



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Sistema Integrado com Comunicação LoRa para
Monitoramento e Transmissão de Dados em Redes e
Reservatórios de Água da CAGEPA**

Márcio Miranda Córdula

Orientador: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

João Pessoa - PB

2025

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

C796s Córdula, Marcio Miranda.

Sistema integrado com comunicação LoRa para monitoramento e transmissão de dados em redes e reservatórios de água da CAGEPA / Marcio Miranda Córdula. - João Pessoa, 2025.

96 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Recursos hídricos - gestão. 2. Saneamento básico.
3. Sistemas embarcados. 4. Monitoramento remoto. 5.
Automação e controle de processos. I. Souto, Cícero da
Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 556.18(043)

Márcio Miranda Córdula

**Sistema Integrado com Comunicação LoRa para
Monitoramento e Transmissão de Dados em Redes e
Reservatórios de Água da CAGEPA**

Texto de dissertação apresentado ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

João Pessoa - PB
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação
**SISTEMA INTEGRADO PARA MONITORAMENTO E TRANSMISSÃO DE DADOS
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO E RESERVATÓRIOS DE ÁGUA DA COMPANHIA
DE ÁGUA E ESGOTOS DA PARAÍBA (CAGEPA)**

Elaborada por

MÁRCIO MIRANDA CÓRDULA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente

 Cicero da Rocha Souto
Data: 15/08/2025 08:04:32-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

PROF. DR. CÍCERO DA ROCHA SOUTO
Orientador – UFPB

Documento assinado digitalmente

 FABRÍCIO BRAGA SOARES DE CARVALHO
Data: 12/08/2025 16:24:28-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

PROF. DR. FABRÍCIO BRAGA SOARES DE CARVALHO
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente

 OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR
Data: 12/08/2025 18:20:53-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

PROF. DR. OSWALDO HIDEO ANDO JUNIOR
Examinador Externo – UFRPE

Documento assinado digitalmente

 EISENHAWER DE MOURA FERNANDES
Data: 14/08/2025 10:02:05-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

PROF. DR. EISENHAWER DE MOURA FERNANDES
Examinador Externo – UFCG

Resumo

A gestão eficiente de recursos hídricos é um dos maiores desafios enfrentados pelas companhias de saneamento básico no Brasil. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um sistema integrado para monitoramento e transmissão de dados em redes de distribuição e reservatórios de água, utilizando tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT). A pesquisa foi conduzida na Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), com o objetivo de reduzir perdas hídricas, aprimorar a eficiência operacional e atender às metas estabelecidas pelo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020). O sistema proposto utiliza módulos LoRa (*Long Range*) em conjunto com sensores de pressão, vazão e nível, integrados a uma plataforma supervisória SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Essa combinação permite a transmissão de dados em tempo real a longas distâncias, com baixo consumo de energia e custos reduzidos, viabilizando o monitoramento contínuo mesmo em regiões de difícil acesso. Este projeto apresenta um modelo replicável para outras companhias de saneamento que enfrentam desafios semelhantes, destacando-se pela sua escalabilidade, eficiência energética e viabilidade econômica. Conclui-se que a combinação de IoT, LoRa e sistemas supervisórios representa um avanço significativo para o setor de saneamento básico no Brasil, promovendo a sustentabilidade, a preservação dos recursos naturais e a melhoria na qualidade dos serviços prestados à população.

Palavras-chave: Sistemas Embarcados, Heltec Automation, IoT, ESP32, LoRa, SCADA LTS, Saneamento Básico, Monitoramento Remoto, Automação e Controle de Processos.

Abstract

Efficient water resource management is one of the greatest challenges faced by sanitation companies in Brazil. This study presents the development and implementation of an integrated system for monitoring and transmitting data in water distribution networks and reservoirs, utilizing Internet of Things (IoT)-based technologies. The research was conducted at the Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) with the objective of reducing water losses, improving operational efficiency, and meeting the targets established by the Legal Framework for Basic Sanitation (Law No. 14,026/2020). The proposed system employs LoRa (Long Range) modules in conjunction with pressure, flow, and level sensors, which are integrated into a SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) platform. This combination enables real-time data transmission over long distances with low power consumption and reduced costs, allowing continuous monitoring even in remote and hard-to-reach areas. This project presents a replicable model for other sanitation companies facing similar challenges, standing out for its scalability, energy efficiency, and economic viability. The findings indicate that the integration of IoT, LoRa, and supervisory systems represents a significant advancement in Brazil's sanitation sector, fostering sustainability, natural resource preservation, and improvements in service quality for the population.

Keywords: Embedded Systems, Heltec Automation, IoT, ESP32, LoRa, SCADA LTS, Basic Sanitation, Remote Monitoring, Process Automation and Control.

Listas de Figuras

Figura 1 – Eficiência Brasil - Dashboard	3
Figura 2 – Esquemático do sistema de aquisição de dados, envio e recepção via LoRa.	26
Figura 3 – Especificações técnicas da placa LoRa 32 V2.	27
Figura 4 – Configuração dos pinos do LoRa 32 V2.	27
Figura 5 – Fluxograma do algoritmo LoRa Sender.	30
Figura 6 – Esquemático do circuito de calibração e ajuste dos pinos ADC do módulo Heltec LoRa 32 V2.	32
Figura 7 – Montagem do circuito de conexão dos sensores ao módulo Heltec LoRa 32 V2	33
Figura 8 – Fluxograma do algoritmo LoRa <i>Receiver Gateway</i>	38
Figura 9 – Detalhes do sensor	43
Figura 10 – Tabela de dados técnicos sensor de pressão VK011	44
Figura 11 – Medidor de vazão Clamp-On Fijo – Clamp-Flow	45
Figura 12 – Princípio de funcionamento do medidor de vazão Clamp-On Fijo – Clamp-Flow	46
Figura 13 – Sensor de vazão ultrassônico R500 - Ultramag	47
Figura 14 – Sonda de nível VK-213	48
Figura 15 – Especificações técnicas Sonda de Nível VK-213	49
Figura 16 – Antena CF914 Yagi de 14 dBi e 20 dBi - 900 MHz	50
Figura 17 – Irradiação da antena CF914 Yagi de 14 dBi - 900 MHz	51
Figura 18 – Interface gráfica do perfil de visada LinkCalc - Ligowave	54
Figura 19 – Gráfico da Calibração dos pinos ADC - Heltec LoRa 32	55
Figura 20 – Gráfico dos pinos ADC Ajustados - Heltec LoRa 32	56
Figura 21 – Leitura do ADC ajustado - módulo Heltec LoRa 32 V2	57
Figura 22 – <i>Gateway</i> , à esquerda, conectando ao Wi-Fi e <i>Sender</i> , à direita, aguardando-o para reenviar os pacotes.	57
Figura 23 – <i>Gateway</i> recebe os pacotes de dados, envia o ACK de confirmação, garantindo que a transmissão foi bem sucedida	58
Figura 24 – Serial Monitor Arduino IDE - Informações da transmissão (RSSI e SNR)	58
Figura 25 – Localização do PtP LoRa - Mestre Sivuca - Mangabeira	60
Figura 26 – Perfil de Visada do PtP Mestre Sivuca	61
Figura 27 – Recepção dos dados de pressão do Mestre Sivuca no servidor CAGEPA - SCADA	62
Figura 28 – Exibição da recepção dos dados pelo display OLED - Mestre Sivuca	63
Figura 29 – Serial monitor - Arduino IDE: ECIT Mestre Sivuca - JP	65
Figura 30 – Localização do PtP LoRa - R26	65

Figura 31 – Perfil de Visada do PtP do R26 - Cabedelo	66
Figura 32 – Recepção dos dados de pressão do R26 - Cabedelo, no servidor CAGEPA - SCADA	67
Figura 33 – Exibição da recepção dos dados pelo display OLED - R26	67
Figura 34 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão R26 - Cabedelo	69
Figura 35 – Localização do PtP LoRa - Epitácio / Pedro Gondim - JP	70
Figura 36 – Perfil de Visada do PtP da transmissão Epitácio / Pedro Gondim - JP	71
Figura 37 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão Epitácio / Pedro Gondim - JP	72
Figura 38 – Recepção dos dados de vazão - Epitácio/Pedro Gondim, no servidor CAGEPA - SCADA	72
Figura 39 – Localização do PtP LoRa - ETA São Gonçalo - PB	73
Figura 40 – Perfil de Visada do PtP da transmissão São Gonçalo - PB	74
Figura 41 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão São Gonçalo - PB	75
Figura 42 – Recepção dos dados de vazão - ETA São Gonçalo, no servidor CAGEPA - SCADA	76
Figura 43 – Localização do PtP LoRa - Boqueirão de Gurinhém / São José dos Ramos	77
Figura 44 – Perfil de Visada do PtP da transmissão Gurinhém para São José dos Ramos - PB	78
Figura 45 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão Gurinhém / São José dos Ramos - PB	80
Figura 46 – Recepção dos dados de pressão - Reservatório Gurinhem, no servidor CAGEPA - SCADA	81
Figura 47 – Recepção dos dados de nível - Reservatório Gurinhem, no servidor CAGEPA - SCADA	81

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Faixa de tensão medida para diferentes níveis de atenuação do ADC da ESP32	31
Tabela 2 – Especificações técnicas do sensor de vazão Clamp-On Fixo Clamp-Flow	46
Tabela 3 – Comparaçāo Resumida - Clamp-Flow e RG500	48

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	5
1.2.1	Objetivo Geral	5
1.2.2	Objetivos Específicos	5
1.3	Organização do Trabalho	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1	LoRa (<i>Long Range</i>)	6
2.2	Modulação LoRa: <i>Frequency Shift Chirp Modulation</i> (FSC)	7
2.3	Demodulação LoRa	10
2.4	Protocolos de Comunicação	12
2.4.1	HTTP	14
2.4.2	MQTT	15
2.5	Criptografia AES	17
2.6	Sistema Supervisório SCADA LTS	19
2.7	Revisão de Implementações da tecnologia LoRa no Setor de Saneamento	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Módulo Heltec LoRa 32 V2	26
3.2	Arduino IDE	28
3.2.1	Algoritmo: LoRa Sender	29
3.2.2	Algoritmo: LoRa Gateway	37
3.3	Sensores	42
3.3.1	Sensor de Pressão	42
3.3.2	Sensor de Vazão	44
3.3.3	Sonda de Nível	48
3.4	Antenas	50
3.5	Perfil de Visada	52
4	RESULTADOS	55
4.1	ECIT Severino Dias de Oliveira (Mestre Sivuca) - Mangabeira . . .	59
4.2	Reservatório 26 (R26) - Cabedelo	64
4.3	Epitácio / Pedro Gondim - JP	69
4.4	ETA São Gonçalo - PB	73

4.5	Reservatório Elevado Boqueirão de Gurinhém / São José dos Ramos - PB	76
5	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	84

1 Introdução

As empresas de saneamento básico no Brasil e no mundo exercem uma função muito importante na sociedade moderna, pois promovem saúde pública e garantem qualidade de vida para a população. Desde o período mesopotâmico, e seus jardins verticais, cerca de 3.750 a.C, os seres humanos já implementavam redes de esgotos, (GEORGE, 2015). O que corrobora com o fato de que a sociedade já entendia e sentia a necessidade de implementações sanitárias. Instituições como a CAGEPA, são responsáveis pela captação, tratamento e distribuição de água potável, bem como recolhimento e tratamento de esgoto, serviços fundamentais para a manutenção da preservação ambiental e de uma sociedade sustentável e saudável.

