistemas consumidores externos, o que permite a compreensão detalhada das interações em

cada fase do processamento. A seguir, descreve-se como cada *container* se integra no ambiente *Docker*, evidenciando as portas de comunicação e as configurações específicas que permitem o correto funcionamento do *ChirpStack*.

A implementação do *ChirpStack* utilizou uma arquitetura baseada em *containers Docker*. A configuração abrange os seguintes componentes essenciais:

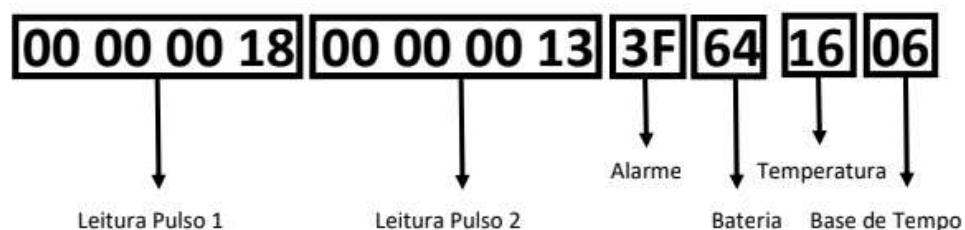
- ***ChirpStack Gateway Bridge***: Atuando como intermediário, esse *container* recebe os dados dos *gateways* via protocolo *Semtech UDP Packet Forwarder* na porta 1700 e os converte em mensagens *MQTT* através de publicações em um tópico criado do próprio *gateway* recebido, que são publicadas para o *container* principal do *ChirpStack*. Essa ponte é crucial para garantir a integração fluida entre o *Browan Outdoor Micro Gateway* e o servidor de rede.
- ***Mosquitto***: Este *container* funciona como o *broker MQTT*, facilitando a comunicação entre os *containers* do *ChirpStack*. Recebe, armazena e encaminha as mensagens publicadas pelo *ChirpStack Gateway Bridge* para o *container* principal, assegurando que os dados de telemetria dos *gateways* sejam transmitidos de forma confiável. A configuração do *Mosquitto* é definida por arquivos montados no diretório `./configuration/mosquitto/config/` e a porta padrão 1883 é exposta para a troca de mensagens *MQTT*.
- ***ChirpStack (Container Principal)***: Este *container* combina as funcionalidades do *Network Server* e do *Application Server*. Ele é responsável pelo registro e autenticação dos dispositivos *LoRaWAN*, além do processamento, enfileiramento e roteamento das mensagens *uplink* e *downlink*. Adicionalmente, oferece *APIs* para integração com sistemas externos, como *dashboards* e bancos de dados. Para isso, são montados volumes contendo os arquivos de configuração (por exemplo, `./configuration/chirpstack`) e a base de dados dos dispositivos (`./LoRaWAN-devices`). O *container* expõe a porta 8080 para acesso à interface *web* e utiliza variáveis de ambiente para apontar para os serviços auxiliares, tais como o *Mosquitto*, *Redis* e *PostgreSQL*.
- ***PostgreSQL***: Fundamental para a persistência dos dados, o *container PostgreSQL* armazena informações sobre os dispositivos, sessões e configurações do *ChirpStack*. Os dados são mantidos em um volume persistente (`postgresqldata`) e inicializados por *scripts* contidos no diretório `./configuration/postgresql/initdb`. Essa estrutura garante que os dados

históricos e as configurações do sistema estejam disponíveis mesmo após reinicializações ou atualizações do ambiente.

- **Redis:** Utilizado como armazenamento em memória, o *Redis* atua como um *cache* para acelerar o processamento de dados e gerenciar filas de mensagens. Com comandos de inicialização que configuram políticas de salvamento e volumes montados para persistência (por exemplo, *redisdata*), o *Redis* contribui para a performance e a eficiência do processamento do *ChirpStack*.
- **ChirpStack REST API:** Para facilitar a integração com aplicações externas, este *container* fornece uma interface *RESTful*. Configurado para se comunicar com o *container* principal do *ChirpStack* (usando, por exemplo, o comando `–server chirpstack:8080 –bind 0.0.0.0:8090 –insecure`), ele expõe a porta 8090, permitindo que *dashboards* e sistemas de monitoramento acessem os dados processados.

O transmissor *LoRa* integrado aos hidrômetros *SAGATECH US-5.0* transmitiu mensagens contendo leituras de pulsos, alarmes, nível de bateria e intervalos de transmissão. Os dados recebidos inicialmente em Base64 foram convertidos para hexadecimal, o que permitiu a interpretação dos diferentes campos conforme a documentação do fabricante (Sagatech, 2025). Por exemplo, quatro *bytes* representam cada canal de pulso; outros *bytes* correspondem a alarmes, bateria e tempo entre transmissões. A Figura 4.12 ilustra a organização dos dados decodificados em hexadecimal.

Figura 4.12 – Estrutura do *Payload*.



Fonte: Sagatech (2025).

No servidor *ChirpStack*, uma função específica de decodificação converteu esses dados em valores numéricos utilizáveis, como leituras de pulsos, estado da bateria e alarmes. Esses dados são automaticamente associados ao hidrômetro correspondente via *DevEUI* e podem ser publicados via *MQTT*, armazenados ou enviados para ferramentas analíticas.

Adicionalmente, o sistema permitiu comandos de *downlink* para ajustes e controle remoto, como sincronização das leituras ou acionamento de válvulas, ampliando sua aplicabilidade em contextos operacionais específicos.

Após a decodificação, os dados foram encaminhados para o banco de dados *PostgreSQL*, que armazenou informações persistentes sobre dispositivos e sessões. O *Redis*, operando como *cache*, melhorou a performance ao armazenar informações temporárias e gerenciar filas de processamento. O *Mosquitto*, como *broker MQTT*, assegurou a comunicação entre os diversos *containers*, possibilitando a troca eficiente de mensagens e a integração dos dados coletados com a camada de visualização.

Desta forma, o *Browan Outdoor Micro Gateway V1* encaminha os dados dos hidrômetros – previamente cadastrados no *ChirpStack* com seus respectivos *DevEUI* – por meio do modo *packet forwarder*, em que o *gateway* envia os pacotes via protocolo *Semtech UDP* na porta 1700. Tais pacotes são então captados pelo *contêiner ChirpStack Gateway Bridge*, que converte as mensagens para formato *MQTT* e as publica em um tópico específico do *gateway*. Em seguida, o *contêiner* principal do *ChirpStack*, inscrito nesse tópico, recebe as mensagens, decodifica o *payload* e associa a mensagem ao dispositivo correto por meio do *DevEUI*. Após esse processamento, o *ChirpStack* pode armazenar as leituras no banco de dados e extrair dados essenciais, como a contagem de pulsos (com resolução de 1 L/pulso), alarmes de condições anômalas e nível de bateria. Por fim, essas informações são republicadas em um tópico dedicado ao dispositivo, para serem consumidas por outras aplicações ou camadas da arquitetura.

4.3.4 Visualização dos dados com Grafana

Para a visualização e análise interativa dos dados de consumo armazenados no *MySQL*, foi utilizada a plataforma *Grafana* (*open source*). A seleção considerou a compatibilidade com múltiplas fontes de dados, a flexibilidade para construção de painéis e os recursos de séries temporais, adequados ao monitoramento de sistemas IoT (Grafana Labs, 2025).

Foram desenvolvidos *dashboards* para apresentação dos resultados e acompanhamento operacional, incluindo: (i) painel por dispositivo (setor, localização, RSSI/SNR, telemetria por dia, consumo acumulado e séries horárias/diárias, com geolocalização em mapa) e (ii) painel geral (mapa do campus com localização de todos os pontos e estado operacional baseado no

tempo desde a última comunicação). Esses painéis foram alimentados a partir das consultas ao *MySQL* e utilizados nas análises reportadas.

- Um painel detalhado por dispositivo: este apresentará informações como setor de instalação, localização, indicadores de qualidade do sinal *LoRaWAN* (RSSI, SNR), quantidade de telemetria transmitida por dia, consumo acumulado e gráficos de consumo diário ou em outros intervalos. Objetiva-se integrar também a geolocalização do dispositivo em um mapa neste painel.
- Um painel de monitoramento geral: exibirá um mapa do campus com a localização de todos os hidrômetros monitorados e utilizará indicadores visuais (e.g., cores) para representar o status operacional de cada dispositivo (baseado no tempo desde a última comunicação), o que auxiliará na identificação de potenciais falhas na rede de sensores.

Desta forma, a implementação e configuração do *Grafana* constituirão uma etapa determinante na fase final do projeto. Esta etapa resultará na interface para apresentação dos resultados e para a demonstração prática do valor do sistema de monitoramento proposto. A construção destes painéis será realizada após a conclusão da integração dos dados no banco *MySQL* e a validação do sistema.

4.3.5 Infraestrutura de Hospedagem

Os componentes de *software* que compõem o *backend* da abordagem AMI — *ChirpStack*, *MySQL*, *scripts* de integração e *Grafana* — foram implantados e estão em execução na infraestrutura do *Data Center* da UFLA (Figura 4.13). A escolha por utilizar esta estrutura centralizada e gerenciada pela instituição visou garantir um ambiente de alta segurança, disponibilidade e escalabilidade para a aplicação, alinhando o projeto às políticas de governança de TI da universidade.

A solução foi implementada em uma máquina virtual dedicada, provisionada com o sistema operacional *Ubuntu Server 20.04 LTS*, sobre a qual foi orquestrada a arquitetura de contêineres *Docker* descrita anteriormente.

A hospedagem ocorre sobre ambiente de hiperconvergência (*HP SimpliVity*), com virtualização em *cluster* de múltiplos *hosts* físicos. O arranjo provê alta disponibilidade (migra-

Figura 4.13 – Data Center da UFLA.



Fonte: Do Autor (2025).

ção automática de máquinas virtuais em falhas de hardware) e redundância de armazenamento (RAID e discos *spare*), contribuindo para a continuidade operacional do sistema.

4.3.6 Protocolo de análise de dados

Para garantir o rigor, a transparência e a replicabilidade da análise dos dados coletados, foi definido um protocolo formal que detalha desde a preparação dos dados até os métodos estatísticos empregados para responder a cada objetivo específico. Este protocolo serviu como um guia metodológico para todas as etapas quantitativas da pesquisa.

4.3.6.1 Definição dos Conjuntos de Dados

A análise foi conduzida sobre dois conjuntos de dados distintos, derivados da infraestrutura implementada:

- Conjunto operacional (D_{oper}): Composto pela telemetria contínua dos 182 hidrômetros instalados no campus. Este conjunto de dados de longo prazo foi utilizado para as análises de qualidade das séries temporais e para os estudos de detecção de anomalias (Objetivo Específico 4).
- Conjunto de validação (D_{val}): Composto pelos dados da amostra de 11 hidrômetros, para os quais foram coletados registros simultâneos de telemetria (AMI) e de medição manual (AMM). A coleta para este conjunto ocorreu durante um período de 46 dias, entre 28 de

abril de 2025 e 12 de junho de 2025, e os dados foram utilizados exclusivamente para a validação da acurácia do sistema.

4.3.6.2 Premissas gerais

Todos os registros foram padronizados no fuso *America/Sao_Paulo* (UTC−3). O carimbo temporal adotado foi o de recepção no servidor (*uplink*), evitando dependência do relógio de campo. Não se aplicou imputação de valores ausentes; as análises consideraram apenas dados efetivamente medidos. Períodos de manutenção programada foram excluídos para não interferirem nas estimativas. A rede operou com ADR habilitado; esse recurso ajustou DR/potência, sem alterar o intervalo de amostragem.

4.3.6.3 Preparação dos dados

Procedeu-se à remoção de duplicatas (mensagens com `dup_flag=1`) e à consolidação por `f_cnt`. Resets do contador acumulado foram identificados por regressão do valor e tratados para evitar incrementos negativos artificiais. Para comparações AMI–AMM, as séries foram alinhadas por ponto e por janelas temporais coincidentes (entre duas leituras AMM consecutivas).

4.3.6.4 Indicadores operacionais de suporte

Para contextualizar os resultados (sem constituir objetivo específico), calcularam-se: **disponibilidade** (fração de intervalos com ≥ 1 mensagem), **PDR** (mensagens recebidas/esperadas; esperadas = $\lfloor \text{tempo ativo} / T_n \rfloor$ por dispositivo) e a distribuição de **RSSI/SNR** por ponto. Esses indicadores auxiliaram a interpretação da qualidade das séries e dos eventos anômalos.

4.3.6.5 Qualidade das séries

A qualidade foi avaliada por três aspectos: **completude** (proporção de intervalos com amostra), **regularidade do intervalo de amostragem** (mediana e IQR dos tempos entre mensagens consecutivas) e **consistência interna** (monotonicidade do acumulado e ausência de incre-

mentos negativos após o tratamento de resets). As sínteses foram apresentadas por dispositivo e de forma agregada.

4.3.6.6 Validação da acurácia AMI–AMM

A comparação foi feita por janelas definidas por pares consecutivos de leituras AMM em cada ponto. Em cada janela, computaram-se os incrementos de volume medidos manualmente (ΔV_{AMM}) e por telemetria (ΔV_{AMI} , a partir da soma de pulsos de 1 L). A acurácia foi expressa por *erro absoluto* e *erro relativo* por janela, além de MAE, MAPE e intervalos de confiança de 95% (bootstrap). Incluiu-se gráfico de Bland–Altman para inspeção de viés e limites de concordância.

4.3.6.7 Procedimentos da triagem operacional

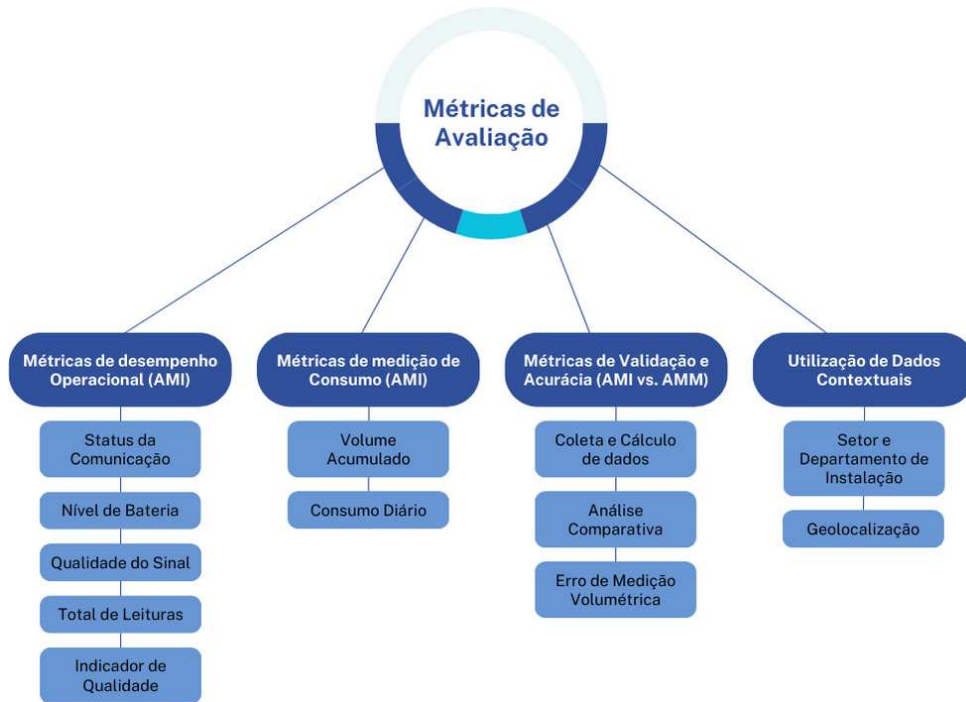
Sobre o D_{oper} , a triagem operacional focou na detecção de consumo noturno atípico. A análise utilizou a janela horária de 00:00–05:00, sendo um evento sinalizado quando o incremento horário (ΔV) superou o percentil 99 (P99) calculado sobre o histórico noturno do campus. O resultado desta análise é uma lista priorizada (Top 10) dos dispositivos com maior frequência de sinalizações, indicando os principais alvos para investigação de campo.