Historicamente, o setor de saneamento no país passou por diversas transformações. Desde a década de 1970, com a criação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), (Brasil, Banco Nacional de Habitação (BNH), 1971), houve um impulso significativo na expansão dos serviços. No entanto, desafios persistem, especialmente no que diz respeito à universalização do acesso e à modernização das infraestruturas existentes.

A Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) desempenha um papel fundamental no abastecimento de água e no saneamento básico no estado da Paraíba. Como empresa estatal, a CAGEPA é responsável pela captação, tratamento e distribuição de água potável, além da coleta e tratamento de esgoto em diversos municípios paraibanos. Sua atuação é essencial para a promoção da saúde pública e para o desenvolvimento socioeconômico da região.

A CAGEPA está atualmente focada em reduzir perdas e modernizar os serviços prestados a população. A topografia diversificada e a dispersão geográfica das comunidades rurais na Paraíba dificultam a implementação de sistemas tradicionais de monitoramento e controle. Nesse contexto, a eficiência no monitoramento de parâmetros como pressão e vazão nas redes de distribuição torna-se crucial para a operação otimizada dos sistemas de abastecimento.

A integração da Internet das Coisas (IoT) apresenta-se como uma solução promissora para superar esses obstáculos. A IoT permite a interconexão de dispositivos e sensores em tempo real, facilitando a coleta e análise de dados essenciais para a gestão dos recursos hídricos. Para a CAGEPA, a adoção de tecnologias IoT possibilita o monitoramento contínuo das redes de distribuição, contribuindo para a redução de perdas e melhoria na qualidade do serviço prestado.

Uma tecnologia emergente que tem ganhado destaque é o LoRa (Long Range), um protocolo de comunicação sem fio que opera em longas distâncias com baixo consumo

de energia. O LoRa é especialmente adequado para aplicações em IoT, pois permite a transmissão de dados em áreas onde a infraestrutura de telecomunicações é limitada ou inexistente. A implementação de redes LoRa pode viabilizar o monitoramento de pressão, vazão e nível em pontos de difícil acesso, atendendo às necessidades específicas da CAGEPA em regiões rurais e urbanas.

A adoção da tecnologia LoRa em conjunto com a IoT oferece benefícios econômicos significativos, especialmente pela redução no número de *links* de internet necessários. Em vez de instalar vários pontos de Wi-Fi para monitoramento, as empresas podem simplesmente recorrer ao LoRa, tornando toda a infraestrutura de conectividade mais eficiente e econômica. Tecnologias de baixo custo são essenciais para empresas estatais como a CAGEPA, que operam com orçamentos restritos e precisam maximizar a eficiência de seus investimentos. A redução dos custos de infraestrutura e manutenção permite que a empresa direcione recursos para a expansão dos serviços e para a melhoria contínua dos sistemas existentes.

Um dos aspectos críticos para a eficiência operacional dessas empresas é o sistema de monitoramento de vazão e pressão. A coleta precisa desses dados é vital para a detecção de perdas, planejamento de manutenção e garantia da qualidade no fornecimento de água. Sistemas de automação industrial têm sido implementados para otimizar esses processos, utilizando protocolos avançados que permitem o controle e supervisão remotos das operações.

Apesar dos avanços tecnológicos, muitas empresas enfrentam dificuldades significativas na implementação desses sistemas. O alto custo de instalação e manutenção de equipamentos de monitoramento e transmissão de dados é um obstáculo, especialmente para companhias que operam em regiões com recursos limitados.

A transmissão de dados em tempo real para os servidores centrais é crucial para a tomada de decisões estratégicas e operacionais. Sem acesso a informações atualizadas sobre pressão e vazão, torna-se desafiador para as empresas identificar problemas, responder a emergências e planejar investimentos de forma eficaz.

A adoção do LoRa pelas empresas de saneamento possibilita o monitoramento eficiente em locais onde a conectividade tradicional é limitada ou inexistente. Em ambientes rurais, por exemplo, onde a instalação de internet via Wi-Fi é inviável muitas vezes, o LoRa oferece uma alternativa prática e econômica para a coleta e transmissão de dados essenciais.

Além de melhorar a eficiência operacional, o uso de tecnologias de baixo custo como o LoRa contribui para a sustentabilidade financeira das empresas de saneamento. Ao reduzir os gastos com infraestrutura e manutenção, é possível direcionar recursos para outras áreas prioritárias, como a expansão dos serviços e a melhoria da qualidade do

atendimento à população.

A integração de soluções tecnológicas acessíveis e eficientes é fundamental para superar os desafios enfrentados pelas empresas de saneamento no Brasil. A implementação de sistemas de monitoramento baseados em LoRa representa um passo significativo na modernização do setor, permitindo uma gestão mais inteligente e responsável dos recursos hídricos, em benefício de toda a sociedade.

1.1 Motivação

A crescente preocupação com as perdas hídricas nas redes de distribuição de água é um dos desafios mais importantes enfrentados pelas empresas de saneamento básico no Brasil. De acordo com o dashboard desenvolvido pela CAESB, na figura 1, a Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) registrou, em 2022, um volume de perdas equivalente a 21,03% do total de água disponibilizada, representando um impacto financeiro expressivo de R\$ 233 milhões, conforme evidenciado no balanço hídrico. Essas perdas, classificadas em aparentes e reais, são causadas por falhas como submedições, vazamentos em redes e ramais, além de ligações clandestinas. A mitigação dessas perdas é essencial para a sustentabilidade econômica e operacional da empresa, garantindo uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e a preservação ambiental.

Figura 1 – Eficiência Brasil - Dashboard



Fonte: (CAESB, 2022)

Outro fator motivador para o desenvolvimento deste projeto é o alinhamento com a

Política Federal de Saneamento Básico, instituída pela Lei nº 11.445/2007 e revisada pelo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020), disponível em (GOV, 2020). O Marco Legal estabelece metas rigorosas, como a universalização do acesso ao saneamento básico até 2033, prevendo que 99% da população brasileira tenha acesso à água tratada e 90% à coleta e tratamento de esgoto, exigindo que as companhias adotem tecnologias modernas e eficientes para atingir os indicadores de desempenho. Para a CAGEPA, isso significa a necessidade de implementar sistemas que possibilitem o monitoramento contínuo das suas redes de distribuição, com a finalidade de reduzir perdas, melhorar a eficiência operacional e atender às metas impostas pela legislação.

A introdução de tecnologias como o sistema de comunicação LoRa (Long Range) no contexto de saneamento básico se mostra como uma alternativa muito promissora para a modernização da infraestrutura de monitoramento da CAGEPA. A tecnologia LoRa permite a comunicação sem fio em longas distâncias com baixo consumo de energia, sendo particularmente adequada para a topografia diversificada da Paraíba e regiões de difícil acesso. Comparativamente, a substituição dos rádios tradicionais, cujo custo unitário chega a R\$ 5.000, por módulos LoRa, que custam cerca de R\$ 500 por par, representa uma economia substancial para a empresa. Esta redução de custos possibilita o redirecionamento de recursos financeiros para outras áreas críticas, como a expansão da cobertura de serviços e melhorias na infraestrutura existente.

A implementação de sistemas baseados em LoRa também potencializa a capacidade da CAGEPA de atuar proativamente na identificação e solução de problemas operacionais. O monitoramento em tempo real de variáveis como pressão, vazão e nível nos reservatórios e redes de distribuição proporciona uma resposta mais ágil às situações críticas, como vazamentos e interrupções no abastecimento, isso não apenas reduz os impactos das perdas hídricas, mas também melhora significativamente a qualidade do serviço prestado à população.

Além do impacto financeiro positivo, o uso de LoRa e outras tecnologias de Internet das Coisas (IoT) alinha-se à visão de sustentabilidade das empresas de saneamento. Sistemas de monitoramento inteligentes otimizam o uso dos recursos naturais, promovendo uma gestão mais equilibrada da água e contribuindo para a preservação ambiental. Para a CAGEPA, que atende a uma população superior a 2,7 milhões de pessoas, essas inovações são fundamentais para garantir a continuidade e a melhoria dos serviços de saneamento em um cenário de crescente demanda e restrições orçamentárias.