4.4 Métricas

Esta seção descreve as métricas adotadas para avaliar a abordagem de monitoramento *IoT* utilizada neste estudo. Os indicadores mensuram: (i) condições operacionais da rede (*disponibilidade*, *PDR*, *RSSI/SNR*) — suporte às análises; (ii) **qualidade das séries de consumo** (completude, regularidade do intervalo de amostragem e consistência interna); e (iii) **acurácia das medições** — comparação **AMI** versus **AMM** por incrementos de volume na mesma janela, com erro absoluto e relativo e estatística agregada — **OE3**. As demonstrações de aplicabilidade gerencial (OE4) foram operacionalizadas como uma triagem reprodutível, que combina a recência de comunicação e o consumo noturno atípico (percentis elevados) para priorização de atendimentos.

Para a validação, as estimativas obtidas por telemetria (AMI) foram comparadas às leituras manuais (AMM), tomadas como referência, em janelas delimitadas por pares consecutivos de leituras para os 11 pontos acompanhados entre 28/04/2025 e 12/06/2025, conforme o protocolo definido na Seção 4.3.6. A Figura 4.14 apresenta o conjunto de métricas e seu enquadramento nesta seção.

Figura 4.14 – Representação das métricas.



Fonte: Do Autor (2025).

4.4.1 Métricas de desempenho operacional da AMI

Este conjunto de métricas foi empregado para caracterizar o desempenho da infraestrutura da abordagem de monitoramento (AMI), abrangendo os sensores de campo (hidrômetros) e a rede *LoRaWAN*. Esses indicadores subsidiam a verificação de operação do sistema, o diagnóstico de falhas e a avaliação da qualidade da coleta de dados. As métricas foram calculadas sobre o conjunto operacional (D_{oper} , 22/09/2024–22/09/2025) e são definidas a seguir.

4.4.1.1 Disponibilidade do Dispositivo

Este indicador refletiu a atualidade dos dados recebidos por hidrômetro. Para cada *DevEUI*, considerou-se o *timestamp* da última mensagem válida registrada no *MySQL*; a diferença entre o instante de referência e esse *timestamp* indicou se o dispositivo vinha transmitindo regularmente. Com base nessa recência, foram definidas categorias de status (por exemplo, ativo, inativo recente, crítico) segundo limiares de ausência de comunicação pré-estabelecidos. O indicador foi utilizado para identificação rápida de possíveis falhas de transmissão, bateria ou operação ao longo do período do conjunto operacional (D_{oper} , 22/09/2024–22/09/2025).

4.4.1.2 Nível de bateria

O nível de bateria dos hidrômetros foi acompanhado a partir do campo específico reportado no *payload* LoRaWAN pelo *SAGATECH US-5.0* (percentual de 0–100%). Após a decodificação no *ChirpStack*, o valor foi extraído (consulta à plataforma e *scripts* de integração) e armazenado para análise. As estatísticas foram sintetizadas por dispositivo (mediana e quartis) e acompanhou-se a variação temporal no período do conjunto operacional (D_{oper} , 22/09/2024–22/09/2025).

4.4.1.3 Qualidade do Sinal LoRaWAN RSSI e SNR

A qualidade do enlace rádio foi acompanhada pelos metadados de recepção das mensagens LoRaWAN: RSSI (dBm) e SNR (dB). Esses valores, fornecidos pelo *gateway* e expostos pelo *ChirpStack*, foram extraídos pelos *scripts* de integração e registrados no *MySQL* junto a cada uplink. Quando uma mesma mensagem foi recebida por múltiplos *gateways*, considerou-se o registro com melhor SNR. As estatísticas foram sintetizadas por dispositivo (mediana e quartis) no período do conjunto operacional (D_{oper} , 22/09/2024–22/09/2025), oferecendo subsídios para diagnóstico de cobertura, sombreamento e eventuais interferências.

4.4.1.4 Total de Leituras Registradas

Este indicador quantificará o número total de mensagens *LoRaWAN* válidas, originadas dos hidrômetros selecionados, que forem recebidas e processadas em um intervalo temporal definido (diário, semanal). O valor será obtido por consulta ao banco *MySQL*, somando as leituras correspondentes ao período filtrado. Essa métrica ajudará a verificar a regularidade da comunicação e a identificar interrupções ou inconsistências na transmissão dos dados.

4.4.2 Métricas de Medição de Consumo

Este indicador contabilizou o número de mensagens *LoRaWAN* válidas originadas dos hidrômetros em janelas temporais definidas (diárias/semanais). A contagem foi obtida por consultas ao *MySQL*, após filtragem de duplicatas e mensagens inválidas, e sintetizada por dispositivo e de forma agregada. Ao longo do conjunto operacional (D_{oper} , 22/09/2024–22/09/2025), a métrica auxiliou na verificação da regularidade da comunicação e na identificação de interrupções ou inconsistências de transmissão.

4.4.2.1 Volume Acumulado

Representa o volume total de água registrado por cada hidrômetro monitorado pela AMI desde o início da coleta de dados ou de um marco temporal específico. A unidade de medida adotada é o metro cúbico (m^3), compatível com a resolução do sensor *Reed Switch* do hidrômetro *SAGATECH US-5.0*, em que cada pulso equivale a 1 l. O volume em metros cúbicos é obtido dividindo-se a contagem cumulativa de pulsos por 1 000. As mensagens *LoRaWAN* transmitem essa contagem, que é decodificada pelo servidor de rede e processada conforme descrito no planejamento de integração de dados. Este indicador constitui o dado primário de consumo da AMI e fundamenta as análises de padrões de uso, bem como a validação da acurácia do sistema em comparação com a medição manual. A partir dele, calculam-se indicadores em granularidades temporais diversas (por exemplo, consumo diário ou horário) durante a fase de análise de dados.

4.4.2.2 Consumo Diário

O consumo diário será calculado para cada hidrômetro monitorado pela AMI. Esta métrica quantificará o volume total de água consumido ao longo de um dia, período de 24 horas. O cálculo será efetuado, para cada dia, pela diferença entre o valor de volume acumulado registrado na última leitura válida daquele dia e o valor registrado na primeira leitura válida do mesmo dia. A apuração desta métrica pressupõe a existência de registros de leitura próximos aos limites do período diário. O propósito do cálculo do consumo diário será subsidiar a análise de padrões de uso em escala diária e o fornecimento de dados agregados para relatórios e visualizações.

4.4.3 Procedimento de validação comparativa AMI–AMM

O procedimento foi aplicado ao conjunto D_{val} , composto pela amostra de 11 hidrômetros acompanhados por 46 dias (de 28/04/2025 a 12/06/2025), nas janelas definidas no Protocolo (Seção 4.3.6).

A validação da acurácia do sistema foi realizada por comparação direta do **volume consumido em intervalos de tempo** definidos, conforme registrado pela Abordagem de Monitoramento IoT (AMI) e pela Abordagem de Medição Manual (AMM). A comparação intervalar foi adotada para mitigar desalinhamentos e *offsets* iniciais entre totalizadores acumulados, de modo a avaliar a capacidade de medição incremental do sistema AMI. O objetivo foi quantificar a **concordância** entre os volumes consumidos medidos por AMI e AMM no mesmo intervalo.

Durante o período experimental de 46 dias, com leituras manuais realizadas *duas vezes por semana*, executaram-se as seguintes etapas:

1. **Coleta e cálculo AMM (referência).** As leituras manuais dos totalizadores volumétricos foram registradas com o valor acumulado V_{AMM} e o carimbo temporal t . Para cada intervalo entre duas leituras consecutivas $(t_{\text{inicial}}, t_{\text{final}})$, o volume de referência consumido foi:

$$\Delta V_{\text{AMM}} = V_{\text{AMM}}(t_{\text{final}}) - V_{\text{AMM}}(t_{\text{inicial}}).$$

2. **Coleta e cálculo AMI.** O acumulado V_{AMI} foi registrado continuamente pelo sistema IoT. Para cada intervalo $(t_{\text{inicial}}, t_{\text{final}})$ definido pelas leituras AMM, determinou-se o volume

consumido por AMI pela diferença entre as leituras acumuladas correspondentes a esses *timestamps* (ou os registros mais próximos disponíveis no *MySQL*):

$$\Delta V_{AMI} = V_{AMI}(t_{\text{final}}) - V_{AMI}(t_{\text{inicial}}).$$

Como a telemetria AMI possui periodicidade horária, os instantes t_{inicial} e t_{final} da AMI corresponderam ao registro mais próximo aos horários das leituras AMM no banco de dados (sem interpolação). O desalinhamento residual é pequeno frente à duração das janelas analisadas.

A análise comparativa foi realizada por intervalo e por hidrômetro. O erro percentual relativo ($E_{\%}$) entre os volumes medidos por AMI e AMM foi calculado por:

$$E_{\%} = \frac{\Delta V_{AMI} - \Delta V_{AMM}}{\Delta V_{AMM}} \times 100.$$

Os erros percentuais relativos calculados para cada intervalo válido foram utilizados para avaliar a proximidade entre o volume medido automaticamente (AMI) e o volume registrado manualmente (AMM). Conforme estabelecido neste trabalho, a validação não teve como objetivo a certificação metrológica, mas a inferência prática da acurácia no contexto de monitoramento hídrico em operação. Janelas marcadas como inválidas por inconsistências ou manutenção foram excluídas, conforme a Seção 4.3.6.

4.4.3.1 Utilização de Dados Contextuais

Adicionalmente aos indicadores quantitativos de desempenho, consumo e acurácia, dados contextuais associados a cada hidrômetro foram empregados para enriquecer a análise e a interpretação dos resultados, especificamente:

- **Setor/Departamento de Instalação:** Esta informação, registrada para cada dispositivo, foi utilizada para agrupar resultados e possibilitar comparações de consumo e de desempenho operacional entre diferentes tipos de unidades consumidoras no campus. Também permitiu filtragem e segmentação de dados nos painéis de visualização e nos relatórios.
- **Geolocalização:** As coordenadas geográficas (latitude e longitude) de cada hidrômetro foram utilizadas para: (a) análise de possíveis correlações entre a localização física (por

exemplo, distância ao *gateway* e características topográficas do entorno) e os indicadores de qualidade do sinal *LoRaWAN* (RSSI/SNR); (b) apoio à localização em campo para atividades de manutenção e verificação.

A incorporação desses dados contextuais **contribuiu** para a compreensão do comportamento do sistema AMI e dos padrões de consumo hídrico no contexto da UFLA, subsidiando as análises de qualidade das séries e de aplicabilidade gerencial.

4.5 Integração dos Dados com o Banco de Dados *MySQL*

Embora o *ChirpStack* utilize *PostgreSQL* para dados operacionais, foi implementado um repositório analítico dedicado em *MySQL*. A integração entre o *ChirpStack* e o *MySQL* foi realizada por rotinas em *Python*. Adotou-se uma arquitetura com funcionalidades distintas para garantir a qualidade e a organização dos dados:

1. **Coleta e registro inicial.** Uma rotina consumiu os *payloads* decodificados disponibilizados pelo *ChirpStack*, preferencialmente por subscrição a tópicos *MQTT* (alternativamente, pela *API REST*). Esses dados, com metadados de recepção (por exemplo, *timestamp*), foram registrados em estrutura inicial no *MySQL*, servindo como *log* e base de auditoria.
2. **Processamento e validação primária.** Rotinas subsequentes interpretaram os registros, converteram pulsos em volume, trataram códigos de alarme e aplicaram regras básicas de validação (limites plausíveis de consumo, bateria, integridade temporal). Os dados válidos foram inseridos em tabelas estruturadas no *MySQL*, otimizadas para consultas de séries temporais e eventos.
3. **Sincronização de metadados.** Uma rotina periódica consultou a *API REST* do *ChirpStack* para sincronizar metadados relevantes (nome do dispositivo, localização, configurações) com tabelas de referência no *MySQL*.
4. **Validação de consistência.** Verificações adicionais analisaram a monotonicidade do acumulado e a coerência temporal das medições, sinalizando anomalias para investigação.

A Figura 4.15 ilustra o fluxo de dados implementado, desde a origem no *ChirpStack* até a persistência no *MySQL*.

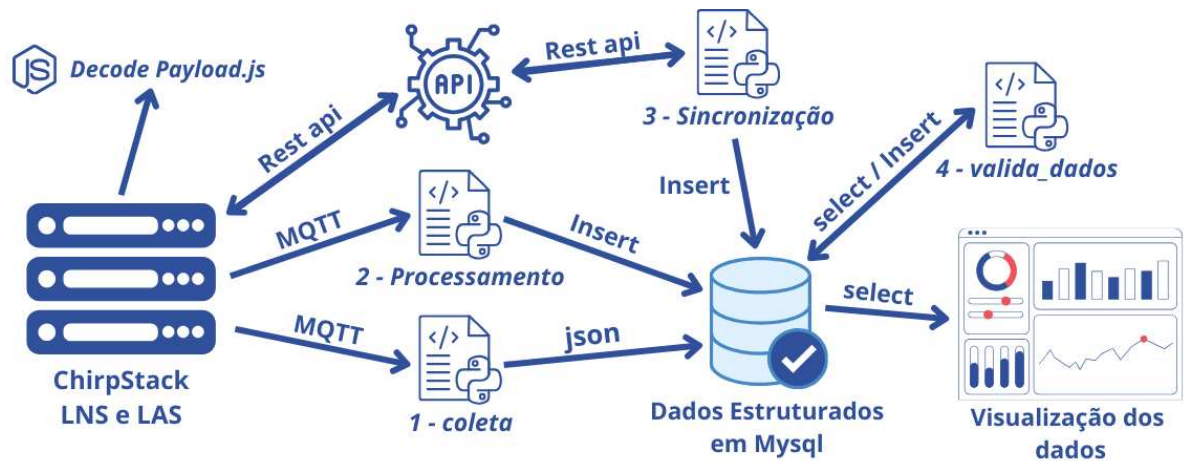


Figura 4.15 – Integração com *MySQL*.

Fonte: Elaboração própria.