Por fim, o desenvolvimento deste projeto também visa criar uma base tecnológica replicável para outras companhias de saneamento no Brasil, enfrentando desafios semelhantes. A aplicação de soluções de baixo custo e alta eficiência, como os módulos LoRa integrados aos sistemas supervisórios SCADA, demonstra que a modernização do setor de saneamento básico é viável e sustentável, contribuindo para o cumprimento das

metas do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB), disponível para consulta em (Ministério das Cidades - Governo do Brasil, 2025).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar um sistema integrado de monitoramento e transmissão de dados para redes de distribuição e reservatórios de água, utilizando tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT) e comunicação LoRa, visando a redução de perdas hídricas e a otimização da eficiência operacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- Projetar e desenvolver um sistema IoT para monitoramento de redes de distribuição de água;
- Integrar sensores de pressão, vazão e nível a módulos embarcados com ESP32 e comunicação LoRa, para envio dos dados a uma plataforma SCADA da CAGEPA;
- Avaliar a eficiência da transmissão de dados em tempo real em ambientes urbanos;
- Otimização da operação da rede e redução de perdas hídricas;

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos sendo eles: Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento do projeto; Capítulo 3 que apresenta os tipos de materiais, a caracterização e a metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho; Capítulo 4 mostra os resultados preliminares de todo o projeto juntamente com a descrição do sistema proposto e por fim Capítulo 5 são apresentados as conclusões do projeto;

2 Fundamentação Teórica

2.1 LoRa (*Long Range*)

O LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de radiofrequência, portanto comunicação sem fio, projetada para atender às demandas de rede de baixa potência e longo alcance. É uma tecnologia amplamente utilizada em Internet das Coisas (IoT), que exigem transmissão eficiente de dados em grandes áreas, mantendo o consumo de energia reduzido. O LoRa opera no espectro não licenciado como as bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), o que o torna uma solução economicamente viável para diversas aplicações industriais, comerciais e ambientais (SEMTECH, 2015).

O sistema LoRa é composto por três componentes principais:

- **Dispositivos finais (*End Nodes*):** São sensores ou atuadores equipados com transceptores LoRa. Eles coletam ou enviam dados para a rede.
- **Gateways:** Atuando como intermediários, recebem dados dos dispositivos finais e os transmitem para servidores centrais através de redes IP, como Ethernet, LTE (3G, 4G ou 5G) ou Wi-Fi.
- **Servidores de rede:** Responsáveis pelo processamento e gerenciamento dos dados transmitidos, incluindo segurança e autenticação.

As principais aplicações do LoRa incluem monitoramento ambiental, medição inteligente (*Smart Metering*), rastreamento de ativos, agricultura de precisão e gerenciamento de cidades inteligentes. Por exemplo, em sistemas de irrigação automatizados, o LoRa permite o controle remoto de válvulas e a coleta de dados sobre umidade do solo em tempo real.

O LoRa utiliza bandas de frequência não licenciadas, como 868 MHz na Europa e 915 MHz nas Américas, operando de acordo com regulamentações locais. A transmissão de dados no LoRa é caracterizada pela alta imunidade a interferências e pela capacidade de alcançar distâncias de até 15 km em áreas rurais e 5 km em ambientes urbanos (SEMTECH, 2015).

A principal razão para essa eficiência é a técnica de modulação de espalhamento espectral chamada *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Essa técnica oferece resiliência a ruídos e interferências, tornando o LoRa uma solução robusta para ambientes adversos.

Além disso, pesquisas destacam o impacto positivo do LoRa em aplicações industriais e ambientais. Por exemplo, (SANCHEZ-GOMEZ et al., 2019) investigaram a aplicação de redes LoRaWAN para monitoramento ambiental em regiões de difícil acesso, como

áreas montanhosas e florestais. O estudo concluiu que o LoRa proporciona conectividade robusta mesmo em condições de alta interferência, superando tecnologias concorrentes como Zigbee e Wi-Fi em alcance e eficiência energética.

No contexto do saneamento básico, a tecnologia LoRa tem sido utilizada para monitoramento de qualidade da água, níveis de reservatórios e detecção de vazamentos em redes de distribuição. Por exemplo, no estudo de (WU; KHAN, 2019), foi desenvolvido um sistema móvel de monitoramento da qualidade da água utilizando LoRa, demonstrando a viabilidade de monitoramento em tempo real em ambientes aquáticos.

Além disso, a integração de sistemas de monitoramento baseados em LoRa com plataformas de visualização de dados tem se mostrado eficaz na gestão de recursos hídricos. O estudo de (NGOM et al., 2019) descreve uma infraestrutura de baixo custo composta por uma estação remota para coleta de dados em tempo real e uma plataforma web para visualização e análise, destacando a eficiência dessa abordagem na gestão de recursos hídricos.

2.2 Modulação LoRa: *Frequency Shift Chirp Modulation (FSC)*

A modulação *Frequency Shift Chirp* (FSC), como explicada por (VANGELISTA, 2017) é baseada em *Chirp Spread Spectrum* (CSS) e tem sua origem em aplicações militares e aeroespaciais, devido à sua robustez em ambientes adversos. Mais recentemente, foi adaptada para redes de sensores sem fio, especialmente aquelas operando em cenários de Internet das Coisas (IoT), onde a eficiência energética e a confiabilidade são primordiais. CSS se destaca por combinar um espectro espalhado com a simplicidade de implementação e os baixos requisitos de processamento, comparando-se favoravelmente a outras técnicas de espectro espalhado, como *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS).

A modulação CSS utiliza chirps, que são sinais cuja frequência varia linearmente com o tempo, cobrindo uma faixa de frequência pré-determinada, conhecida como largura de banda (BW). O conceito central baseia-se na relação entre o tempo e a frequência, expressa pela equação:

$$\phi(\tau) = 2\pi \int_{-0}^t f(\tau)d\tau, \quad (2.1)$$

onde $f(\tau)$ é a frequência instantânea do sinal chirp no instante τ . A frequência varia de maneira crescente (*up-chirp*) ou decrescente (*down-chirp*) ao longo do intervalo de tempo do sinal.

O chirp pode ser representado matematicamente como:

$$s(t) = A \cos\left(2\pi\left(f_0 + \frac{kt}{2}\right)t\right), \quad (2.2)$$

onde:

A : amplitude do sinal;

f_0 : frequência inicial;

k : taxa de variação da frequência, definida como $\frac{BW}{T}$, onde T é a duração do chirp;

t : tempo.

A taxa k determina a inclinação do chirp, correspondendo à velocidade com que a frequência varia.

O processo de modulação CSS pode ser dividido nas seguintes etapas principais:

- **1º - Geração do Chirp de Referência:**

Inicialmente, é gerado um chirp de referência (ou chirp base), com frequência variando linearmente ao longo de toda a largura de banda disponível. Esse chirp serve como base para todas as operações subsequentes de modulação e demodulação.

- **2º - Codificação da Informação:**

Na etapa de codificação, os dados a serem transmitidos são representados como símbolos que correspondem a diferentes frequências iniciais do sinal chirp. A codificação CSS emprega o mapeamento dos símbolos para frequências distintas, garantindo que cada símbolo seja representado por um deslocamento específico na frequência do chirp inicial.

Se considerarmos que os dados são representados por um conjunto de símbolos $S = s_0, s_1, \dots, s_{M-1}$, onde M é o número total de símbolos, a frequência inicial f_n correspondente ao símbolo s_n é definida como:

$$f_n = f_{start} + n \cdot \Delta, \quad (2.3)$$

onde:

f_{start} : frequência inicial do chirp base;

n : índice do símbolo s_n , no conjunto de símbolos S ;

$\Delta f = \frac{BW}{T}$: separação de frequência entre dois símbolos consecutivos;

BW : largura de banda utilizada.

Essa correspondência assegura que os símbolos sejam codificados em frequências distintas, minimizando a interferência entre eles. Além disso, a modulação utiliza uma variação linear da frequência ao longo do tempo, descrita por:

$$f(t) = f_{start} + \frac{BW}{T}t, \quad (2.4)$$

onde T é a duração total do chirp. O sinal resultante no domínio do tempo pode ser expresso como:

$$s(t) = A \cos(2\pi \int_{-0}^t f(\tau)d\tau), \quad (2.5)$$

que ao integrar a frequência $f(t)$, resulta em:

$$s(t) = A \cos(2\pi(f_{start}t + \frac{BW}{2T}t^2)), \quad (2.6)$$

onde:

A : amplitude do sinal;

t : tempo.

Essa equação descreve o sinal chirp modulado no tempo, contendo a informação codificada no deslocamento de frequência inicial.

- **3º - Espalhamento Espectral:**

A modulação espalha o sinal ao longo de toda a largura de banda disponível, aumentando sua resistência a interferências e efeitos de multipercorso. O espalhamento ocorre de forma natural na geração do chirp devido à variação linear de frequência.

- **4º - Modulação Temporal:**

A modulação temporal associa o símbolo a uma posição específica no chirp. O sinal resultante pode ser representado como uma sequência de chirps deslocados em frequência ou fase, conforme o símbolo transmitido.

- **5º - Transmissão:**

Após a modulação, o sinal é amplificado e transmitido. Devido à sua natureza de espectro espalhado, o CSS apresenta menor densidade de potência espectral, tornando-o menos suscetível à detecção não autorizada.

A densidade de potência espectral do sinal transmitido é distribuída ao longo da largura de banda, o que pode ser descrito como:

$$P(f) = \frac{1}{BW} \int_0^T |s(t)|^2 dt, \quad (2.7)$$

onde:

$P(f)$: densidade de potência do sinal;

BW : largura do sinal;

T : duração do sinal;

$s(t)$: sinal no domínio do tempo.

Na recepção, o sinal recebido $r(t)$ é correlacionado com o chirp de referência para detectar os símbolos transmitidos. Essa correlação é expressa como:

$$C(t) = \int_0^T r(t).s * (t - \tau)dt, \quad (2.8)$$

$C(t)$: função de correlação;

$r(t)$: sinal recebido;

$s * (t - \tau)$: conjugado complexo do chirp base;

τ : deslocamento de tempo.

A maximização da correlação identifica o símbolo transmitido, mesmo em presença de ruído ou interferência.

A modulação LoRa, baseada no *Chirp Spread Spectrum* (CSS), tem sido amplamente adotada em sistemas de monitoramento de recursos hídricos devido à sua eficiência energética e capacidade de comunicação em longas distâncias. Por exemplo, no estudo de (KOIKE; TAKYU, 2023) foi desenvolvido um sistema de monitoramento de nível de água utilizando LoRa na faixa de 429 MHz, demonstrando a viabilidade de aplicações em redes de sensores sem fio para monitoramento ambiental.

Além disso, a modulação por chirp tem sido objeto de pesquisas para aprimorar a eficiência espectral e a robustez da comunicação. O artigo (HANIF; NGUYEN, 2021), propõe um sistema que combina a modulação por chirp com modulação por índice, visando melhorar a eficiência espectral sem comprometer a imunidade a interferências, característica fundamental em aplicações de IoT e monitoramento remoto.