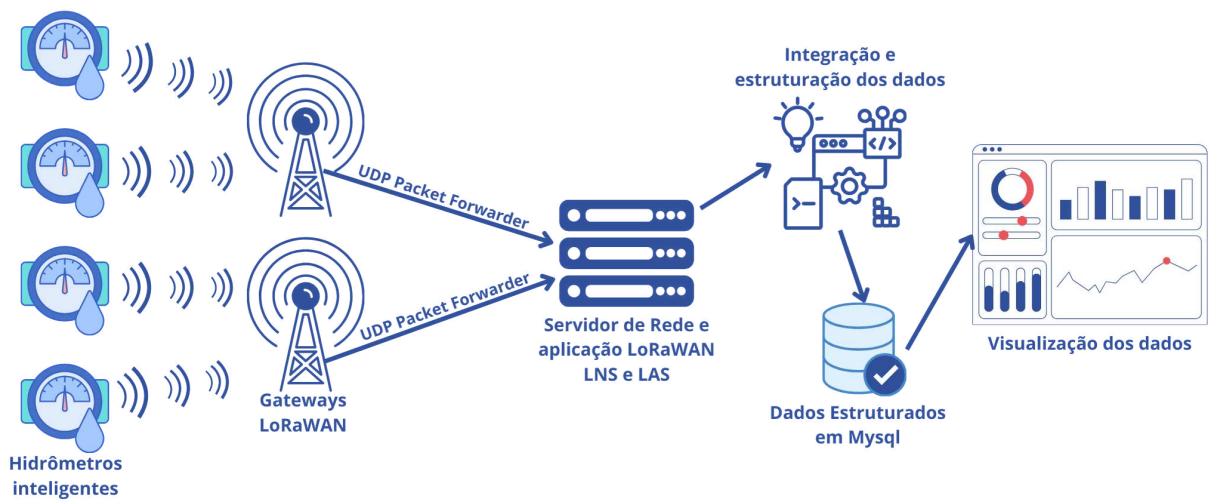
A adoção do *MySQL* justificou-se pela compatibilidade com sistemas institucionais da UFLA e pela integração com ferramentas de análise (*Metabase*, *Grafana*). A centralização dos dados em *MySQL*, alimentada por rotinas customizadas, possibilitou aplicar lógicas específicas de transformação, calcular métricas alinhadas a esta pesquisa e executar validações de forma independente de agregações da *API* do servidor de rede.

Os componentes acima compuseram a arquitetura *end-to-end* implantada e deram suporte às análises de qualidade das séries, acurácia e aplicabilidade gerencial apresentadas no capítulo de Resultados.

5 ARQUITETURA

Este capítulo descreve a arquitetura do sistema *IoT* implementado para monitoramento do consumo de água no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). O contexto institucional, que envolve múltiplas áreas com demandas hídricas específicas como por exemplo, laboratórios e espaços administrativos, demanda acompanhamento contínuo do consumo e identificação de vazamentos ou anomalias. A arquitetura adotada na UFLA abrange o fluxo de dados desde a aquisição nos hidrômetros até a visualização em *dashboards*, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Arquitetura Geral.



Fonte: Do Autor (2025).

A arquitetura organiza-se em cinco camadas principais, cada uma com funções específicas que, em conjunto, compõem o sistema de monitoramento. O Quadro 5.1 resume as funções e os componentes de cada camada, com as respectivas tecnologias.

As próximas seções detalharão cada uma das camadas da arquitetura.

5.1 Aquisição de dados

Esta camada representa a interface direta com o processo físico (o fluxo de água) e é responsável pela transdução da medição de volume em um formato digital e pela sua preparação para envio. A função é realizada pelos hidrômetros *SAGATECH US-5.0*, instalados em pontos de consumo selecionados no campus da UFLA. Estes operam pelo princípio velocimétrico unijato: o fluxo de água impulsiona um rotor interno. A rotação deste rotor é detectada por um

Quadro 5.1 – Resumo das camadas da arquitetura do sistema IoT.

Camada	Função principal	Componentes principais	Tecnologias utilizadas
1	Aquisição de dados	Hidrômetro <i>SAGATECH US-5.0</i>	<i>LoRaWAN</i> ; sensor <i>reed switch</i>
2	Transmissão de dados	<i>Gateway LoRaWAN</i>	<i>LoRaWAN</i> ; <i>UDP packet forwarder</i>
3	Servidor de rede e aplicação LoRa	<i>ChirpStack v4</i>	<i>Docker</i> ; <i>MQTT</i> ; <i>PostgreSQL</i> ; <i>Redis</i>
4	Integração com banco de dados	<i>Scripts</i> em <i>Python</i>	<i>MySQL</i> ; <i>MQTT</i>
5	Visualização dos dados	<i>Dashboard Grafana</i>	Indicadores de consumo

Fonte: Elaboração própria (2025).

sensor magnético do tipo *Reed Switch*, o qual converte o movimento mecânico em pulsos elétricos discretos. Conforme a especificação do dispositivo Sagatech (2025), cada pulso gerado corresponde a um volume fixo de 1 litro.

A contagem destes pulsos ao longo do tempo representa, portanto, o volume acumulado de água que passou pelo medidor. O próprio hidrômetro integra um módulo de comunicação *LoRaWAN* que periodicamente coleta essa contagem de pulsos, agrega informações de status do dispositivo (como nível de bateria e possíveis alarmes de fraude) e formata esses dados em um pacote binário (*payload*). Este pacote é então transmitido utilizando a modulação LoRa através de ondas de rádio na faixa de frequência de 915-928 MHz (especificamente, a sub-banda AU915 utilizada no Brasil). Estes sinais de rádio são o ponto de partida para a próxima camada da arquitetura.

A implantação considerou 182 hidrômetros previstos/instalados no escopo institucional do projeto no campus, definido pela disponibilidade orçamentária e pelo cronograma de execução; para as análises, utilizou-se o subconjunto com telemetria ativa e janela mínima de observação no período considerado (resultando em 166 dispositivos). A adoção do *LoRaWAN* foi motivada pelo compromisso entre alcance em ambiente de campus, baixo consumo energético dos dispositivos e viabilização da comunicação com infraestrutura própria (*gateways* e servidor sob gestão institucional), reduzindo a dependência de conectividade distribuída preexistente. Por segurança e organização do tráfego, os componentes do sistema foram segregados em uma *VLAN* dedicada, com controles de acesso. A periodicidade nominal de 60 minutos foi definida para suportar a detecção de anomalias e indícios de vazamento em horizonte intra-diário, man-

tendo equilíbrio com restrições de capacidade da rede e autonomia energética, diferentemente de leituras diárias típicas de faturamento.

5.2 Transmissão de dados

Esta camada estabelece a ponte entre os dispositivos de campo (hidrômetros) e a infraestrutura do servidor central, utilizando a tecnologia de rede de longo alcance e baixo consumo *LoRaWAN*. Os *gateways* modelo *Browan Outdoor Micro Gateway*, distribuídos pelo campus, atuam como receptores centrais nesta camada. Sua função primária é escutar continuamente as frequências *LoRaWAN* (na faixa AU915 definida para o Brasil) para capturar os pacotes de rádio transmitidos pelos múltiplos hidrômetros. Ao receber um pacote *LoRa* válido, o *gateway* anexa metadados sobre a recepção (como *RSSI* e *SNR*) ao pacote original.

Os dados então são encapsulados neste conjunto (pacote *LoRa* original + metadados) utilizando o protocolo *Semtech UDP Packet Forwarder* e o encaminha, através da infraestrutura de rede IP comutada do campus (utilizando *VLANs* e *switches* configurados), para o componente *ChirpStack Gateway Bridge* (detalhado na próxima camada), o que completa a transmissão dos dados do ambiente físico para o ambiente de processamento centralizado. O *gateway*, portanto, opera de forma transparente em relação ao conteúdo dos dados (que permanecem criptografados), focando na retransmissão eficiente dos pacotes da interface de rádio para a interface de rede *IP*.

5.3 Rede

Esta camada constitui o núcleo de gerenciamento e processamento da rede *LoRaWAN*, implementada através do servidor de rede *open-source ChirpStack v4*. Conforme detalhado na metodologia, sua execução ocorre em ambiente de *containers Docker* para flexibilidade e isolamento. Funcionalmente, o *ChirpStack* agrega os papéis de *LoRaWAN Network Server* (LNS) e *LoRaWAN Application Server* (LAS).

Como LNS, ele recebe os pacotes de dados encaminhados pelos *gateways* (via componente *Gateway Bridge*), realiza a deduplicação de mensagens recebidas por múltiplos *gateways*, valida a integridade e autenticidade das mensagens (verificando chaves de sessão e contadores de quadros) e gerencia o estado da rede (e.g., alocação de canais, taxa de dados adaptativa).

Como LAS, o *ChirpStack* gerencia os perfis dos dispositivos cadastrados e das aplicações. Ele invoca a função de decodificação (*payload codec*) configurada para cada tipo de dispositivo, extraíndo assim os dados úteis enviados pelos hidrômetros (contagem de pulsos, nível de bateria, alarmes) a partir do *payload* binário. Finalmente, o LAS é responsável por apresentar dados em seu ambiente *web* e expor esses dados decodificados para sistemas externos, o que neste projeto ocorre principalmente através da publicação dos dados em tópicos *MQTT* específicos por dispositivo, permitindo a integração com a camada seguinte. Para suas operações internas, a plataforma utiliza *PostgreSQL* (armazenamento persistente de configurações), *Redis* (cache) e *MQTT* (comunicação interna via *Mosquitto*). Esta camada, portanto, atua como o ponto central de controle da rede *LoRaWAN* e da aplicação, fazendo a interligação entre a comunicação de rádio e a lógica de integração de dados.

5.4 Integração com Banco de Dados

Atuando como um intermediador entre o servidor de rede (Camada 3) e o armazenamento final para análise (Camada 5), esta quarta camada será responsável por executar o processamento complementar e garantir a persistência estruturada dos dados de monitoramento. Esta função será implementada por meio de rotinas de software customizadas, desenvolvidas em *Python*. Estes scripts terão a função de consumir os dados decodificados disponibilizados pelo *ChirpStack* (seja via interface *MQTT* ou API REST), aplicar transformações e validações necessárias, estruturação dos dados para o formato relacional e, por fim, inserir ou atualizar as informações tratadas no banco de dados *MySQL*. Dessa forma, esta camada preparará o conjunto de dados para consulta eficiente e utilização pela plataforma de visualização na camada seguinte. O desenvolvimento e teste destas rotinas constituem uma etapa planejada/em andamento do projeto.

5.5 Visualização dos dados

Esta camada final da arquitetura corresponderá à interface através da qual será possível interagir com os dados coletados e processados pelo sistema AMI. Conforme planejado na metodologia, esta interface será implementada utilizando a plataforma *open-source Grafana*, a qual será configurada para consultar diretamente o banco de dados *MySQL* (Camada 4). O

desenvolvimento nesta camada envolverá a criação de múltiplos painéis (*dashboards*) interativos, especificamente projetados para apresentar as informações relevantes de forma clara e funcional. Prevê-se a criação de painéis dedicados ao:

- Monitoramento operacional, exibindo status de comunicação, nível de bateria e indicadores de sinal;
- Análise de consumo hídrico, com volumes acumulados, perfis diários e comparação setorial;
- Painel de validação comparativa AMI vs AMM, apresentando resultados de precisão e conformidade metrológica.

Estes painéis utilizarão diversos recursos visuais do *Grafana* (gráficos de série temporal, *gauges*, tabelas, mapas) para transformar os dados armazenados em dados visuais práticos, auxiliando na identificação de tendências, na detecção de anomalias (como consumos elevados fora de padrão ou possíveis vazamentos) e no fornecimento de subsídios para a gestão hídrica no campus.

6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos após a implantação do sistema. Inicialmente, reúnem-se as evidências de implantação da arquitetura (OE1). Em seguida, avaliam-se a qualidade das séries de consumo (OE2), a acurácia por comparação AMI–AMM (OE3) e estudos de aplicabilidade gerencial com detecção de anomalias (OE4). As análises seguem o protocolo definido na Seção 4.3.6.

6.1 Evidências de implantação (OE1)

A arquitetura descrita no Cap. 5 foi implantada no campus da UFLA, com operação contínua durante o período do conjunto operacional (D_{oper} , 22/09/2024–22/09/2025), a instalação física dos hidrômetros e do *gateway* foi detalhada no Cap. 4 (Fig. 4.6 e Fig. 4.9) Nesta seção, reúnem-se evidências documentais e operacionais que atestam o estado do sistema: inventário de dispositivos e *gateway*, registros no servidor LoRaWAN (*ChirpStack*) e painéis de visualização (*Grafana*).

6.1.1 Inventário e estado operacional

A Tabela 6.1 sintetiza o estado da rede no período D_{oper} .

Tabela 6.1 – Inventário e estado operacional no período D_{oper} .

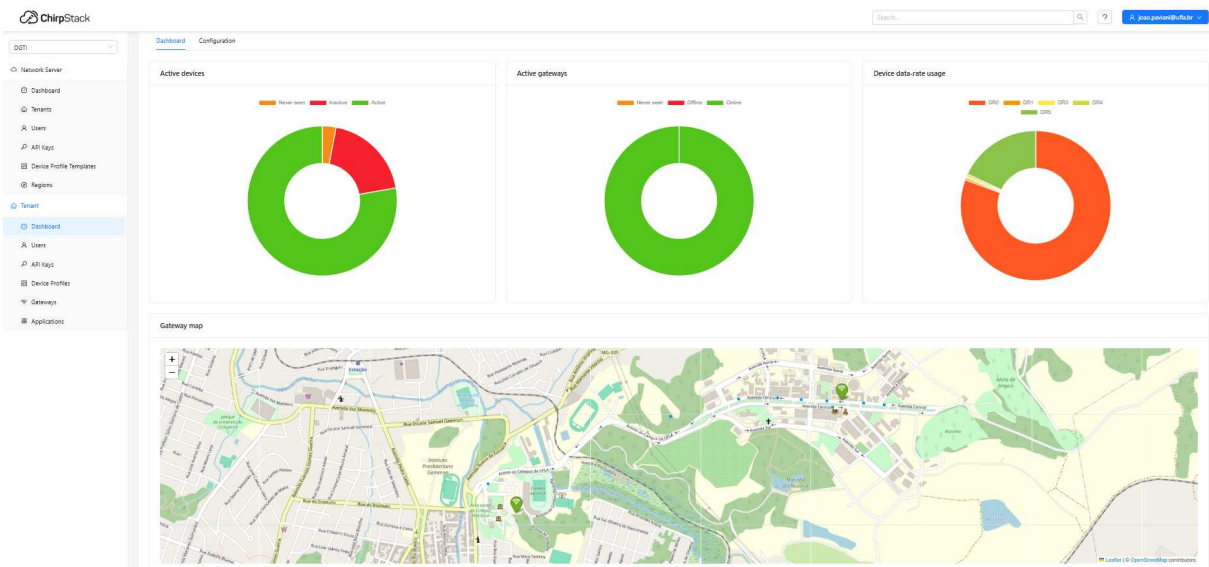
Hidrômetros instalados	182
Hidrômetros ativos	166
<i>Gateway</i> Browan em operação	Sim
Versão do <i>ChirpStack</i>	v4
Periodicidade nominal (T_n)	60 min
Início de operação (D_{oper})	22/09/2024
Fim de operação (D_{oper})	22/09/2025

Fonte: Elaboração própria.