2.3 Demodulação LoRa

A demodulação é o processo inverso à modulação. Enquanto a modulação consiste em modificar um sinal portador para incorporar informações, a demodulação tem como objetivo recuperar essas informações do sinal recebido. Em sistemas de comunicação digital, os sinais modulados são frequentemente sujeitos a interferências, atenuações e

ruídos no canal. Portanto, a demodulação deve ser capaz de lidar com esses problemas para decodificar corretamente os dados transmitidos.

No caso específico do LoRa, a demodulação emprega também a técnica *Chirp Spread Spectrum* (CSS). A demodulação portanto, é baseada em um processo de *dechirping*, em que o sinal recebido é multiplicado por um sinal conjugado que corresponde ao chirp base (associado ao símbolo 0). Este processo transforma o sinal modulado em um formato que pode ser interpretado como uma modulação por chaveamento de frequência (Frequency Shift Keying, ou M-FSK) o que simplifica a posterior decodificação dos símbolos. A expressão matemática do processo de *dechirping* é adaptada de (MARQUET; MONTAVONT; PAPADOPoulos, 2019a):

$$r_d[k] = r[k] \cdot e^{-j\pi \frac{k^2}{M}}, \quad \forall k \in \mathbb{Z}, \quad (2.9)$$

onde:

k : índice de amostra discreta no tempo;

$r_d[k]$: sinal dechirped.

$r[k]$: sinal recebido;

$e^{-j\pi \frac{k^2}{M}}$: fator de correção de fase;

M : número de símbolos possíveis na modulação CSS;

Após o *dechirping*, o sinal é processado usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para identificar o símbolo transmitido. O símbolo correspondente à máxima correlação no domínio da frequência é dado por:

$$\hat{c}_n = argmax_{c \in \mathcal{A}} |\text{FFT}\{r_d[k]\}[c]|, \quad (2.10)$$

onde:

\hat{c}_n : símbolo estimado transmitido no instante n ;

$argmax_{c \in \mathcal{A}}$: operador que retorna o valor de c (dentro do conjunto de \mathcal{A});

\mathcal{A} : conjunto de todos os símbolos possíveis, que correspondem as frequências discretas geradas pelo processo de modulação. No caso do LoRa, o número de símbolos é $M = 2^{SF}$, onde SF é o *Spreading Factor* (fator de espalhamento);

$|\text{FFT}\{r_d[k]\}[c]|$: Transformada Rápida de Fourier do sinal $r_d[k]$ após o processo de *dechirping*;

c : índice da frequência analisada pela FFT, que está associado a um símbolo possível do conjunto \mathcal{A} .

O processo da demodulação do LoRa consiste em identificar o símbolo transmitido a partir do sinal recebido. Após o *dechirping*, o sinal $r_d[k]$ carrega a informação do símbolo em uma frequência específica. A FFT transforma o sinal do tempo para o domínio da frequência. A magnitude das componentes da FFT revela qual frequência tem maior energia. O operador *argmax* localiza o índice c da frequência com maior energia, que corresponde ao símbolo transmitido.

A principal diferença entre a demodulação LoRa e outras técnicas de demodulação, como ASK, PSK ou QAM, é o uso de *Chirp Spread Spectrum*. O CSS oferece uma excelente relação sinal-ruído (SNR) em cenários adversos e permite comunicações robustas em relativas longas distâncias, ao custo de uma menor taxa de dados. Enquanto tecnologias como QAM são mais eficientes em termos de espectro, elas são mais suscetíveis a ruídos e interferências.

Portanto, as vantagens da demodulação do LoRa são alta resiliência a ruídos, longo alcance, podendo alcançar até 16 km, e baixo consumo de energia, ideal para dispositivos IoT alimentados por bateria.

As maiores desvantagens são a baixa taxa de dados, uma vez que a modulação CSS sacrifica a velocidade de transmissão em prol da robustez, e a complexidade computacional da demodulação, pois envolve *dechirping* e FFT, o que pode aumentar a complexidade do receptor.

A demodulação de sinais LoRa tem sido objeto de diversas pesquisas que buscam aprimorar a eficiência e a robustez desses sistemas. Por exemplo, o estudo de (DAKIC et al., 2021) explora o uso de redes neurais convolucionais para demodular símbolos LoRa, visando melhorar a precisão da demodulação em ambientes com alta interferência. Os resultados indicam que técnicas de aprendizado profundo podem superar métodos tradicionais em termos de resiliência a ruídos e variações do canal.

Além disso, a pesquisa de (MARQUET; MONTAVONT; PAPADOPOULOS, 2019b) apresenta uma análise detalhada da arquitetura de modulação LoRa, abordando aspectos como codificação de canal, *whitening* e entrelaçamento. O estudo propõe técnicas de demodulação aprimoradas que consideram a estrutura específica do LoRa, resultando em melhorias na taxa de erro de bit e na eficiência espectral.

2.4 Protocolos de Comunicação

Os protocolos de comunicação representam a base estrutural de qualquer sistema de troca de informações em redes de computadores e dispositivos. Na era digital, os protocolos se tornaram cruciais para garantir o fluxo confiável, seguro e ordenado dos dados. De maneira geral, um protocolo é um conjunto de regras e convenções que padronizam como

a informação é formatada, transmitida e recebida entre dois ou mais pontos de uma rede. É graças a essas regras que sistemas, equipamentos e serviços de diferentes fabricantes conseguem se comunicar de forma efetiva, independentemente das plataformas e das tecnologias específicas adotadas.

A adoção de protocolos bem estabelecidos traz inúmeras vantagens. Uma delas é a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos. Dessa maneira, mesmo que cada setor utilize equipamentos de diferentes fornecedores, a existência de padrões de comunicação garante que todos possam trocar informações de forma coerente. Outro benefício é a segurança, pois muitos protocolos incorporam métodos de criptografia, autenticação e mecanismos de controle de acesso, reduzindo a probabilidade de interceptações e ataques cibernéticos. Há, ainda, o aspecto de escalabilidade: protocolos de rede bem projetados permitem que novos dispositivos sejam adicionados de forma modular, sem a necessidade de reconfigurar toda a infraestrutura.

No geral, protocolos de comunicação podem ser divididos em diferentes camadas ou níveis, de acordo com o modelo teórico de referência. O mais conhecido é o Modelo de Interconexão de Sistemas Abertos (OSI), (International Organization for Standardization (ISO), 1984), que organiza a comunicação em sete camadas distintas: física, enlace de dados, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação. Cada camada possui responsabilidades específicas e interage com a camada imediatamente superior ou inferior por meio de interfaces bem definidas. Embora o modelo OSI seja o mais tradicional em termos pedagógicos, o modelo TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) é o mais utilizado na prática, consistindo em quatro ou cinco camadas, a depender da forma como se agrupa algumas funções. Esse conjunto de protocolos viabiliza a internet tal como a conhecemos, sendo responsável pela roteirização de dados (IP) e pela garantia de entrega confiável (TCP), entre outras funcionalidades.

Vale destacar, no contexto industrial, a existência de protocolos específicos como o Modbus, PROFIBUS, EtherNet/IP, entre outros, (TAPIA, 2023), que são largamente empregados em automação e controle de processos. Esses protocolos são projetados para lidar com necessidades particulares da indústria, como baixa latência, tolerância a falhas e suporte a topologias em barramento, o que torna a comunicação mais eficiente e robusta em ambientes fabris. O Profinet, por exemplo, oferece alto desempenho para a transmissão de dados em tempo real, fato fundamental para o controle preciso de máquinas e a coordenação de linhas de produção.

No geral, as empresas utilizam protocolos como o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*), SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*) e FTP (*File Transfer Protocol*) ocupam papel fundamental no dia a dia. O HTTP, por exemplo, é o protocolo base da World Wide Web, possibilitando a troca de informações entre navegadores e servidores. Já o SMTP é o protocolo padrão para envio de e-mails, e o FTP é voltado para a transferência de

arquivos. Sem o uso coerente e seguro de tais protocolos, serviços críticos de comunicação corporativa e de suporte ao cliente ficariam comprometidos.

A evolução dos protocolos de comunicação tem sido fundamental para o avanço da Internet das Coisas (IoT), permitindo a interconexão eficiente de dispositivos em diversas aplicações. No estudo de (CHENG; ZHANG; HUANG, 2018), os autores analisam diferentes protocolos utilizados na IoT, destacando suas arquiteturas, desenvolvimentos e tendências futuras. Eles enfatizam a importância de selecionar protocolos adequados para garantir eficiência energética, segurança e interoperabilidade entre dispositivos heterogêneos.

Além disso, no artigo (ANITHA et al., 2022), são discutidos vários protocolos de comunicação empregados no contexto da Internet das Coisas Industrial (IIoT), como HTTP, MQTT, CoAP, (KASHYAP, 2025), XMPP, AMQP e MODBUS. Os autores compararam esses protocolos em termos de eficiência, segurança e adequação a diferentes aplicações industriais, fornecendo uma visão abrangente das opções disponíveis para a comunicação em ambientes industriais conectados.

Para a indústria, o uso eficaz de protocolos possibilita monitorar cadeias de suprimento, assegurar processos automatizados com pouca ou nenhuma intervenção humana e até mesmo viabilizar a manutenção preditiva. Já nas empresas de qualquer porte, o suporte a protocolos confiáveis é a chave para integrar dados de vendas, marketing, logística, suporte ao cliente e outros departamentos, tornando o fluxo de trabalho mais ágil e a tomada de decisões mais embasada.

2.4.1 HTTP

O HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) é um dos protocolos de comunicação mais conhecidos e utilizados em todo o mundo. Ele serve como base para a *World Wide Web* e permite que clientes (geralmente navegadores) e servidores web troquem informações de maneira padronizada. Desde sua criação, o HTTP tem evoluído para suportar demandas crescentes de eficiência, segurança e escalabilidade, tornando-se essencial para a experiência de navegação na internet, seja em aplicações simples de consumo de conteúdo, seja em transações comerciais e financeiras de grande porte.

O HTTP foi originalmente concebido no início da década de 1990, por Tim Berners-Lee, no CERN, como parte do projeto que deu origem à World Wide Web. A proposta inicial era bastante simples: criar um protocolo que viabilizasse a troca de documentos de hipertexto (HTML), permitindo que pesquisadores e cientistas compartilhassem informações facilmente. Com o sucesso e a expansão da Web, a IETF (*Internet Engineering Task Force*) passou a desenvolver especificações mais robustas para o HTTP. Surgiram então as versões 1.0 e 1.1, cada uma trazendo melhorias significativas, como persistência de conexão, suporte a cabeçalhos adicionais e melhor uso de caches.

O protocolo HTTP segue um modelo de requisição-resposta. O cliente (por exemplo, um navegador) envia uma requisição ao servidor, especificando o método (GET, POST, PUT, DELETE etc.), o recurso desejado (URI) e possivelmente cabeçalhos adicionais e dados de corpo (body). O servidor, então, processa a requisição e responde com um código de status (200 para sucesso, 404 para recurso não encontrado, 500 para erro interno, entre outros) e o conteúdo solicitado, se houver.

Um dos principais diferenciais do HTTP é o fato de ele ser um protocolo sem estado (*stateless*), isso significa que cada requisição é tratada de forma independente, sem que o servidor armazene, por padrão, informações sobre requisições anteriores. Para contornar essa limitação em aplicações que exigem sessão e persistência de dados do usuário, utilizam-se técnicas como cookies e tokens de autenticação.

As grandes vantagens do HTTP se dão ao fato da sua simplicidade estrutural, que é relativamente simples de compreender e implementar com mensagens em texto claro e métodos bem definidos, é um protocolo amplamente suportado para qualquer dispositivo com acesso à internet e um navegador web consegue utilizá-lo, e sua segurança baseada em HTTPS, advinda da camada TLS (*Transport Layer Security*) e SSL (*Secure Sockets Layer*), o HTTP pode trafegar de forma criptografada, mantendo a integridade dos dados trafegados.

O protocolo HTTP tem sido amplamente utilizado em aplicações de Internet das Coisas (IoT) devido à sua simplicidade e compatibilidade com a infraestrutura da web. No estudo de (BZIUK et al., 2018), os autores analisam o desempenho do HTTP em cenários de IoT, avaliando métricas como latência e taxa de transferência. Os resultados indicam que, embora o HTTP seja viável para muitas aplicações IoT, é essencial considerar suas limitações em termos de overhead e consumo de recursos, especialmente em dispositivos com restrições de energia e processamento.

Além disso, o artigo de (HOFF; CREVATIN, 2003), eles investigam a implementação da autenticação digest do HTTP em sistemas de automação embarcados. Os autores destacam a importância de mecanismos de autenticação eficientes para garantir a segurança na comunicação entre dispositivos em redes industriais, enfatizando que a escolha adequada do método de autenticação pode mitigar vulnerabilidades e assegurar a integridade dos dados transmitidos.

2.4.2 MQTT

O MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação padrão OASIS, voltado para sistemas de telemetria e troca de mensagens em ambientes com recursos limitados de hardware e largura de banda. Muito utilizado originalmente idealizado para uso em redes de petróleo e gás, o MQTT ganhou grande popularidade com

o crescimento da Internet das Coisas (IoT), graças à sua eficiência no envio de mensagens entre dispositivos e servidores.

Principais características:

- Leveza e Baixo Overhead: O protocolo foi projetado para ser econômico tanto no consumo de banda quanto na carga de processamento, o que o torna ideal para dispositivos com hardware e conexões limitados.
- Uso de Broker Central: O broker é responsável por receber as mensagens publicadas em determinados tópicos e distribuí-las aos usuários. Ele centraliza, simplifica a arquitetura e melhora a escalabilidade.
- QoS (*Quality of Service*) Ajustável: O MQTT oferece três níveis de Qualidade de Serviço:
 1. QoS 0 (*At most once*): A mensagem é entregue sem garantias de repetição. É o modo mais rápido, porém com menor confiabilidade.
 2. QoS 1 (*At least once*): Garante que a mensagem seja entregue pelo menos uma vez ao destinatário, podendo haver duplicadas.
 3. QoS 2 (*Exactly once*): Garante que a mensagem seja entregue exatamente uma vez, usando um processo de handshake mais complexo.

- Mecanismo de Retenção (*Retained Messages*): Possibilidade de armazenar a última mensagem publicada em um tópico para que novos assinantes a recebam imediatamente ao realizarem a assinatura.
- *Last Will and Testament* (LWT): Funcionalidade que permite informar automaticamente aos demais clientes quando determinado dispositivo cai ou está offline, enviando uma mensagem pré-configurada ao broker.
- Baixa Latência: Como o modelo pub/sub permite que assinantes recebam as mensagens assim que o broker as processa, a latência tende a ser muito baixa, ideal para aplicações em tempo quase real.

Uma das principais características do MQTT é que ele segue o paradigma de publicação/assinatura (*publish/subscribe*), diferentemente do modelo tradicional de requisição-resposta (*request/response*) encontrado em protocolos como HTTP. Nesse modelo, dispositivos podem publicar mensagens em “tópicos” específicos, sem que precisem conhecer explicitamente os destinatários dessas mensagens. Da mesma forma, outros dispositivos (ou aplicações) podem assinar (*subscribe*) esses tópicos para receber, de forma assíncrona, as mensagens que forem publicadas. Esse design oferece grande flexibilidade e escalabilidade, pois os editores (*publishers*) e os assinantes (*subscribers*) não precisam manter conexões diretas entre si. Em vez disso, o MQTT utiliza um “*broker*”, que atua como intermediário, recebendo as mensagens publicadas e distribuindo-as aos assinantes relevantes. Isso reduz

o acoplamento entre dispositivos e facilita a adição ou remoção de assinantes a qualquer momento, sem reconfigurações complexas.

Não apenas as indústrias, mas empresas de todos os setores podem se beneficiar do MQTT. Soluções de rastreamento de frotas, automação predial, controle de logística em armazéns e até sistemas de monitoramento ambiental fazem uso do protocolo para coletar dados em tempo real. O modelo pub/sub facilita a distribuição de atualizações para múltiplos assinantes, permitindo que diversos setores de uma organização acompanhem, simultaneamente, indicadores e eventos importantes.

A computação em nuvem e a cultura de DevOps incentivam cada vez mais a adoção de arquiteturas distribuídas e orientadas a eventos. O MQTT se encaixa nessa tendência. As principais plataformas de nuvem, como AWS (*Amazon Web Services*) e Microsoft Azure, oferecem suporte nativo ou integrado ao protocolo, simplificando o desenvolvimento de soluções IoT corporativas.

O protocolo MQTT tem sido amplamente adotado em sistemas de automação residencial devido à sua eficiência e flexibilidade. No estudo "Automação Residencial Usando Protocolo MQTT, Node-RED e Assistente Pessoal Inteligente", disponível em (ARAÚJO, 2021) foi desenvolvida uma solução integrada que utiliza o MQTT para comunicação entre dispositivos domésticos inteligentes, demonstrando a viabilidade e simplicidade na implementação de sistemas de automação residencial.

Além disso, o trabalho "Estudo da Aplicação de um Sistema IoT Baseado no Protocolo de Comunicação MQTT na Área da Robótica Industrial", disponível em (SILVA, 2020), explora a aplicação do MQTT em ambientes industriais, especificamente na comunicação entre robôs e sistemas de controle. Os resultados indicam que o protocolo é eficaz na transmissão de dados em tempo real, atendendo às exigências de desempenho e confiabilidade necessárias na robótica industrial.

2.5 Criptografia AES

A criptografia é um ramo fundamental da segurança da informação, responsável por tornar dados inteligíveis apenas para aqueles que possuam permissão de acesso ou conhecimento prévio dos métodos de cifragem e decifragem. Entre as técnicas criptográficas mais difundidas e confiáveis, encontra-se o Advanced Encryption Standard (AES), também referido em alguns contextos como AES18, dependendo de especificações e variações propostas em certas publicações ou soluções de software. De forma geral, o AES foi selecionado pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST), dos Estados Unidos, para substituir o Data Encryption Standard (DES), devido às crescentes necessidades de segurança e às limitações que os algoritmos anteriores já apresentavam frente ao avanço tecnológico.

A criptografia AES, inicialmente conhecida como Rijndael, foi projetada por Joan Daemen e Vincent Rijmen. Sua principal característica é a versatilidade em diferentes tamanhos de chaves (normalmente 128, 192 ou 256 bits) e blocos de 128 bits, o que oferece um equilíbrio adequado entre segurança e desempenho computacional. O AES adota uma arquitetura em que os dados são processados por meio de rondas (rounds) repetitivas, sendo que o número de rondas varia conforme o tamanho da chave escolhida: 10 rondas para chaves de 128 bits ou 16 bytes, 12 para chaves de 192 bits e 14 para chaves de 256 bits. A cada rodada, realizam-se transformações que envolvem substituição de bytes (*SubBytes*), deslocamento de linhas (*ShiftRows*), mistura de colunas (*MixColumns*) e adição de chave (*AddRoundKey*). Essas etapas geram o texto cifrado, que só pode ser recuperado por meio do processo inverso, executado com a chave correta.

A estrutura matemático-criptográfica do AES se baseia em conceitos de álgebra linear e teoria dos campos finitos (particularmente o $GF(2^8)$), o que dá robustez no embaralhamento e difusão dos bits ao longo de cada ronda. A utilização de operações como XOR, multiplicações modulares e substituições não lineares (por meio de caixas-S) faz com que seja extremamente difícil reverter o processo cifrado sem o conhecimento da chave. Essa robustez tornou o AES o padrão universalmente aceito para a criptografia simétrica, sendo empregado em aplicações que vão desde simples comunicações seguras na internet, via protocolos como TLS/SSL, até sistemas de alta criticidade, como transações bancárias e dispositivos de armazenamento de dados, que é o caso da transmissão de dados via LoRa ESP32.