6.1.2 Registro no servidor LoRaWAN (*ChirpStack*)

A Figura 6.1 apresenta o *dashboard* do *ChirpStack* com os estados dos dispositivos (ativos/inativos/nunca vistos), o estado dos *gateways* (online/offline), a distribuição de *data-rate* (DR) em uso e o mapa de *gateways*. Este instantâneo documenta a operação do sistema no período do conjunto operacional (D_{oper}) e serve como evidência do atendimento ao OE1.

Figura 6.1 – Dashboard do *ChirpStack* com estados de dispositivos, *gateways* e distribuição de DR.



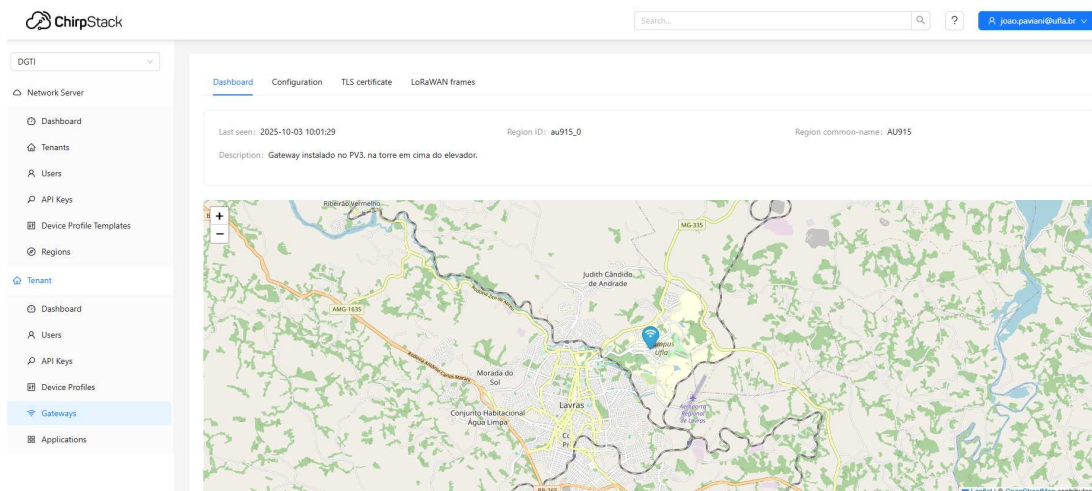
Fonte: Do Autor, 2025

O *gateway* Browan permaneceu registrado e online no período D_{oper} . A Figura 6.2 documenta identificação e geolocalização; a Figura 6.3 apresenta estatísticas operacionais extraídas do *ChirpStack* — contadores de pacotes recebidos/transmitidos, ocupação de frequências e distribuição de *data-rate* (DR), além do status dos *downlinks*.

Observou-se estabilidade temporal nos contadores de *uplinks* (“Received”) e *downlinks* (“Transmitted”). A recepção distribuiu-se no plano AU915 entre aproximadamente 915,2 e 916,8 MHz, enquanto as transmissões de *downlink* se concentraram entre 923,3 e 927,5 MHz, em conformidade com a faixa prevista para AU915. A distribuição de *data-rate* nos *uplinks* foi majoritariamente composta por DR0–DR2, com ocorrência menor de DR3–DR5, compatível com operação com ADR habilitado e a distância relativa ao *gateway*; nos *downlinks*, observaram-se DR8–DR13. Os *status* de transmissão apresentaram predominância de eventos “OK”, com registros residuais de “TOO_EARLY”, “TOO_LATE” e colisões, sem degradação mensurável de PDR ou disponibilidade no período analisado. Esse comportamento é

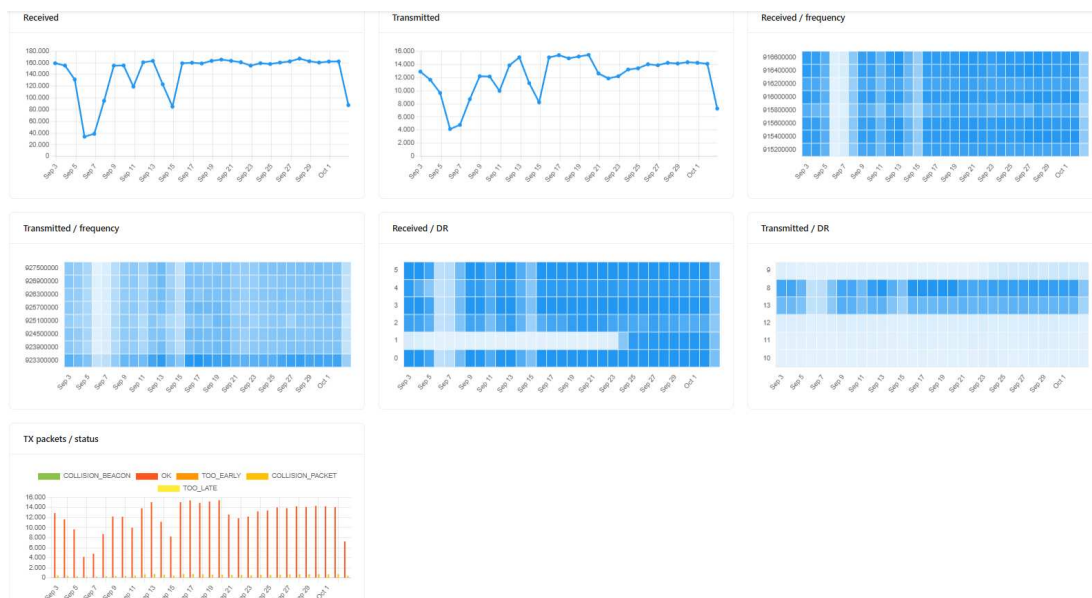
coerente com o mecanismo de acesso aleatório do LoRaWAN Classe A, baseado em *ALOHA*, no qual colisões ocasionais são inerentes ao meio e esperadas quando múltiplos nós ocupam simultaneamente o mesmo canal e SF. Ademais, a logística de *downlink* obedece às janelas RX1/RX2 imediatamente após cada *uplink*; agendamentos fora dessas janelas resultam em estados “TOO_EARLY” ou “TOO_LATE”, conforme a especificação e a documentação do *ChirpStack* (LoRa Alliance, 2018; Chinchilla-Romero *et al.*, 2021).

Figura 6.2 – *Gateway Browan* — cadastro, status e geolocalização no *ChirpStack*.



Fonte: Do Autor, 2025

Figura 6.3 – *Gateway Browan* — estatísticas operacionais (contadores RX/TX e distribuição de *data-rate*).

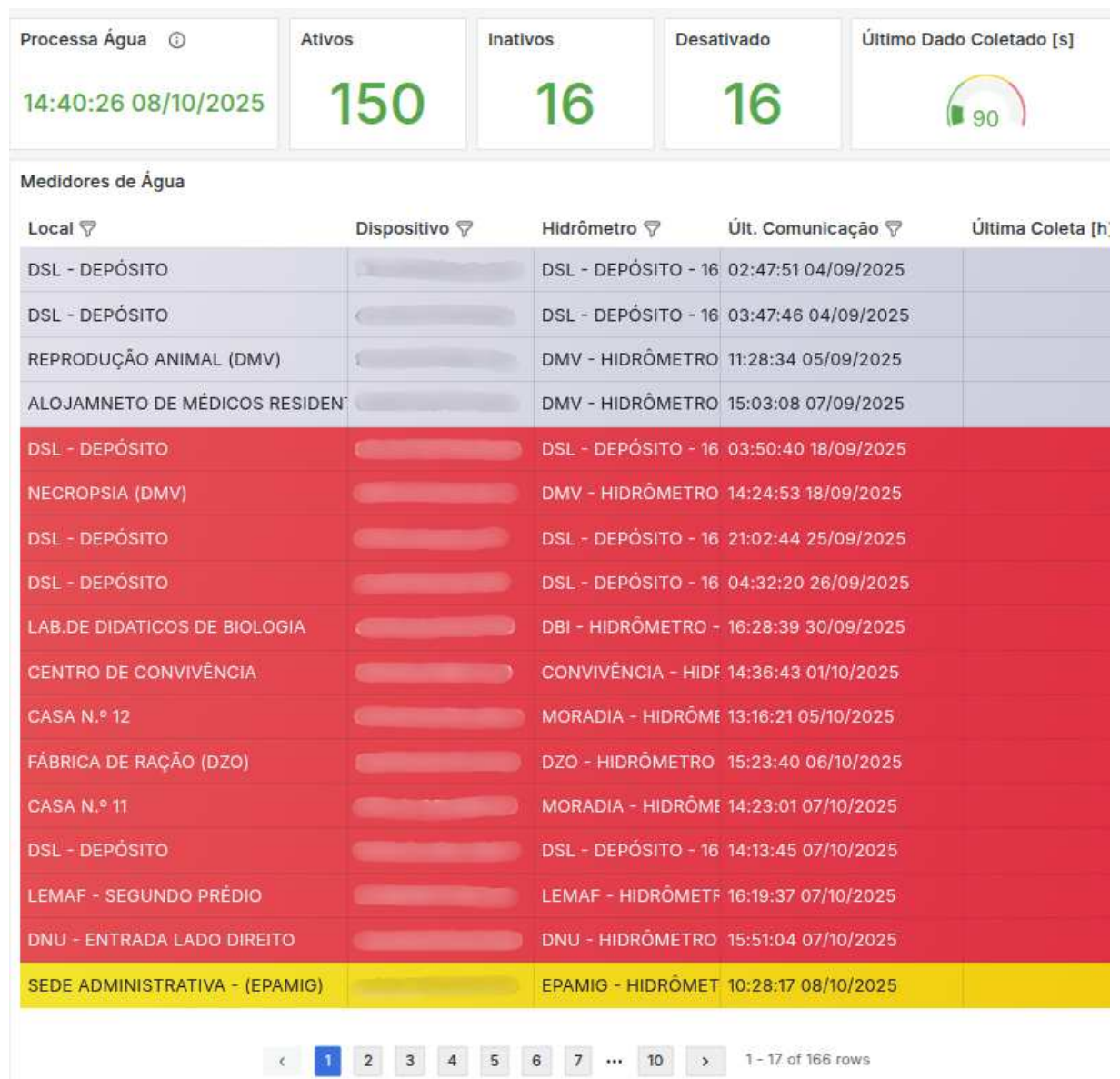


Fonte: Do Autor, 2025

6.1.3 Painéis de visualização (Grafana)

O *dashboard* geral integrou os dados do *MySQL* e apresentou cartões de estado (ativos, inativos e desativados), um indicador de recência da última coleta e a listagem dos hidrômetros com ordenação por tempo desde a última comunicação (Fig. 6.4). A classificação de estado baseou-se em limiares de recência aplicados à diferença, em horas, entre o instante de referência e o último *uplink* (coluna “Última Coleta [h]”): *Ativo* (≤ 3 h), *Atenção* (3–8 h), *Inativo* (> 8 h) e *Desativado* (≥ 720 h). Esses limiares foram definidos com finalidade operacional e reproduzem o indicador de disponibilidade por recência (Sec. 4.4).

Figura 6.4 – *Grafana* — painel geral com cartões de estado e listagem por recência.

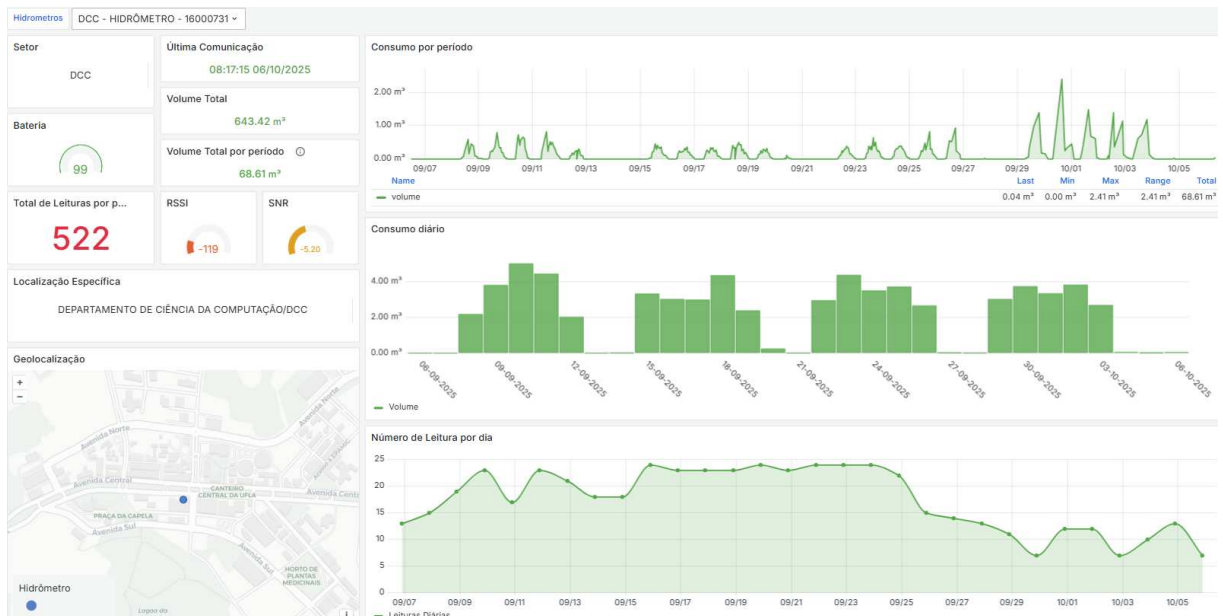


Fonte: Do Autor, 2025

6.1.4 Painel por dispositivo (*Grafana*)

A Figura 6.5 apresenta o painel individual de um hidrômetro, integrando metadados operacionais e séries temporais em uma janela de 30 dias. O quadro informativo à esquerda reúne setor, instante da última comunicação, nível de bateria, total de mensagens no recorte, indicadores de enlace (RSSI/SNR), identificação/localização específica e georreferenciamento, permitindo verificar recência, integridade do dispositivo e posicionamento em campo. À direita, as visualizações de consumo mostram o comportamento do ponto no período: a curva de consumo por período evidencia a variação intradiária; o agregado diário em barras resume volumes por dia; e a série “leituras por dia” explicita a regularidade da telemetria frente à periodicidade nominal ($T_n = 60$ min). No instantâneo exibido, a recência é compatível com operação contínua, a contagem diária aproxima-se da cadência horária esperada e os valores de RSSI/SNR situam-se em faixa típica do enlace com o *gateway*. Esse painel sustentou as análises de completude e regularidade das séries (OE2) e a inspeção visual de padrões e episódios de maior consumo (OE4).

Figura 6.5 – *Grafana* — painel por dispositivo: indicadores operacionais, series e contagem de leituras

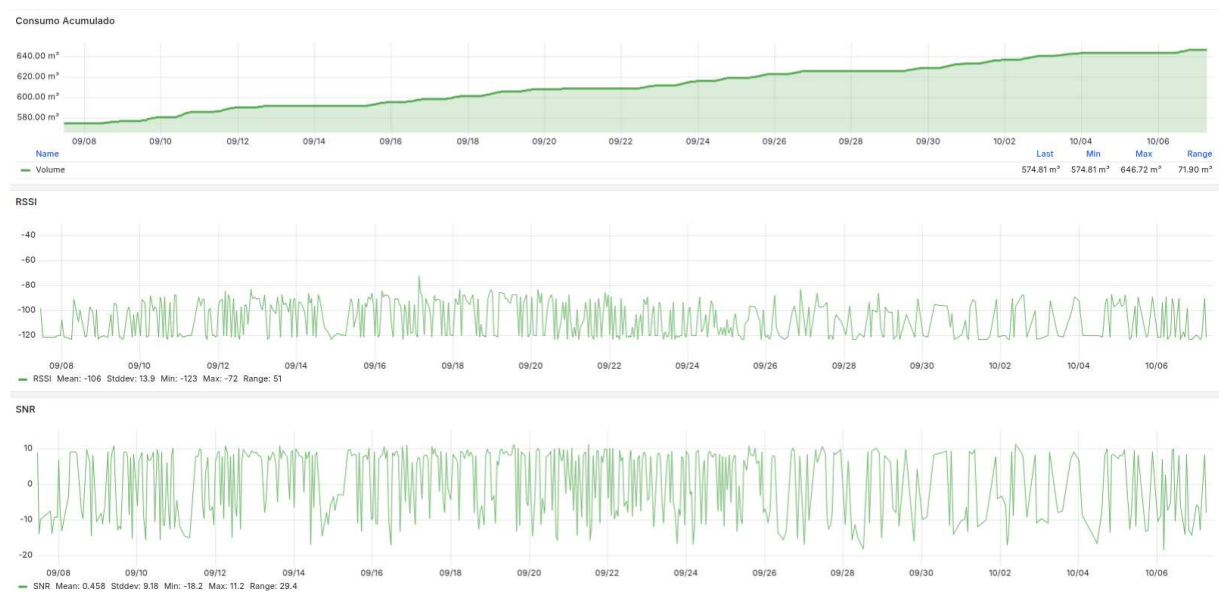


Fonte: Do Autor, 2025

Complementarmente, um recorte do mesmo painel em janela de 30 dias, evidenciado na figura 6.6 destaca o consumo acumulado e os indicadores de enlace (RSSI e SNR). A curva acumulada evidencia os incrementos de volume ao longo do período, enquanto as séries de RSSI

e SNR tornam explícita a variabilidade intradiária do enlace com o *gateway*. As estatísticas sumarizadas apresentadas pelo *dashboard* (média, desvio padrão, mínimo e máximo) auxiliam o diagnóstico de cobertura e a verificação de operação contínua. No exemplo exibido, as séries não apresentam descontinuidades e os níveis de sinal situam-se na faixa esperada para o ponto analisado, em consonância com a regularidade de leituras observada no painel geral.

Figura 6.6 – *Grafana* — recorte do painel por dispositivo com consumo acumulado e indicadores de enlace

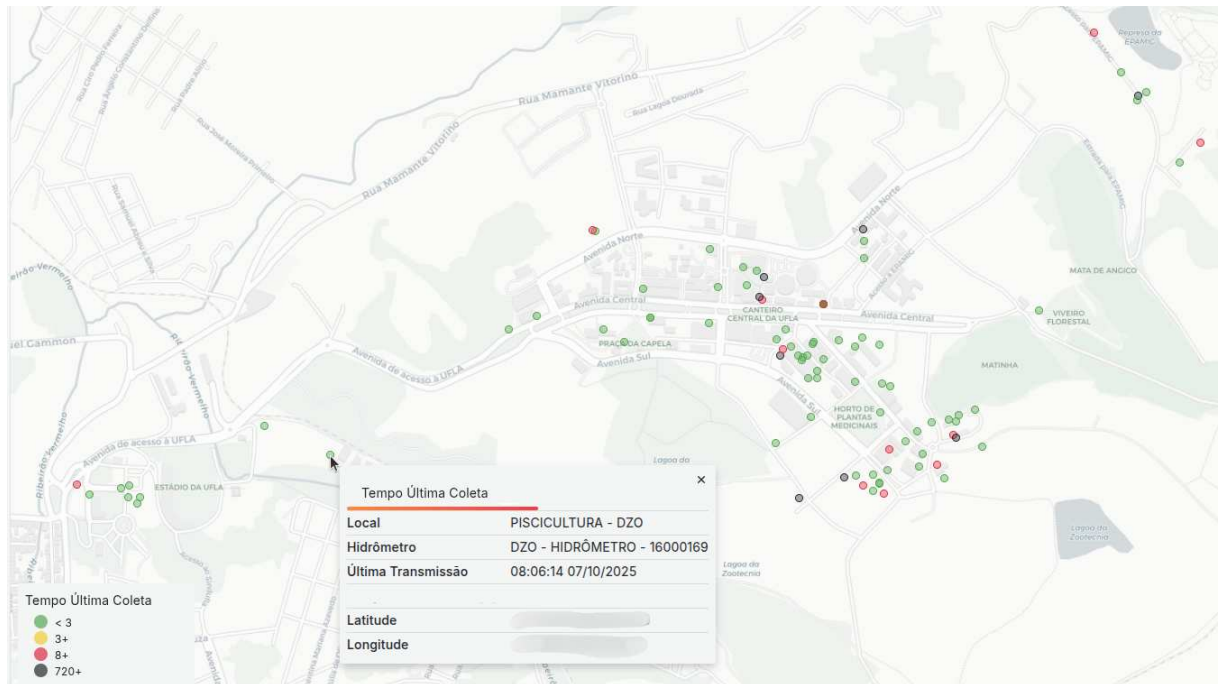


Fonte: Do Autor, 2025

6.1.5 Georreferenciamento dos pontos (*Grafana*)

A Figura 6.7 apresenta o mapa dos hidrômetros instrumentados no campus com codificação por recência da última comunicação, replicando os limiares operacionais definidos nas métricas: verde (≤ 3 h), amarelo (3–8 h), vermelho (> 8 h) e cinza (sem comunicação / ≥ 720 h). Os *tooltips* exibem informações essenciais para diagnóstico — setor/local, identificação do hidrômetro, *timestamp* da última transmissão e coordenadas geográficas permitindo relacionar estados operacionais a fatores locais (barreiras físicas, distância relativa ao *gateway*). Observa-se predominância de pontos ativos, com ocorrências pontuais de inatividade e de ausência prolongada de comunicação, coerentes com o inventário e os painéis gerais. Este painel encerra as evidências de implantação ao demonstrar a integração *end-to-end* até a visualização espacial, que será utilizada nas análises subsequentes.

Figura 6.7 – *Grafana* — mapa dos hidrômetros com codificação por recência da última comunicação



Fonte: Do Autor, 2025

Salvo indicação em contrário, os painéis desta subseção foram exibidos em janela de 30 dias por legibilidade; o período completo D_{oper} (22/09/2024–22/09/2025) é utilizado nas análises agregadas apresentadas subseções posteriores.

6.2 Qualidade das séries de consumo (OE2)

Esta seção avalia a qualidade dos dados gerados pela AMI no período D_{oper} (22/09/2024–22/09/2025) a partir de três eixos complementares. O primeiro eixo corresponde à completude, definida como a proporção de mensagens recebidas frente ao esperado dado o período efetivo de operação de cada dispositivo e a periodicidade nominal ($T_n = 60 \text{ min}$). O segundo eixo refere-se à regularidade do intervalo, medida pela distribuição dos tempos entre mensagens sucessivas. O terceiro eixo trata da consistência interna, verificada por incrementos não negativos no acumulado volumétrico. Os resultados são apresentados em nível de campus e por dispositivo.

6.2.1 Completude

A completude da telemetria foi utilizada como indicador de resiliência e viabilidade operacional da AMI em ambiente produtivo. A análise considerou o campus da UFLA, com obstáculos físicos à propagação de RF e registros de indisponibilidade pontual do *gateway*. A métrica foi definida como a razão entre mensagens observadas e esperadas na janela efetiva de operação de cada dispositivo, assumindo periodicidade nominal $T_n = 60$ min. Foram incluídos apenas dados validados e deduplicados e restringiu-se a amostra aos dispositivos com pelo menos sete dias de operação contínua, totalizando 166 pontos.

Os resultados evidenciam continuidade de coleta suficiente para as análises subsequentes. A mediana de completude foi 83,68%, com $Q1-Q3 = 78,55\%-89,01\%$, indicando que o dispositivo típico manteve séries com densidade temporal adequada. Observou-se ainda um subconjunto de 22,9% dos hidrômetros com completude $\geq 90\%$, o que caracteriza zonas de cobertura particularmente favoráveis. A completude global ponderada foi 78,54%, valor inferior à mediana por refletir eventos sistêmicos (p.ex., indisponibilidade do *gateway*) que afetam simultaneamente vários dispositivos; a métrica captura, portanto, o efeito de ocorrência real de campo sem comprometer a interpretação do desempenho típico.

Tabela 6.2 – Completude da telemetria no período D_{oper} (22/09/2024–22/09/2025).

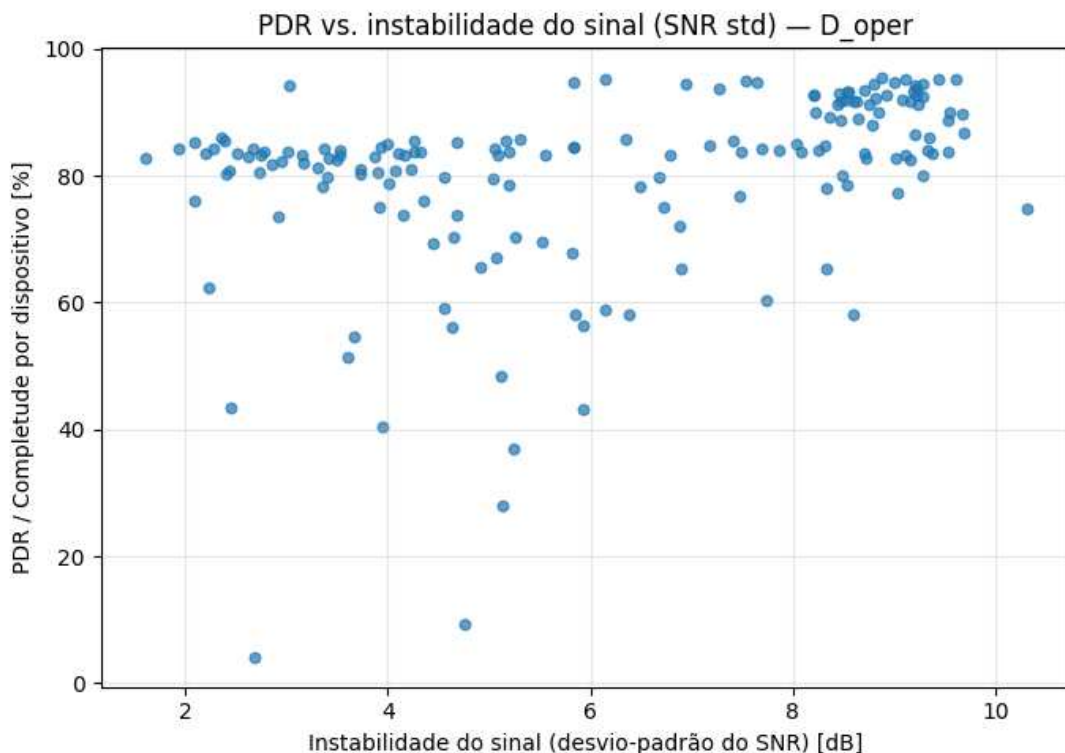
Dispositivos analisados (janela ≥ 7 dias)	166
Completude global ponderada (%)	78,54
Mediana por dispositivo (%)	83,68
Quartis (Q1–Q3) (%)	78,55 – 89,01
Fração com completude $\geq 90\%$ (%)	22,9
Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.	

O número de dispositivos analisados (166) coincide com o inventário operacional (182 instalados, dos quais 16 sem comunicação prolongada no período), confirmando a validade do conjunto ativo ($182 - 16 = 166$). A subseção seguinte examina a *regularidade dos intervalos* para avaliar se as perdas se distribuem ao longo do tempo ou se se concentram em janelas específicas.

6.2.2 Análise da Qualidade da Rede *LoRaWAN*

Para verificar de forma exploratória se variações no enlace de rádio impactaram a entrega de mensagens, analisou-se a relação entre a completude por dispositivo e a estabilidade do sinal recebido. A completude, aqui referida como *Packet Delivery Rate* (PDR), representa a proporção de mensagens observadas em relação às esperadas no período efetivo de operação de cada dispositivo. A estabilidade do sinal foi medida pelo desvio-padrão do *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) para cada dispositivo, calculado ao longo do período D_{oper} . Valores menores de desvio-padrão indicam um sinal mais consistente ao longo do tempo.

Figura 6.8 – Relação entre completude (PDR) e instabilidade do sinal (desvio-padrão do SNR) por dispositivo no período D_{oper} .



Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria (*ChirpStack/MySQL*).

A Figura 6.8 apresenta um diagrama de dispersão onde cada ponto corresponde a um hidrômetro. O eixo horizontal (x) representa o desvio-padrão do SNR (em dB), indicando a instabilidade do sinal: valores maiores significam maior variação. O eixo vertical (y) representa o PDR (em %), indicando a taxa de sucesso na entrega de mensagens: valores maiores significam maior confiabilidade.

Nota-se ainda que parte dos hidrômetros com menor PDR se concentra em uma faixa intermediária de instabilidade do SNR (aprox. 4–5 dB), compatível com condições de sombreamento/obstrução (NLOS) no ambiente do campus (edificações, vegetação e relevo), o que reduz a estabilidade do enlace e aumenta a probabilidade de perdas de pacotes.

Observou-se um agrupamento predominante de dispositivos com PDR elevado, situando-se aproximadamente entre 80% e 95%, mesmo com variações moderadas de SNR, tipicamente entre 2 e 10 dB. Isso sugere que a rede LoRaWAN operou com boa capacidade de entrega para a maioria dos pontos no campus. Casos isolados com PDR reduzido aparecem como pontos deslocados no gráfico. Esses pontos tendem a estar associados a condições de enlace desfavoráveis, como um SNR médio muito baixo, indicativo de cobertura marginal ou obstruções significativas, ou uma instabilidade acentuada do canal, refletida em um desvio-padrão de SNR elevado. Essas hipóteses são compatíveis com efeitos de propagação do sinal de rádio no ambiente físico do campus. Embora esta análise não estabeleça uma relação causal definitiva, ela é suficiente para orientar uma triagem de campo, direcionando a verificação de antenas, posicionamento e possíveis obstáculos próximos aos dispositivos com pior desempenho, sem adicionar complexidade excessiva ao estudo.

6.2.3 Regularidade do intervalo (OE2)

A regularidade foi mensurada a partir do intervalo temporal entre mensagens consecutivas (Δt) de cada hidrômetro, calculado com base no carimbo de tempo do servidor. Adotou-se a periodicidade nominal $T_n = 60$ min e um corredor de referência de 45–75 min. A análise considerou apenas dispositivos ativos, registros validados e séries deduplicadas, no período D_{oper} .