Um dos aspectos mais relevantes que justifica o amplo uso do AES é a relação entre segurança e desempenho. A complexidade computacional para tentar quebrar o AES por ataques de força bruta – isto é, testando todas as chaves possíveis – cresce exponencialmente conforme aumenta o tamanho da chave. Nesse sentido, mesmo para dispositivos com poder computacional expressivo, a tarefa de percorrer todo o espaço de chaves de 128 bits (cerca de $3,4 \times 10^{38}$ combinações) é inercialmente impraticável. Já em um contexto de 256 bits, o espaço de chaves ascende a $1,16 \times 10^{77}$, impossibilitando a quebra por força bruta com a tecnologia atual. Esse fato, aliado à possibilidade de otimizações tanto em hardware (implementações em ASIC ou FPGA) quanto em software (uso de instruções específicas de criptografia em processadores modernos), faz do AES um dos algoritmos de cifragem mais eficientes e seguros disponíveis.

Porém, assim como qualquer sistema criptográfico, o AES depende do correto gerenciamento das chaves e de boas práticas de segurança no ambiente em que está inserido. De pouco adianta empregar chaves de 256 bits se elas forem armazenadas sem proteção ou se o sistema que as utiliza for vulnerável a ataques de engenharia social ou malware. Desse modo, a efetividade do AES está intrinsecamente vinculada a um ecossistema de segurança que inclui políticas de controle de acesso, monitoramento de

rede, hardening de sistemas operacionais e educação dos usuários.

Há pesquisas sobre possíveis vulnerabilidades de implementação, conhecidas como ataques de canal lateral (*side-channel attacks*). Esses ataques não se voltam contra a teoria matemática do AES em si, mas exploram características físicas do sistema (como consumo de energia, tempo de processamento ou emissões eletromagnéticas) para inferir a chave utilizada. Tais estudos ressaltam a importância de implementar contramedidas apropriadas, principalmente em ambientes embarcados e dispositivos de Internet das Coisas (IoT), onde o hardware pode ser mais suscetível a essas formas de espionagem.

Outra vertente de investigação envolve a comparação do AES com algoritmos que possam emergir como candidatos à chamada “criptografia pós-quântica”. Embora a segurança do AES em relação a computadores quânticos ainda seja considerada elevada (especialmente para chaves de 256 bits), pesquisadores já analisam se, no futuro, será necessário desenvolver variantes ou complementos que ofereçam resistência a algoritmos quânticos como o de Grover. Até o presente momento, contudo, não há indicações de que a adoção do AES esteja ameaçada, uma vez que ele se mantém como solução amplamente confiável para a maior parte das aplicações contemporâneas.

A criptografia AES-128 tem sido amplamente adotada em sistemas de Internet das Coisas (IoT) devido à sua eficiência e robustez na proteção de dados sensíveis. Por exemplo, de acordo com (LATA; SAINI, 2020), os autores implementaram uma co-simulação hardware-software utilizando o algoritmo AES-128 para criptografar e descriptografar imagens em dispositivos de borda IoT. A implementação foi realizada com o *Xilinx System Generator*, e os resultados demonstraram que a arquitetura baseada em FSM (*Finite State Machine*) no modo CTR (*Counter*) apresentou melhor desempenho em termos de consumo de energia e área ocupada, tornando-a adequada para aplicações IoT que exigem processamento eficiente e seguro de dados.

No estudo de (BZIUK et al., 2018), os pesquisadores abordaram a segurança na comunicação de dispositivos finais em redes LoRaWAN. Eles propuseram uma abordagem que utiliza o AES-128 para criptografar os dados transmitidos entre os dispositivos finais e o *gateway*, visando economizar energia nos dispositivos finais. Os resultados indicaram que a implementação do AES-128 proporcionou uma comunicação segura com baixo consumo de energia, atendendo às necessidades de dispositivos IoT com recursos limitados.

2.6 Sistema Supervisório SCADA LTS

O desenvolvimento de sistemas de supervisão e controle em ambientes industriais é imprescindível para garantir eficiência, segurança e confiabilidade na operação dos processos em ambiente empresarial e/ou industrial. Nesse contexto, os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) surgem como uma solução que integra hardware,

software e redes de comunicação, permitindo o monitoramento e o controle de diversos dispositivos em tempo real. Tradicionalmente, soluções SCADA envolvem elevados custos de licenciamento e manutenção. Porém, iniciativas de código aberto, como o SCADA LTS (*Long Term Support*), têm conquistado espaço ao oferecerem modelos flexíveis, economicamente acessíveis e respaldados por comunidades de desenvolvedores.

Um sistema SCADA é uma estrutura hierárquica que compreende, na base, sensores e atuadores conectados a Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) ou outros dispositivos de campo. Esses controladores, por sua vez, comunicam-se com servidores de aquisição de dados, os quais enviam as informações ao software de supervisão. O SCADA LTS segue essa mesma arquitetura, mas diferencia-se pela adoção de componentes e protocolos abertos, assegurando maior transparência na forma como os dados são gerados, transmitidos e exibidos. Com isso, torna-se viável tanto a integração de módulos desenvolvidos por terceiros quanto a personalização de relatórios e *dashboards* de acordo com as necessidades específicas de cada indústria ou aplicação.

A filosofia de *Long Term Support* (LTS) aplicada ao SCADA visa garantir atualizações contínuas e suporte prolongado, tornando o sistema robusto contra vulnerabilidades e capaz de acompanhar inovações tecnológicas. Essa abordagem também reflete uma preocupação com a segurança cibernética, um aspecto crucial em sistemas industriais. Ataques a redes de controle e automação podem resultar não apenas em perdas financeiras, mas também em riscos à segurança física de plantas industriais e de seus operadores. Nesse sentido, o SCADA LTS tende a aprimorar mecanismos de autenticação de usuários, criptografia de dados e isolamento de segmentos de rede, contribuindo para a proteção das informações coletadas em tempo real.

Outro diferencial do SCADA LTS é a possibilidade de utilizar protocolos de comunicação industriais padronizados, como Modbus, HTTP, OPC UA e EtherNet/IP. Isso facilita a interoperabilidade com diferentes marcas de CLPs, sistemas de controle distribuído (DCS) e até mesmo dispositivos de Internet das Coisas (IoT). A consolidação de dados oriundos de múltiplos pontos de coleta e a consequente disponibilização de painéis de monitoramento (*dashboards*) permite ao gestor identificar rapidamente anomalias e gargalos produtivos. A partir das funcionalidades de histórico (historian), relatórios e análise gráfica, é possível rastrear ocorrências em linhas de produção, avaliar o desempenho de equipamentos e programar manutenções preventivas em intervalos mais assertivos.

A arquitetura escalável do SCADA LTS possibilita que pequenas empresas usufruam de ferramentas de supervisão sem que isso implique custos proibitivos. À medida que a operação cresce, o sistema pode ser expandido pela adição de módulos ou servidores adicionais, mantendo a coerência dos dados e a capacidade de resposta aos usuários. Além disso, a abertura do código-fonte favorece a criação de plug-ins voltados a domínios específicos, como a integração com sistemas de gestão empresarial (ERP) e plataformas de

inteligência de negócios (BI). Assim, há um incentivo para que a comunidade industrial e acadêmica colabore em melhorias contínuas, agregando novas funcionalidades e corrigindo eventuais falhas.

No estudo de (MOHANI et al., 2020), os autores desenvolveram uma estrutura SCADA para monitoramento, controle e registro de dados em plantas de processamento industrial. A implementação utilizou uma combinação de hardware e software para adquirir dados de sensores e controlar atuadores em tempo real. Os resultados demonstraram que o sistema proposto melhorou significativamente a eficiência operacional e a capacidade de resposta a eventos críticos, além de fornecer um histórico detalhado para análises posteriores.

Outro trabalho relevante é de (MERCHÁN et al., 2017), onde os pesquisadores apresentaram o desenvolvimento de um sistema SCADA de código aberto para monitoramento avançado de processos industriais. Utilizando uma plataforma de programação de uso geral, o sistema foi capaz de integrar diversos dispositivos e protocolos, oferecendo uma solução flexível e econômica. Os testes realizados em um ambiente industrial real comprovaram a eficácia do sistema em termos de confiabilidade, escalabilidade e facilidade de manutenção.

2.7 Revisão de Implementações da tecnologia LoRa no Setor de Saneamento

A adoção de tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo energético, como o LoRaWAN, tem se mostrado uma tendência crescente no setor de saneamento básico, tanto no Brasil quanto internacionalmente. Empresas de saneamento têm implementado soluções baseadas em LoRaWAN para aprimorar o monitoramento e a gestão de recursos hídricos.

Na Europa, a Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux (CILE),(NTT Global, 2023), responsável pelo abastecimento de água para aproximadamente 800 mil habitantes em 24 municípios da província de Liège, Bélgica, implementou uma solução inovadora baseada em tecnologia LoRaWAN para modernizar sua infraestrutura de distribuição de água. Em parceria com a NTT DATA e a Cisco, a CILE desenvolveu uma rede privada de comunicação IoT, composta por 53 *gateways* Cisco IXM instalados em torres de água estratégicas, permitindo a cobertura de toda a região com apenas 27 antenas, graças ao longo alcance da tecnologia LoRaWAN.

Essa rede conecta milhares de sensores e medidores inteligentes que monitoram em tempo real variáveis como consumo, pressão, temperatura, vazamentos e refluxos na rede de distribuição. Os dados coletados são integrados a um sistema de gestão baseado em

nuvem, utilizando plataformas como SAP e serviços de inteligência artificial para análise preditiva.

De acordo com (NTT Services, 2023) e (Cisco, 2023), antes da implementação, a CILE enfrentava perdas de água superiores a 55% devido a vazamentos não detectados em sua extensa rede de 3.500 km de tubulações. Com a nova solução, é possível identificar rapidamente pontos de perda, priorizar a substituição de trechos críticos da infraestrutura e otimizar o uso de energia nas estações de bombeamento, resultando em uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos.

Além dos benefícios operacionais, a iniciativa permitiu à CILE expandir seus serviços para outras aplicações de cidade inteligente, como monitoramento de qualidade do ar, gestão de resíduos e controle de iluminação pública, utilizando a mesma infraestrutura de rede LoRaWAN. Esse projeto demonstra como a integração de tecnologias IoT pode transformar a gestão de serviços públicos, promovendo sustentabilidade e eficiência operacional.