No agregado do campus, a distribuição de Δt apresentou mediana de 60,0 min e P90 de 60,0 min, com 89,9% dos intervalos dentro do corredor 45–75 min (total de 991 287 intervalos analisados). Por dispositivo, observou-se mediana das medianas de 60,0 min, mediana dos P90 de 60,0 min e mediana da fração no corredor de 91,0%, indicando aderência ao T_n com variações limitadas.

A distribuição concentra-se em 60 min, com pico pronunciado em T_n e baixa dispersão no entorno, o que é consistente com a operação nominal do agendamento. Observam-se ainda ocorrências discretas em múltiplos de T_n (120, 180 e 240 min), padrão compatível com perdas pontuais de uma ou mais transmissões seguidas de retomada no ciclo seguinte. O alinhamento

Tabela 6.3 – Regularidade dos intervalos no período D_{oper} .

Agregado do campus	
Mediana do intervalo (min)	60,0
P90 do intervalo (min)	60,0
Fração no corredor 45–75 min (%)	89,9
Intervalos analisados	991 287
Por dispositivo (medianas)	
Mediana das medianas (min)	60,0
Mediana dos P90 (min)	60,0
Mediana da fração 45–75 min por disp. (%)	91,0

Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.

desses eventos exatamente em $k \cdot T_n$ indica ausência de deriva sistemática de relógio: quando a comunicação é restabelecida, a cadência retorna ao passo de 60 min. Esse comportamento corrobora os resultados de completude (Tabela 6.2), nos quais a eficiência agregada ficou abaixo de 100% por lacunas episódicas de recepção, e não por alteração persistente do intervalo de amostragem.

Do ponto de vista operacional, tais lacunas podem decorrer de variações momentâneas de propagação e sombreamento do enlace rádio, restrições de *duty cycle* e da classe de operação LoRaWAN Classe A (em que a transmissão ocorre de forma assíncrona e não há retransmissão imediata fora das janelas RX1/RX2), congestionamentos pontuais de *downlinks* ou colisões em canais compartilhados, e reinicializações ou interrupções de energia no *gateway* ou no dispositivo. Em todos esses casos, a perda de um ou poucos ciclos produz intervalos observados próximos a $2 \cdot T_n$, $3 \cdot T_n$ ou $4 \cdot T_n$, sem afetar a cadência subsequente.

As métricas de regularidade indicam que a AMI mantém cadência estável e fornece séries adequadas tanto para a validação metrológica (OE3) quanto para a detecção de anomalias (OE4). Na prática, os dados podem ser reamostrados em grade horária $T_n = 60$ min, tratando ausências como faltantes (*sem imputação*) nas análises de acurácia e aplicando regras específicas de identificação de janelas perdidas nos estudos de anomalias. A Figura 6.9 ilustra a distribuição de Δt e destaca a concentração em T_n com caudas em múltiplos desse valor.

Figura 6.9 – Distribuição dos intervalos entre mensagens.



Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.

A Figura 6.9 apresenta a regularidade dos intervalos de chegada das mensagens. Observa-se forte concentração na periodicidade nominal de 60 minutos, confirmando a estabilidade do sistema. Os agrupamentos secundários em múltiplos de 60 minutos (120, 180 e 240 min) indicam lacunas de recepção (mensagens intermediárias não registradas), e não aumento de latência, comportamento compatível com perdas pontuais em enlaces LoRaWAN Classe A, especialmente quando se utilizam uplinks não confirmados (sem ACK/retransmissão automática), afetando a métrica de completude (PDR).

6.2.4 Consistência interna das séries (OE2)

A consistência interna foi avaliada a partir da monotonicidade do totalizador acumulado. Para cada hidrômetro, as leituras foram ordenadas por carimbo de tempo e calculou-se o incremento ΔV entre mensagens consecutivas (1 pulso = 1 L). A análise considerou a fração de incrementos negativos ($\Delta V < 0$, indicativos de reinicialização do contador ou erro), o número de eventos de *reset* (blocos consecutivos com $\Delta V < 0$ seguidos de retomada positiva), a fração

de incrementos nulos ($\Delta V = 0$) e os percentis P50, P90 e P99 de ΔV . Em condições normais de operação, espera-se $\Delta V \geq 0$, sendo $\Delta V = 0$ comum em períodos sem consumo.

A Tabela 6.4 sintetiza os resultados no período D_{oper} . Observou-se 0,00% de incrementos negativos no agregado do campus e mediana de 0 eventos de *reset* por dispositivo, evidenciando operação estável do totalizador e integridade do fluxo de processamento. A mediana de consumo por passo (P50) foi 0,00 L e a mediana, por dispositivo, da fração de $\Delta V = 0$ foi 78,71%, comportamento compatível com longos períodos de baixa atividade (noite, fins de semana, feriados). A distribuição dos incrementos fornece referência estatística para detecção de anomalias (OE4): P90 = 84,00 L e P99 = 631,00 L caracterizam passos horários atípicos em subsetores com picos de demanda.

Tabela 6.4 – Consistência interna das séries no período D_{oper} .

Dispositivos analisados	166
Fração de $\Delta V < 0$ no campus (%)	0,00
Mediana (por disp.) da fração $\Delta V = 0$ (%)	78,71
Mediana dos eventos de <i>reset</i> por disp.	0
P50 / P90 / P99 de ΔV (L) no campus	0,00 / 84,00 / 631,00

Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.

Nota: Os incrementos ΔV referem-se aos volumes entre mensagens consecutivas, sem normalização pela duração do passo. Dada a alta regularidade observada ($T_n \approx 60$ min), o efeito de passos mais longos é residual e aparece nas caudas superiores da distribuição (P99).

6.3 Validação da acurácia do sistema (OE3)

A acurácia do sistema AMI foi quantificada no conjunto D_{val} por meio de comparação intervalar com a medição manual de referência (AMM), ao longo de sete semanas, entre 28/04/2025 e 12/06/2025, em 11 pontos instrumentados. Para cada hidrômetro e para cada par de leituras manuais consecutivas $[t_0, t_1]$, calcularam-se os incrementos de volume ΔV em AMM e AMI (Seções 4.3.6 e 4.4.3). No AMI, os totalizadores foram avaliados nos carimbos de tempo *mais próximos* de t_0 e t_1 , sem interpolação, em consonância com a periodicidade nominal do sistema ($T_n = 60$ min).

Tabela 6.5 – Comparativo de consumo entre medição manual (AMM) e medição inteligente (AMI).

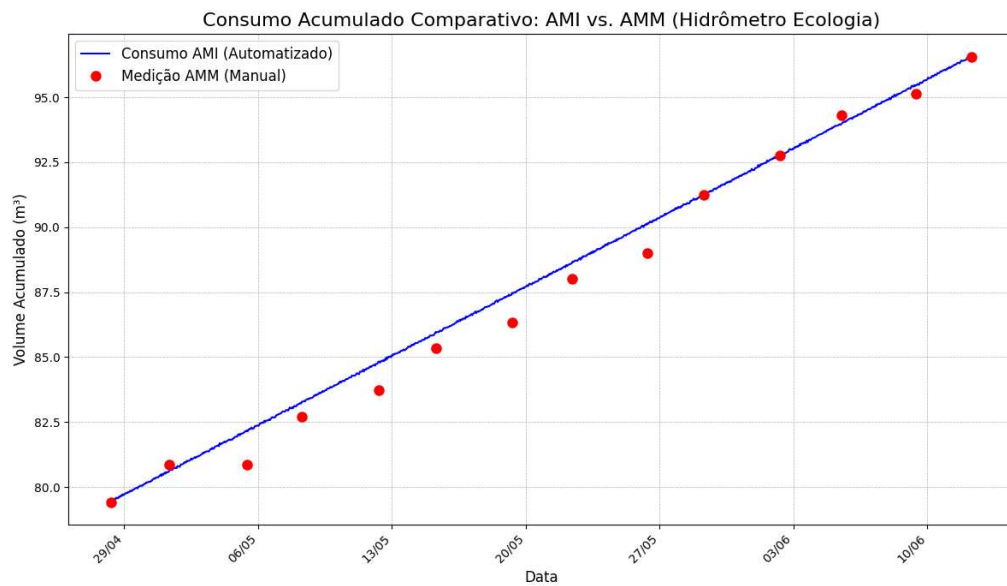
ID do hidrômetro	Consumo AMM (m ³)	Consumo AMI (m ³)	Erro relativo (%)
ECO - 16000815	11,78	11,77	-0,085
ADM - 16000741	65,41	65,71	0,459
REITORIA - 16000963	19,18	19,24	0,313
DAE - 16000849	7,08	7,06	-0,282
DCC - 16000731	50,73	50,51	-0,434
DQI - 16000805	7,94	7,96	0,252
DNU - 16000919	26,83	26,79	-0,149
BIBLIOTECA - 16000799	173,74	173,75	0,006
DCA - 16000858	38,19	38,13	-0,157
PV8 - 16000959	8,97	9,01	0,446
PV9 - 16000902	55,33	55,31	-0,036

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados coletados.

A análise dos dados evidencia concordância elevada entre os dois métodos de medição. Os erros relativos observados situaram-se no intervalo de -0,434% para o hidrômetro do DCC a +0,459% para o hidrômetro da ADM, mantendo-se consistentemente reduzidos mesmo considerando a assincronia temporal inerente entre o momento da leitura manual e o registro horário do sistema AMI. Todos os erros identificados permaneceram abaixo dos limites de $\pm 2\%$ estabelecidos pelo Regulamento Técnico Metrológico do INMETRO para hidrômetros em operação, conferindo confiabilidade aos dados produzidos pelo sistema IoT (INMETRO, Portaria, 2021). A precisão do sistema manteve-se estável em diferentes volumes de consumo, desde setores de baixa utilização (7,08 m³ no DAE) até aqueles de elevado consumo (173,74 m³ na Biblioteca). Esta consistência valida a eficácia do método de medição por pulsos em distintos perfis de utilização, demonstrando a capacidade do sistema de fornecer medições precisas independentemente da magnitude do consumo registrado.

Para ilustrar visualmente esta alta concordância, a Figura 6.10 apresenta o consumo acumulado comparativo para o hidrômetro ECO, que serve como um exemplo representativo. No gráfico, a linha contínua da medição automatizada (AMI) acompanha de perto os marcadores da medição de referência (AMM), demonstrando a ausência de desvios sistemáticos e validando a acurácia do sistema ao longo de todo o período experimental.

Figura 6.10 – Consumo Acumulado Comparativo: AMI vs. AMM (Hidrômetro Ecologia).



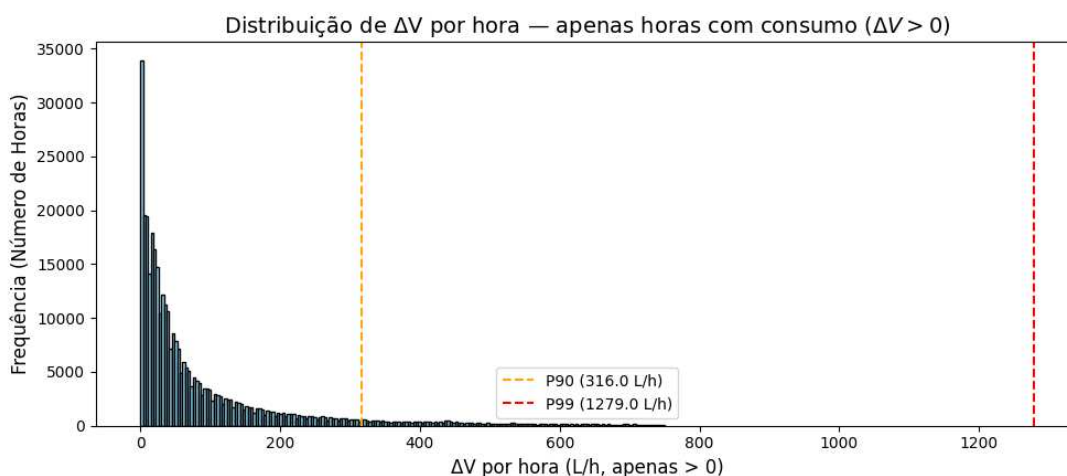
Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.

6.4 Triagem operacional para atenção técnica (OE4)

Esta seção apresenta uma triagem operacional de baixo custo, baseada em percentis, para indicar pontos que merecem atenção técnica. O objetivo aqui não é certificar vazamentos nem propor um modelo estatístico, mas oferecer evidências rápidas e úteis para priorização de vistoria em campo.

6.4.1 Limiares a partir da Distribuição de Consumo Horário

Para caracterizar a intensidade típica e os picos de consumo, calculou-se a distribuição dos incrementos horários de volume (ΔV) no agregado do campus, considerando apenas horas com consumo ($\Delta V > 0$) e a equivalência 1 pulso = 1 L (Seção 4.3.6). A Figura 6.11 mostra um histograma com a marcação dos percentis $P90$ e $P99$. Observou-se uma distribuição fortemente assimétrica (cauda à direita), com $P90 \approx 316,0$ L/h e $P99 \approx 1.279,0$ L/h. Em termos operacionais, isso significa que 90% das horas com consumo ficaram abaixo de ≈ 316 L/h, enquanto volumes superiores a ≈ 1.279 L/h são raros (cerca de 1%). Os percentis $P90$ e $P99$ funcionam como referências para triagem rápida, uma vez que seu cálculo independe da distribuição dos dados.

Figura 6.11 – Distribuição de ΔV por hora no campus

Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.

6.4.2 Atenção noturna por persistência de consumo

Como triagem simples de possíveis anomalias, avaliou-se a janela noturna de 00:00–05:59, período em que, para a maioria dos setores, espera-se baixo ou nenhum consumo contínuo. Para cada hora dessa janela e para cada hidrômetro, calculou-se ΔV . Um evento noturno foi sinalizado quando ΔV excedeu um limiar de referência global estimado por percentil alto ($P99$) da própria janela noturna no campus. Para cada dispositivo, computou-se a fração de horas noturnas sinalizadas no período D_{oper} . Essa métrica permite ranquear rapidamente os pontos que, de modo recorrente na madrugada, apresentam consumo acima do que é típico para o campus.

A Tabela 6.6 apresenta um Top 10 por maior porcentagem de horas noturnas sinalizadas, acompanhado de uma sugestão de ação inicial. Trata-se de triagem: um valor elevado não prova vazamento, mas sustenta a priorização de vistoria (por exemplo, torneiras/descargas, boias de caixa d'água, válvulas parcialmente abertas, purgas ou automações locais).

6.4.3 Leitura e limitações

A triagem proposta é deliberadamente conservadora na qual usa percentis ($P90/P99$) da própria distribuição observada, sem assumir forma paramétrica e sem imputação de dados. Leituras elevadas na madrugada podem refletir rotinas legítimas (lavagens programadas, irrigações, recargas de reservatórios) e, por isso, não constituem diagnóstico. Ainda assim, fornecem um *ranking* objetivo para planejamento de visitas de campo. Em paralelo, o histograma do campus

Tabela 6.6 – Top 10 pontos por fração de horas noturnas sinalizadas (00:00–05:59) ao longo de D_{oper} .