No estudo de (ZHAO; PAN; LAN, 2024), foi proposto desenvolvimento de um sistema voltado especificamente para o monitoramento da pressão em tubulações de abastecimento de água para combate a incêndios, um segmento que, apesar de crítico para a segurança urbana, carece de monitoramento eficaz devido à natureza subterrânea dessas infraestruturas.

A arquitetura proposta no trabalho é composta por três componentes principais: nó de aquisição de dados, nó de convergência e plataforma de processamento. Os nós de aquisição integram sensores resistivos de pressão, microcontroladores ultra low-power MSP430F249 e módulos de comunicação LoRa baseados no chip SX1262, operando na banda de 470 MHz. Esses nós capturam dados de pressão em tempo real e os transmitem para os nós de convergência por meio de uma rede em topologia estrela.

Destacando o foco em eficiência energética: o consumo em *sleep mode* dos nós é de apenas 15 μ A, permitindo operação prolongada em ambientes subterrâneos com acesso limitado a fontes de energia. O uso do conversor analógico-digital ADS1222 de 24 bits garante alta precisão na aquisição dos sinais de pressão, um requisito essencial para detecção precoce de anomalias como vazamentos.

Durante os testes realizados em um estacionamento subterrâneo, com múltiplos obstáculos e níveis, a solução demonstrou robustez: o sistema obteve uma cobertura de até 700 metros em ambientes subterrâneos e 1000 metros em ambientes semiabertos, com taxa de perda de pacotes inferior a 4%. Além disso, a acurácia das medições de pressão manteve-se dentro de um erro máximo de 4%, mesmo sob condições de forte atenuação de sinal.

O trabalho também realiza uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de comunicação para IoT em ambientes desafiadores. Tecnologias como RFID, ZigBee e Wi-Fi

mostraram-se limitadas em alcance (cerca de 100 metros), enquanto o NB-IoT apresentou fraca imunidade a interferências. Embora tecnologias celulares como 4G/5G ofereçam maior largura de banda, seu alto consumo energético e custo inviabilizam aplicações de monitoramento contínuo em redes subterrâneas. Frente a essas limitações, o LoRa revelou-se a tecnologia mais adequada, conciliando baixo consumo, alta penetração de sinal e viabilidade econômica.

De acordo com (HARTONO et al., 2022), a aplicação de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) em conjunto com a comunicação LoRa tem se mostrado uma solução eficaz para o monitoramento remoto da qualidade da água em corpos hídricos superficiais, como rios. Nele é apresentado o desenvolvimento e a implementação de um sistema inteligente de monitoramento da qualidade da água no rio Bengawan Solo, na Indonésia.

O sistema proposto integra sensores de pH e de oxigênio dissolvido (DO), conectados a um microcontrolador Arduino, que realiza o processamento dos dados e a comunicação via LoRaWAN. O fluxo de dados segue uma arquitetura composta por três blocos: entrada (sensores), processamento (Arduino e módulo LoRa) e saída (aplicações web e *mobile* para visualização dos dados). A transmissão dos dados ocorre em tempo real entre os nós sensores e a estação base, sendo posteriormente armazenados em um servidor e disponibilizados para os usuários finais.

Os autores destacam que a escolha pela tecnologia LoRa foi motivada por suas características de longo alcance e baixo consumo energético, fatores essenciais para aplicações em ambientes naturais com infraestrutura limitada. Durante os testes experimentais, foi observado que, para distâncias de até 500 metros, todos os pacotes de dados foram transmitidos com sucesso, apresentando um valor de RSSI de aproximadamente -87 dBm. À medida que a distância aumentava para 1 km, 1,5 km e 2 km, a qualidade do sinal diminuía progressivamente, com valores de RSSI de -96 dBm, -105 dBm e -118 dBm, respectivamente, e uma leve elevação na taxa de perda de pacotes.

Além disso, o estudo ressalta que o sistema permite a expansão modular, possibilitando a adição de novos sensores e a personalização dos parâmetros monitorados conforme as necessidades locais. Tal flexibilidade torna a solução escalável e adaptável para outros cenários de monitoramento ambiental, reforçando o potencial da combinação IoT-LoRa para aplicações em gestão de recursos hídricos.

O trabalho de (SIREGAR; TANJUNG; NURMAYADI, 2020) propõe a integração de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) com dispositivos convencionais, oferecendo uma solução de baixo custo para o controle remoto de consumo de água, nele foi desenvolvido um sistema de monitoramento e controle de fluxo de água utilizando comunicação LoRa, voltado para ambientes urbanos e edifícios institucionais.

O sistema possui dois módulos principais: um baseado em servo motor acoplado

mecanicamente à torneira convencional, e outro utilizando uma válvula solenóide instalada diretamente na tubulação. Ambos os módulos são controlados por um microcontrolador ESP32 e comunicam-se com a central de monitoramento através de módulos LoRa SX1276 operando na faixa de 915 MHz. Esta abordagem permite superar limitações de infraestrutura de comunicação em locais onde a cobertura Wi-Fi é restrita, além de reduzir o consumo energético.

O sistema visa combater o desperdício de água, um problema recorrente em instituições públicas e privadas. Por meio da plataforma desenvolvida, os usuários podem monitorar em tempo real o volume de água consumido, com visualização dos dados em *dashboards* interativos baseados em Grafana, acessíveis via navegador web. Além disso, o sistema permite o acionamento remoto das torneiras, viabilizando o fechamento preventivo em caso de detecção de anomalias ou vazamentos.

A arquitetura baseada em servo motor mostrou-se mais adequada para instalações residenciais e aplicações descentralizadas, devido ao seu menor consumo de energia em comparação com a válvula solenóide, que demanda corrente contínua para manutenção do estado aberto. Por outro lado, o módulo com válvula solenóide revelou-se mais apropriado para sistemas centralizados, como redes prediais, onde é necessário controlar o fornecimento de água de forma global.

A combinação de controle remoto, monitoramento contínuo e capacidade de integração com plataformas de visualização evidencia o potencial das tecnologias IoT e LoRa para aplicações em saneamento e gestão de recursos hídricos. O trabalho de Siregar et al. reforça que a comunicação LoRa constitui uma alternativa viável e escalável para sistemas de monitoramento de água, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência operacional em diversos contextos.

A análise dos casos revisados demonstra que a tecnologia LoRa tem se consolidado como uma solução eficaz e versátil para aplicações no setor de saneamento e monitoramento ambiental, apesar de nova, se comparada a outras tecnologias em telecomunicações. Seja em redes complexas de distribuição urbana, como no projeto da CILE na Bélgica (NTT Services, 2023), no monitoramento de pressão em tubulações subterrâneas (ZHAO; PAN; LAN, 2024), na avaliação da qualidade da água em corpos hídricos (HARTONO et al., 2022), ou no controle inteligente de consumo de água em ambientes urbanos (SIREGAR; TANJUNG; NURMAYADI, 2020), os estudos evidenciam os benefícios do longo alcance, baixo consumo energético e robustez da comunicação LoRa. A adoção dessas soluções tem contribuído para a detecção precoce de anomalias, otimização operacional e gestão sustentável dos recursos hídricos, reforçando o potencial de aplicação da abordagem proposta neste trabalho para sistemas de abastecimento de água em contextos semelhantes.

3 Materiais e Métodos

A metodologia adotada neste projeto foi designada com o objetivo de viabilizar a implementação de um sistema integrado para monitoramento e transmissão de dados em redes de distribuição e reservatórios de água da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA). Esta seção detalha as etapas ferramentas e tecnologias utilizadas para alcançar os objetivos propostos.

O projeto baseia-se na instalação de módulos embarcados com ESP32 e rádios LoRa em diferentes pontos do estado da Paraíba para envio e recepção de dados de pressão, nível e vazão.

O desenvolvimento do sistema compreende as seguintes etapas principais:

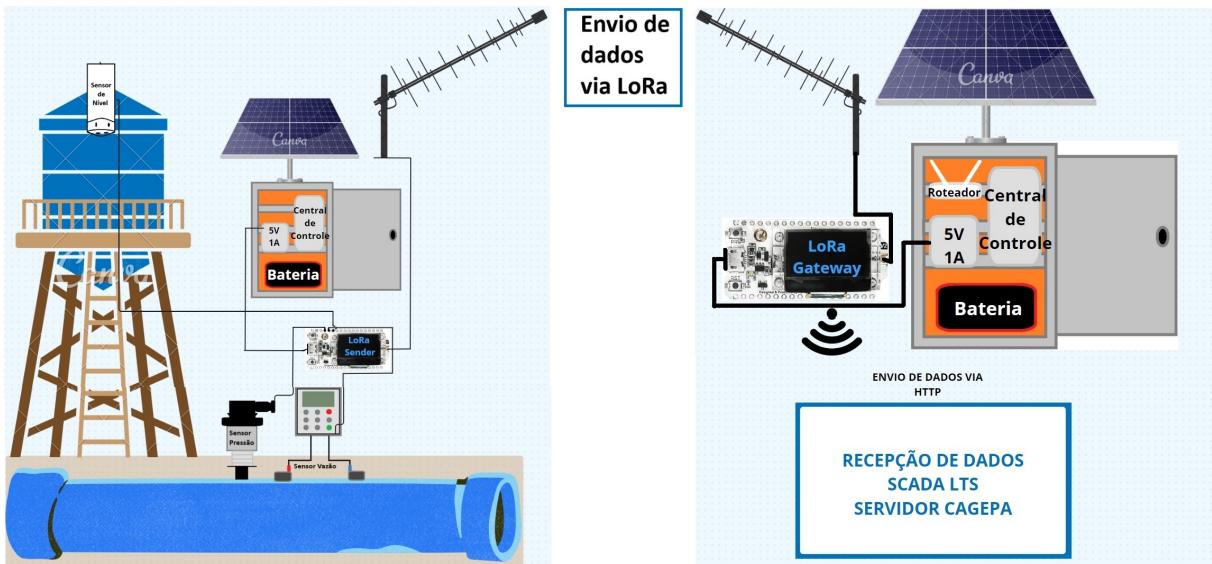
- **Seleção e Configuração dos Componentes:** A escolha dos dispositivos e sensores foi pautada por critérios de precisão, robustez e compatibilidade com o protocolo LoRa. Sensores de vazão, pressão e nível foram integrados às entradas ADCs dos módulos Heltec LoRa 32 V2, que operam em frequências variadas dentro das faixas permitidas pela ANATEL. Esses módulos foram configurados para coletar os dados em tempo real e transmiti-los para o gateway.
- **Desenvolvimento de Algoritmos de Processamento e Comunicação:** Utilizou-se a IDE Arduino versão 2.3.4 para o desenvolvimento dos algoritmos responsáveis por coletar os dados dos sensores, formatá-los e enviá-los via LoRa. Adicionalmente, foram implementadas rotinas para tratamento de erros, retransmissão de pacotes e sincronização dos dispositivos.
- **Perfil de Visada e Testes de Campo:** Estudos de visada e testes de comunicação foram realizados para avaliar a possibilidade e eficácia da transmissão em diferentes cenários geográficos. Locais como regiões urbanas densamente povoadas, na cidade de João Pessoa, e em áreas rurais mais isoladas, como São Gonçalo - PB, serão utilizados como casos de estudo.
- **Segurança e Criptografia:** Para garantir a integridade e confidencialidade dos dados transmitidos, foi implementada a criptografia AES (*Advanced Encryption Standard*). Essa abordagem assegura que apenas dispositivos autorizados possam acessar as informações.
- **Implementação no Sistema Supervisório (SCADA LTS):** Os dados coletados pelos gateways foram enviados ao servidor central da CAGEPA, integrado ao SCADA LTS. Essa plataforma foi configurada para armazenar pelo tempo necessário, processar