Local / Setor	ID do hidrômetro	% horas noite sinalizadas	Sugestão inicial
MORADIA	16001340	1,48 %	Alta — investigar vazamento/boia; checar ramal interno
DMV	16000848	0,82 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
DEG	16000803	0,82 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
CPPPA	16000863	0,82 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
ABI	16000856	0,78 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
DZO	16000888	0,59 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
DCA	16000824	0,59 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
DZO	16000797	0,59 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
ADM	16000741	0,55 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual
DMV	16000952	0,55 %	Média — verificar uso fora de horário; inspeção visual

Fonte: Elaboração própria a partir dos registros de telemetria.

(Figura 6.11) documenta o nível típico de consumo e os patamares de pico raros, servindo como referência para a gestão.

6.4.4 Resultado gerencial

Com esses dois artefatos, o histograma com $P90/P99$ e o Top 10 noturno obteve-se um quadro operacional acionável onde pontos recorrentes na madrugada são priorizados para vistoria e, após intervenção, o próprio indicador (% de horas noturnas sinalizadas) pode ser acompanhado no *dashboard* para verificar a efetividade da correção. A abordagem cumpre o OE4 ao demonstrar como os dados de telemetria, já validados em D_{val} (Seção 4.4.3) e qualificados em D_{oper} (Tabela 6.2, Tabela 6.3), podem guiar decisões práticas de manutenção e redução de perdas.

7 INOVAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES

Este capítulo posiciona a solução open-source implantada na UFLA frente a características frequentemente associadas a plataformas proprietárias, sem menção a marcas. A comparação considera custos e licenciamento, interoperabilidade, customização, governança e risco de lock-in, operabilidade (disponibilidade e PDR), observabilidade e cobertura em ambiente de campus universitário.

A contribuição deste trabalho não está na criação de um novo sensor ou protocolo, mas na integração, implementação e validação de uma arquitetura IoT open-source completa para um problema institucional. A inovação é demonstrada por quatro dimensões: sendo a validação metodológica de acurácia e caracterização da escalabilidade, vantagens econômicas e de governança de dados, modelo arquitetural replicável e aplicação operacional na gestão do recurso hídrico.

7.1 Contribuição metodológica: acurácia e escalabilidade

A avaliação foi conduzida em dois conjuntos de dados: um *conjunto de validação* D_{val} e um *conjunto operacional* D_{oper} . No D_{val} , a comparação entre telemetria e medições manuais auditadas resultou em erro relativo inferior a 0,5%, demonstrando a precisão metrológica da arquitetura em condições controladas. No D_{oper} , a caracterização de um ano de operação em escala evidenciou 182 hidrômetros analisados, 166 ativos, PDR = 78,54% e disponibilidade = 81,3%. Esses valores descrevem o desempenho real em campo e sustentam a narrativa de que a solução é simultaneamente precisa e operacional em escala.

Tabela 7.1 – Síntese quantitativa das contribuições (acurácia e escala).

Métrica	Valor
Acurácia (D_{val})	Erro relativo < 0,5%
Escala (D_{oper})	182 analisados; 166 ativos
Operabilidade (D_{oper})	PDR = 78,54%; Disponibilidade = 81,3%

7.2 Contribuição econômica, estratégica e de governança

A escolha por uma pilha open-source é estratégica por explicitar custos locais (CAPEX/OPEX), reduzir dependência contratual e assegurar soberania sobre os dados. A Tabela 7.2 sintetiza o posicionamento do arranjo frente a características frequentes em plataformas proprietárias, com ênfase em licenciamento/TCO, interoperabilidade, customização, governança/lock-in, operabilidade, observabilidade e cobertura.

Tabela 7.2 – Comparação por critério (sem marcas comerciais).

Critério	Open-source (proposto)	Proprietárias (características frequentes)
Custos/licenciamento	Sem taxa de licença; custos locais explicitados (CAPEX/OPEX)	Cobrança recorrente por ponto/gateway e por usuário
Interoperabilidade	MQTT/JSON e persistência em SQL; extração integral de dados	APIs/formatos condicionados a contrato e política do fornecedor
Customização	Decoders, ETL e dashboards ajustáveis e versionados	Parâmetros limitados ao escopo do fornecedor
Governança/lock-in	Dados sob controle institucional; portabilidade integral	Dados em nuvem do fornecedor; dependência contratual
Operabilidade	KPIs medidos em campo (Tab. 7.1)	KPIs restritos ao painel do fornecedor
Observabilidade	Regras definidas pelo operador (condição→janela→ação)	Conjunto de alarmes predefinidos
Cobertura	Planejamento por orçamento de enlace e verificação em campo	“Cobertura como serviço”, com menor transparência técnica

7.3 Contribuição arquitetural: um modelo replicável

O trabalho entrega um *blueprint* completo e documentado: coleta por medidores, enlace LoRaWAN, servidor de rede, ingestão via MQTT/JSON, persistência em SQL e visualização em painéis. A articulação entre camadas, com artefatos versionados, facilita transferência para outras instituições com ajustes de topologia e backhaul.

7.4 Contribuição operacional: habilitação da gestão proativa

A solução desloca o processo de gestão de um regime reativo para um regime orientado por dados. As regras de observabilidade (*nó silencioso*, *PDR baixo*, *degradação de SNR/RSSI*) viabilizam triagem sistemática e priorização de intervenções, reduzindo tempo de detecção de falhas e apoiando ações de eficiência hídrica.

7.5 Síntese das contribuições

A inovação demonstrada é uma prova de conceito validada de ponta a ponta: *metrologicamente precisa* (erro $< 0,5\%$ no D_{val}), *operacional em escala* (182 dispositivos em um ano, PDR de 78,54% e disponibilidade de 81,3%), *estrategicamente vantajosa* (governança de dados e custos previsíveis) e *útil à gestão* (observabilidade e priorização de ações). Essa combinação posiciona a arquitetura open-source como alternativa concreta para modernização da gestão hídrica em ambientes institucionais.

8 CONCLUSÕES

Esta dissertação demonstrou a viabilidade técnica e gerencial de um sistema *end-to-end* para monitoramento inteligente de consumo de água em campus universitário, baseado integralmente em tecnologias abertas (hidrômetros SAGATECH US-5.0, LoRaWAN com *gateway* Browan, servidor de rede ChirpStack, *pipeline* Python–MySQL e visualização em Grafana). O sistema foi implantado em escala institucional (182 pontos instrumentados) e operou ao longo de (D_oper) (22/09/2024–22/09/2025), provendo séries temporais auditáveis e artefatos operacionais (painéis, mapas e inventário) úteis à gestão hídrica.

No Objetivo Específico 1, a arquitetura proposta foi implementada e evidenciada por registros de rede, inventário de dispositivos e painéis de operação. A instalação e o georreferenciamento dos pontos possibilitaram rastreabilidade e análise espacial, enquanto o uso de padrões abertos garantiu interoperabilidade e reprodutibilidade.

No Objetivo Específico 2, a qualidade das séries de consumo foi quantificada por três frentes. Na completude, obteve-se medida global ponderada de 78,54% no campus, com mediana por dispositivo de 83,68% (Q1–Q3: 78,55–89,01%), considerando 166 dispositivos com janela efetiva mínima de sete dias. Na regularidade, os intervalos entre mensagens apresentaram mediana de 60,0 minutos e 89,9% dos registros dentro do corredor de 45–75 minutos, evidenciando aderência ao (T_n=60) min e ausência de deriva sistemática. Na consistência interna, a fração de incrementos negativos do totalizador foi 0,00% e a mediana de eventos de *reset* por dispositivo foi zero, confirmando monotonicidade e integridade do fluxo de dados; a mediana de ΔV horário (P50) foi 0,00 L, com P90 de 84 L e P99 de 631 L, caracterizando o perfil típico de baixo consumo com picos esporádicos.

No Objetivo Específico 3, a abordagem de monitoramento *IoT* (AMI) foi validada pelo conjunto D_{val} , comparando incrementos de volume com a abordagem de medição manual (AMM) ao longo de sete semanas (28/04/2025–12/06/2025) em 11 pontos. Os erros relativos por ponto variaram de $-0,434\%$ a $+0,459\%$, todos dentro do limite de $\pm 2\%$ estabelecido pelo regulamento metrológico aplicável, inclusive em cenários de baixo e alto consumo. O procedimento adotou comparação intervalar utilizando os carimbos de tempo mais próximos às leituras AMM, sem interpolação, conforme T_n .

No Objetivo Específico 4, a entrega concentrou-se em uma triagem operacional simples e reprodutível que gera uma relação priorizada de dispositivos que demandam atenção. Essa

triagem considera duas evidências objetivas observadas nas séries: silêncio de comunicação acima de limiares definidos pela recência da última mensagem e consumo noturno incomum entre 00h e 05h, identificado por horas com incremento volumétrico acima de um limiar obtido por percentil elevado (P99) do próprio conjunto. O produto final é um top-10 para inspeção, com indicação explícita do motivo do alerta (silencioso ou noite atípica). A abordagem privilegia utilidade imediata e transparência metodológica, além de poder ser reexecutada periodicamente com as mesmas consultas e planilhas já geradas.

Em termos de contribuições, o trabalho reuniu dois eixos frequentemente tratados de forma separada: escalabilidade operacional e validação metrológica. A implantação ampla, com operação contínua e métricas de qualidade favoráveis, comprova a robustez do arranjo aberto; a validação AMI–AMM, com erro relativo abaixo de 0,5% em valor absoluto para os pontos analisados, atesta a confiabilidade da medição por pulsos no contexto institucional. Somam-se a isso artefatos reprodutíveis (consultas SQL/rotinas Python) que permitem auditoria e evolução do sistema.

Como toda implantação em ambiente real, este estudo possui limitações técnicas que contextualizam os resultados alcançados. A confiabilidade da rede é influenciada pelo comportamento do protocolo *LoRaWAN* operando em Classe A. As perdas de pacotes verificadas decorrem da falta de confirmação de entrega e da existência de áreas de sombra provocadas pela topografia e edificações do campus, representando o principal desafio tecnológico da arquitetura. Embora essas restrições não inviabilizem a aplicação dos dados na gestão hídrica institucional, elas definem os limites operacionais do sistema. O capítulo seguinte detalha oportunidades de melhoria, como a expansão da infraestrutura de *gateways*, para mitigar esses gargalos.

A pesquisa atingiu seus objetivos: implementou uma arquitetura aberta e escalável, demonstrou qualidade de dados compatível com uso gerencial, validou a acurácia de medição frente à referência manual e entregou instrumentos práticos para operação. Os resultados sustentam a adoção do sistema como base institucional para monitoramento hídrico e oferecem um caminho claro de evolução técnica e científica para trabalhos subsequentes.

9 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos indicam que a arquitetura aberta proposta é tecnicamente viável e útil para a gestão hídrica. A continuidade natural do trabalho envolve ampliar o escopo temporal e espacial de observação, fortalecer a automação operacional e evoluir os métodos de análise mantendo a simplicidade e a reprodutibilidade que pautaram esta dissertação.

No eixo de dados, recomenda-se estender o horizonte de D_{oper} para ciclos anuais completos com sazonalidade acadêmica, feriados e períodos de estiagem, aprofundando a análise de variações semanais e mensais. A ampliação de D_{val} com novas campanhas AMM, cobrindo mais pontos e janelas alternadas, permitirá estimar estabilidade temporal da acurácia e efeitos de regime de consumo distintos. Em paralelo, é desejável incluir procedimentos de *data quality* contínuos (auditorias automáticas de completude, regularidade e monotonicidade) com registros versionados das regras aplicadas, garantindo rastreabilidade e comparabilidade ao longo do tempo.

No eixo de detecção de anomalias, a prioridade é consolidar a *triagem operacional* já implementada em um fluxo automatizado e reexecutável. A estratégia pode avançar de limiares fixos por percentis globais (P90/P99) para limiares adaptativos por dispositivo, com *baselines* que respeitem padrões de dia útil/fim de semana e janelas noturnas. Essa evolução mantém a transparência do método e reduz falsos positivos sem introduzir complexidade estatística excessiva. Visualmente, mapas e séries com *sparklines* por ponto, associados ao motivo do alerta, tendem a acelerar o entendimento por equipes não técnicas.

No eixo de automação, o próximo passo é transformar os indicadores em ações. Alertas podem ser orquestrados a partir de consultas SQL ou *views* no *MySQL* consumidas pelo Grafana, com notificações por e-mail ou mensageria institucional. Quando um dispositivo entrar em silêncio acima de um limiar ou quando houver consumo noturno atípico, o sistema deve abrir um registro operacional com campos mínimos (identificador do ponto, local, horário, motivo do alerta, evidências) em ferramenta de *service desk* já utilizada na UFLA, permitindo acompanhamento de causa e solução. A reciprocidade do fluxo — alerta, intervenção em campo, normalização da métrica — cria um ciclo virtuoso de melhoria contínua.

No eixo de integração e governança, recomenda-se publicar rotinas e consultas em repositório institucional com controle de versão, além de disponibilizar um conjunto de dados anonimizado para pesquisa, respeitando a LGPD. O versionamento dos decodificadores de *payload*

e das transformações do *pipeline* evita regressões silenciosas e facilita auditorias. Relatórios periódicos, gerados a partir das mesmas consultas usadas neste trabalho, consolidam transparência e prestação de contas.

No eixo metrológico, futuras campanhas podem incluir ensaios controlados com recipientes calibrados ou *bancadas* de passagem para aferir linearidade e repetibilidade por faixas de vazão, complementando a validação comparativa AMI–AMM em campo. A repetição do protocolo com novos períodos e amostras reforça a robustez estatística das conclusões e amplia o escopo de aplicabilidade.

Por fim, recomenda-se avaliar a sustentabilidade operacional do sistema sob a ótica de custo total (*TCO*), manutenção de longo prazo e indicadores de confiabilidade (tempo médio entre falhas, tempo de restabelecimento, autonomia de bateria). Esses elementos sustentam a institucionalização da solução como serviço permanente e sua potencial replicação em outros campi e órgãos públicos, preservando a proposta de inovação aberta e de baixo custo que fundamenta este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABUSUKHON, A.; ALTAMIMI, F. Water Preservation Using IoT: A proposed IoT System for Detecting Water Pipeline Leakage. In: **2021 International Conference on Information Technology (ICIT)**. [s.n.], 2021. p. 115–119. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9491667>.
- ADAMS, M. N.; JOKONYA, O. An investigation of smart water meter adoption factors at universities. v. 196, p. 324–331, 2022. ISSN 1877-0509. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921022432>.
- ADELANTADO, F. *et al.* Understanding the Limits of LoRaWAN. v. 55, n. 9, p. 34–40, 2017. ISSN 1558-1896. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8030482>.
- AGUILAR, M. G. S. *et al.* Analysis of Wastewater Production to Implement Circular Economy Solutions in a Smart Cities University Campus Living Lab. In: **2019 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)**. [s.n.], 2019. p. 366–371. ISSN 2687-8860. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9071711>.
- ALAM, M. N. *et al.* Efficient Smart Water Management System Using IoT Technology. In: **2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)**. [s.n.], 2021. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9528202/>.
- ANATEL. ATO Nº 14.448. **Anatel - Agência Nacional de Telecomunicações**. 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-certificacao/2017/1145-ato-14448>.
- ANATEL, RESOLUÇÃO Nº 680. **Anatel - Resolução Nº 680, de 27 de Junho de 2017**. 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680>.
- BEZERRA, M. O. *et al.* Operationalizing Integrated Water Resource Management in Latin America: Insights from Application of the Freshwater Health Index. v. 69, n. 4, p. 815–834, 2022. ISSN 0364-152X, 1432-1009. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s00267-021-01446-1>.
- BROWAN. **Outdoor Micro Gateway V1**. 2025. Disponível em: <https://www.browan.com/products-detail/Outdoor-Micro-Gateway-v1/>.
- BUENO, W. C. Comunicação científica e divulgação científica: aproximações e rupturas conceituais. **Informação & Informação**, v. 15, n. supl, p. 1–12, 2010.
- CACCIUTTOLO, C. *et al.* Low-Cost Sensors Technologies for Monitoring Sustainability and Safety Issues in Mining Activities: Advances, Gaps, and Future Directions in the Digitalization for Smart Mining. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 23, n. 15, p. 6846, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/15/6846>.
- CARRASCO-JIMÉNEZ, J. C.; BALDARO, F.; CUCCHIETTI, F. M. Detection of anomalous patterns in water consumption: An overview of approaches. In: ARAI, K.; KAPOOR, S.; BHATIA, R. (Ed.). **Intelligent Systems and Applications: Proceedings of the 2020 Intelligent Systems Conference (IntelliSys), Volume 1**. Cham: Springer, 2020.

(Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 1250), p. 19–33. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-55180-3_2.

CHINCHILLA-ROMERO, N. *et al.* Collision Avoidance Resource Allocation for LoRaWAN. **Sensors**, v. 21, n. 4, p. 1218, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1218>.

CHIRPSTACK. **ChirpStack Open-Source LoRaWAN® Network Server Documentation**. 2025. Disponível em: <https://www.chirpstack.io/docs/>.

CHIRPSTACK, SEMTECH UDP. **Semtech UDP - ChirpStack Open-Source LoRaWAN® Network Server Documentation**. 2025. Disponível em: <https://www.chirpstack.io/docs/chirpstack-gateway-bridge/backends/semtech-udp.html>.

CORREIA, M.; MARTINS, M. C. O papel das atividades de divulgação científica na promoção da literacia científica. **Saber & Educar**, v. 31, n. 1, p. 1–9, 2022.

CORSAN. **Corsan e Flowen lançam projeto piloto de medidor ultrassônico de água**. 2023. Acessado em: 10 de Fevereiro de 2025. Disponível em: <https://www.corsan.com.br/corsan-e-flowen-lancam-projeto-piloto-de-medidor-ultrassonico-de-agua>.

ELDEEB, E.; ALVES, H. Lorawan-enabled smart campus: The dataset and a people counter use case. v. 11, n. 5, p. 8569–8577, 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10266668>.

EMBRAPII. **Solução de gestão inteligente de água e energia, apoiada pela Embrapii, promove eficiência e economia**. 2024. Acessado em: 10 de Fevereiro de 2025. Disponível em: <https://embrapii.org.br/>.

FIRME, S. M.; MIRANDA, A. C. D. Metodologia científica no ensino superior: um mapeamento da produção científica na biblioteca digital de teses e dissertações (bdtd); catálogo da capes e directory of open access journal (doaj). **Momento - Diálogos em Educação**, v. 31, n. 2, p. 693–713, 2022.

GICHUHI, J.; KHAKATA, E.; KOFI, I. A Smart Water Management System for Detecting Household Water Wastage. **EDP Sciences**, v. 469, p. 00017, 2023. ISSN 2267-1242. Disponível em: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/106/e3sconf_icegc2023_00017/e3sconf_icegc2023_00017.html.

GONZÁLEZ, I.; CALDERÓN, A. J.; FOLGADO, F. J. IoT real time system for monitoring lithium-ion battery long-term operation in microgrids. v. 51, p. 104596, 2022. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22006120>.

GONZÁLEZ, I.; PORTALO, J. M.; CALDERÓN, A. J. Configurable IoT Open-Source Hardware and Software I-V Curve Tracer for Photovoltaic Generators. **Multidisciplinary Digital Publishing Institute**, v. 21, n. 22, p. 7650, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/22/7650>.

GONZÁLEZ-VIDAL, A.; CUENCA-JARA, J.; SKARMETA, A. F. IoT for Water Management: Towards Intelligent Anomaly Detection. In: **2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. [s.n.], 2019. p. 858–863. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8767190>.

GOOGLE EARTH. **Google Earth**. 2025. Acessado em: 04 de Abril de 2025. Disponível em: <https://earth.google.com/>.

GRAFANA LABS. **Grafana OSS | Leading Observability Tool for Visualizations & Dashboards**. 2025. Disponível em: <https://grafana.com/oss/grafana/>.

GUSTIN, D.; JASPERNEITE, J. IoT Device Management Based on Open Source Platforms - Requirements Analysis and Evaluation. In: **NOMS 2022-2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium**. [s.n.], 2022. p. 1–4. ISSN 2374-9709. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9789875>.

HERNANDEZ, C. F.; IOVA, O.; VALOIS, F. Downlink Scheduling in LoRaWAN: ChirpStack vs The Things Stack. In: **2024 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)**. [s.n.], 2024. p. 1–6. ISSN 2689-7563. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10770676>.

HERNÁNDEZ, D. L. *et al.* IoT system prototype based on LoRa and the Orion Context Broker data model of FIWARE. In: **2021 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)**. [s.n.], 2021. v. 5, p. 1–6. ISSN 2573-0770. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9668028>.

INMETRO. **Apresentação**. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/acesso-a-informacao/institucional/apresentacao>.

INMETRO, PORTARIA. **Portaria nº 667, de 16 de dezembro de 2021 - Regulamento Técnico Metrológico consolidado aplicável a hidrômetros de água potável fria e quente**. 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac000667.pdf>.

INMETRO, VIM. **Vocabulário internacional de metrologia: conceitos fundamentais e termos associados: VIM 2012**. [s.l.]: Inmetro, 2021. ISBN 978-85-86920-09-7.

ISMAIL, A. A.; HAMZA, H. S.; KOTB, A. M. Performance Evaluation of Open Source IoT Platforms. In: **2018 IEEE Global Conference on Internet of Things (GCIoT)**. [s.n.], 2018. p. 1–5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8620130>.

ISMAIL, S. *et al.* IoT-Based Water Management Systems: Survey and Future Research Direction. v. 10, p. 35942–35952, 2022. ISSN 2169-3536. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9745489>.

JUNG, C. F. **Metodologia Científica: Ênfase em Pesquisa Tecnológica**. 4ª revisada e ampliada. ed. [s.n.], 2004. Publicação Eletrônica. Disponível gratuitamente para fins didáticos. Acesso em: 2025-04-10. Disponível em: <http://www.jung.pro.br>.

KUMAR, B. S. *et al.* Water Management and Control Systems for Smart City using IoT and Artificial Intelligence. In: **2022 International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)**. [s.n.], 2022. p. 653–657. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9936166/>.

LALLE, Y. *et al.* A Comparative Study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for Smart Water Grid. In: **2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)**. [s.n.], 2019. p. 1–6. ISSN 2150-329X. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9044961>.

LAMIM-GUEDES, V. Alfabetização científica, contextualização e metodologias ativas no ensino de ciências e educação ambiental. **Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 10, n. 1, p. 238–256, 2017.

LAW, K. H.; LYNCH, J. P. Smart City: Technologies and Challenges. v. 21, n. 6, p. 46–51, 2019. ISSN 1941-045X. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8896155/>.

LI, Y.-Y. *et al.* Practices of innovative technology and education for sustainability in Taiwan sustainable campus program. In: **2017 Pacific Neighborhood Consortium Annual Conference and Joint Meetings (PNC)**. [s.n.], 2017. p. 15–22. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8203517/>.

LoRa Alliance. **LoRaWAN Specification v1.0.3**. [s.l.], 2018. Acessado em 03 de outubro de 2025. Disponível em: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan1.0.3.pdf>.

MASTER, A. *et al.* IoT-Based Smart Water Management System with Notification and Real-Time Data Analysis. In: **2024 11th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)**. [s.n.], 2024. p. 1–6. ISSN 2769-2884. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10522234>.

MESQUITA, S. K. d. C.; MENESES, R. M. V.; RAMOS, D. K. R. Metodologias ativas de ensino/aprendizagem: dificuldades de docentes de um curso de enfermagem. **Trabalho, Educação e Saúde**, v. 14, n. 2, p. 473–486, 2016.

MURDAN, A. P.; HARDIN, A. Harnessing LoRa Technology for Enhanced Smart Water Metering Solutions. In: **2024 5th International Conference on Innovative Trends in Information Technology (ICITIIT)**. [s.n.], 2024. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10580093>.

NARENDRAKUMAR, T.; PILLAI, A. S. Smart connected campus. In: **2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)**. [s.n.], 2017. p. 1591–1596. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8342808/>.

ONU. **ONU ODS 6**. 2024. Acessado em: 6 de Dezembro de 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>.

OTTOLINI, D.; ZYRIANOFF, I.; KAMIENSKI, C. Interoperability and Scalability Trade-offs in Open IoT Platforms. In: **2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**. [s.n.], 2022. p. 1–6. ISSN 2331-9860. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9700622>.

PAN, S.-H.; CHEN, W.-E.; CHEN, W.-S. Smart Irrigation System Implementing in Smart Campus. In: **2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Communications, Internet of Things and Big Data (ICEIB)**. [s.n.], 2023. p. 491–496. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10170667>.

PELADARINOS, N. *et al.* Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 23, n. 16, p. 7128, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7128>.

PINHEIRO, L. K. S. *et al.* As ferramentas tecnológicas voltadas para o bem-estar coletivo num ambiente urbano inteligente: um ensaio teórico sobre campo grande, ms. p. 193–210, 2023. ISSN 1984-042X. Disponível em: <https://interacoes.ucdb.br/interacoes/article/view/3648>.

PODOLSKIY, V. *et al.* Practical Education in IoT through Collaborative Work on Open-Source Projects with Industry and Entrepreneurial Organizations. In: **2018 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)**. [s.n.], 2018. p. 1–9. ISSN 2377-634X. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8658377>.

PREDESCU, A. *et al.* A real-time architecture for collaborative IoT applications in urban water management. In: **2019 23rd International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**. [s.n.], 2019. p. 839–844. ISSN 2372-1618. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8885509>.

RAIKAR, M. M.; YALIGAR, N. Internet of Things for Sustainability: A Case Study of University Campus. In: **2023 3rd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)**. [s.n.], 2023. p. 91–97. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10426590>.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017. ISSN 1553-877X. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7815384>.

RINCÓN, C. D. V. *et al.* Management Methods of Energy Consumption Parameters Using IoT and Big Data. In: **Advances in Green Electronics Technologies in 2023**. IntechOpen, 2023. ISBN 978-1-80356-834-8. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/83262>.

SAARI, M. *et al.* LoRa — A survey of recent research trends. In: **2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)**. [s.n.], 2018. p. 0872–0877. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8400161>.

SACOTO-CABRERA, E. J. *et al.* Enhancing Urban Water Management: A Novel LoraWAN Platform Based on ChirpStack Integration with Node-Red for Efficient Data Hosting on the Google Cloud Platform. In: **2024 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)**. [s.n.], 2024. p. 1–6. ISSN 2771-568X. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10720258>.

SAGATECH. **Unijato US – Saga Medição**. 2025. Disponível em: <https://sagamedicao.com.br/residencialus/>.

SEMTECH. **LoRa PHY | Semtech**. 2024. Acessado em: 20 de Dezembro de 2024. Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>.

SIDDAMAL, S. V. *et al.* Framework for a Green Campus-LoRa™-Based Low-Power Smart Water Management for Campus. In: JOSHI, A. *et al.* (Ed.). **Information and Communication Technology for Competitive Strategies (ICTCS 2020)**. [S.l.]: Springer, 2021. p. 363–371. ISBN 978-981-16-0739-4.

SLANÝ, V. *et al.* An Integrated IoT Architecture for Smart Metering Using Next Generation Sensor for Water Management Based on LoRaWAN Technology: A Pilot Study.

Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 17, p. 4712, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4712>.

SNIS. **SINISA - Mapa de Indicadores de Água 2022**. 2022. Acessado em: 5 de Dezembro de 2024. Disponível em: https://appsniis.mdr.gov.br/indicadores-hmg/web/agua_esgoto/mapa-agua.

SOBRAL, V. A. L. *et al.* A Cloud-Based Data Storage and Visualization Tool for Smart City IoT: Flood Warning as an Example Application. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 3, p. 1416–1434, 2023. ISSN 2624-6511. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2624-6511/6/3/68>.

SUN, Z. *et al.* Recent Advances in LoRa: A Comprehensive Survey. v. 18, n. 4, p. 67:1–67:44, 2022. ISSN 1550-4859. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3543856>.

TAHA, S. S. *et al.* Evaluation of LoRa Network Performance for Water Quality Monitoring Systems. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), v. 14, n. 16, 2024. ISSN 20763417 (ISSN). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85202435362&doi=10.3390%2fapp14167136&partnerID=40&md5=f6a83e91052e425403d87b3f12c6358f>.

UFLA DQMA. **Meio Ambiente**. 2025. Acessado em: 04 de Abril de 2025. Disponível em: <https://proinfra.ufla.br/dqma>.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024: água para a prosperidade e a paz; fatos, dados e exemplos de ações**. 2024. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388952_por.

UNICAMP. **Unicamp Smart Campus**. 2025. Acessado em: 10 de Fevereiro de 2025. Disponível em: <https://smartcampus.prefeitura.unicamp.br/>.

Universidade Federal de Lavras (UFLA). **Página principal — UFLA**. Lavras, MG: [s.n.], 2025. Portal institucional da UFLA. Acesso em: 04 abr. 2025. Disponível em: <https://ufla.br/>.

Universidade Federal de Lavras (UFLA). **Sobre a UFLA**. Lavras, MG: [s.n.], 2025. Portal institucional da UFLA. Acesso em: 04 abr. 2025. Disponível em: <https://ufla.br/sobre>.

Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pró-Reitoria de Infraestrutura e Logística (PROINFRA). **Diretoria de Gestão da Qualidade e Meio Ambiente — serviços e estrutura**. Lavras, MG: [s.n.], 2025. Portal PROINFRA. Acesso em: 13 ago. 2025. Disponível em: <https://proinfra.ufla.br/dqma>.

VANGELISTA, L. Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation. v. 24, n. 12, p. 1818–1821, 2017. ISSN 1558-2361. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8067462>.

ZAHAROV, A. A. *et al.* Use of Open-Source Internet of Things Platform in Education Projects. In: **2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)**. [s.n.], 2018. p. 1–6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8570071>.

ZILIATECH. **Medidores inteligentes de consumo de água baseados em IoT**. 2023. Acessado em: 10 de Fevereiro de 2025. Disponível em: <https://ziliatech.com/blog/medidores-inteligentes-de-consumo-de-agua-baseados-em-iot/>.

ZOHRABI, N. *et al.* OpenCity: An Open Architecture Testbed for Smart Cities. In: **2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)**. [s.n.], 2021. p. 1–7. ISSN 2687-8860. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9562813/>.