e exibir os dados de forma direta e intuitiva, permitindo a análise em tempo real dos parâmetros monitorados.

- **Validação Experimental:** Ensaios foram conduzidos para verificar a precisão das leituras dos sensores, a estabilidade da comunicação LoRa e a integração com o sistema SCADA. Os resultados obtivos serviram como base para ajustes no algoritmo e hardware utilizados.

O esquemático do sistema de aquisição dos dados de nível, pressão e vazão, envio e recepção dos dados via rádio LoRa da CAGEPA é apresentado na Figura 2. Obs: Figura meramente ilustrativa.

Figura 2 – Esquemático do sistema de aquisição de dados, envio e recepção via LoRa.



Fonte: o autor - ilustração desenvolvida no (Canva, 2025).

O projeto proposto possui portanto flexibilidade, escalabilidade e custo-benefícios, sendo uma alternativa viável para outras companhias que enfrentam desafios semelhantes.

3.1 Módulo Heltec LoRa 32 V2

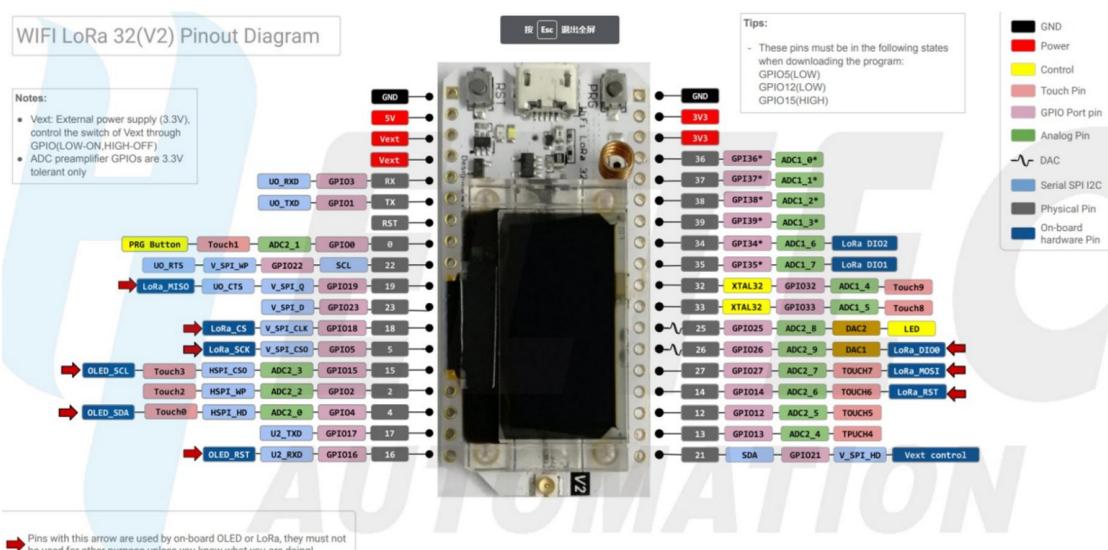
O WiFi LoRa 32 (V2) é uma placa de desenvolvimento para Internet das Coisas (IoT) projetada pela empresa chinesa Heltec Automation. Ela integra um módulo ESP32 a um módulo rádio LoRa, portanto múltiplas funcionalidades, como Wi-Fi, Bluetooth e LoRa, além de um sistema de gerenciamento de bateria Li-Po e um display OLED de 0,96 polegadas. Esse conjunto torna a placa uma opção versátil para aplicações em centros urbanos, áreas rurais, aplicações em agricultura de precisão, automação residencial e projetos de makers. A Figura 3 mostra a tabela de especificações técnicas da placa e Figura 4 lista o diagrama de pinagem da placa.

Figura 3 – Especificações técnicas da placa LoRa 32 V2.

Parameters	Description
Master Chip	ESP32 (240MHz Tensilica LX6 dual-core+1 ULP, 600 DMIPS)
LoRa Node Chip	SX1276/SX1278
USB to Serial Chip	CP2102
Frequency	470~510MHz, 863~923MHz
Max. TX Power	19±1dBm
Receiving sensitivity	-135dBm
Wi-Fi	802.11 b/g/n, up to 150Mbps
Bluetooth	Bluetooth V4.2 BR/EDR and Bluetooth LE specification
Hardware Resource	22*GPIO; 3*UART; 2*I2C; 2*SPI;
Memory	520KB internal SRAM; 8MB Spi Flash
Interface	Micro USB x 1; LoRa ANT(IPEX1.0); 2*18*2.54 Header Pin
Battery	3.7V lithium (SH1.25 x 2 socket)
Operating Temperature	-20 ~ 70 °C
Dimensions	51 * 25.5* 10.6 mm

Fonte: (HELTEC, 2017)

Figura 4 – Configuração dos pinos do LoRa 32 V2.



Fonte: (HELTEC, 2017)

- **Microprocessador:** ESP32 (MCU dual-core de 32 bits + núcleo ULP), com chip LoRa SX1276/SX1278.
- **Interface Micro USB:** Inclui regulador de tensão completo, proteção contra ESD, proteção contra curto-circuito, blindagem RF e outras medidas de proteção.
- **Interface de bateria SH1.25-2 onboard:** Sistema integrado de gerenciamento de bateria de lítio (gerenciamento de carga e descarga, proteção contra sobrecarga, detecção de nível de bateria, comutação automática entre alimentação USB/bateria).
- **Display OLED de 0,96 polegadas:** Matriz de pontos 128x64, pode ser usado para exibir informações de depuração, nível da bateria e outras informações.
- **Conexões de rede integradas:** Wi-Fi, LoRa e Bluetooth. Antena metálica de mola de 2,4 GHz dedicada para Wi-Fi/Bluetooth onboard, com interface IPEX (U.FL) reservada para uso com LoRa.
- **Chip USB para porta serial CP2102 integrado:** Facilita o download de programas e a impressão de informações de depuração.
- **Suporte ao ambiente de desenvolvimento Arduino (Arduino IDE).**
- **Design de circuito RF eficiente:** Design básico de baixo consumo de energia (corrente em modo de espera $\leq 800\mu\text{A}$).

A escolha desse sistema embarcado teve como base suas especificações técnicas, o fato de ele possuir todos os pré requisitos para o projeto e também seu baixo custo de aquisição. Após sua escolha, foi desenvolvido e aprimorado dois códigos diferentes, sendo um intitulado como LoRa Sender e o outro o LoRa *Receiver Gateway*.

3.2 Arduino IDE

A plataforma Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) versão 2.3.4 apresenta-se como uma ferramenta muito completa e moderna para o desenvolvimento de algoritmos em sistemas embarcados que utilizam linguagem C. Com uma interface intuitiva e um vasto suporte a diversas placas microcontroladoras, o Arduino IDE é amplamente utilizado em projetos de Internet das Coisas (IoT) devido à sua acessibilidade, flexibilidade e extensa comunidade de suporte.

A versão 2.3.4 do Arduino IDE trouxe melhorias significativas em comparação às versões anteriores, como a adição de recursos que aprimoraram a experiência do desenvolvedor. Entre os principais avanços estão o suporte integrado ao autocompletar de código, depuração de código (*debugger*) e um gerenciador de bibliotecas mais eficiente. Essas funcionalidades

tornam o ambiente mais dinâmico e ágil, reduzindo erros e promovendo agilidade no desenvolvimento do algoritmo.

Neste projeto, o Arduino IDE 2.3.4 foi escolhido como principal ferramenta devido à sua compatibilidade com o módulo Heltec LoRa 32 V2, uma vez que a empresa Heltec criou as bibliotecas e firmwares compatíveis e os adicionou lá.

Para que os dados enviados sejam recepcionados os dois módulos, tanto o *Sender* quanto o *Gateway Receiver*, precisam contemplar os mesmos parâmetros de rádio LoRa, ou seja, mesma frequência de operação, potência de transmissão, largura de banda, fator de espalhamento, taxa de codificação e comprimento do preambulo. Todos esses parâmetros são *setados* via código no Arduino IDE.

3.2.1 Algoritmo: LoRa Sender

O código LoRa Sender é responsável por receber os dados analógicos dos sensores conectados nos pinos ADC do módulo Heltec LoRa 32 V2, calibrá-los, preparar os dados em formato específico, criptografá-los e enviá-los para o LoRa Receiver Gateway. Ele inclui também um mecanismo de identificação próprio e *handshake* (ACK) para garantir confiabilidade da comunicação. O fluxograma do algoritmo está apresentado por meio da Figura 5.

Os sensores de pressão, vazão e/ou nível estão conectados nos pinos ADC 36 (GPIO36) e 37 (GPIO39), que possuem resolução de 12 bits ($2^{12} = 4096$ níveis de leitura). A leitura é convertida em tensão usando a fórmula:

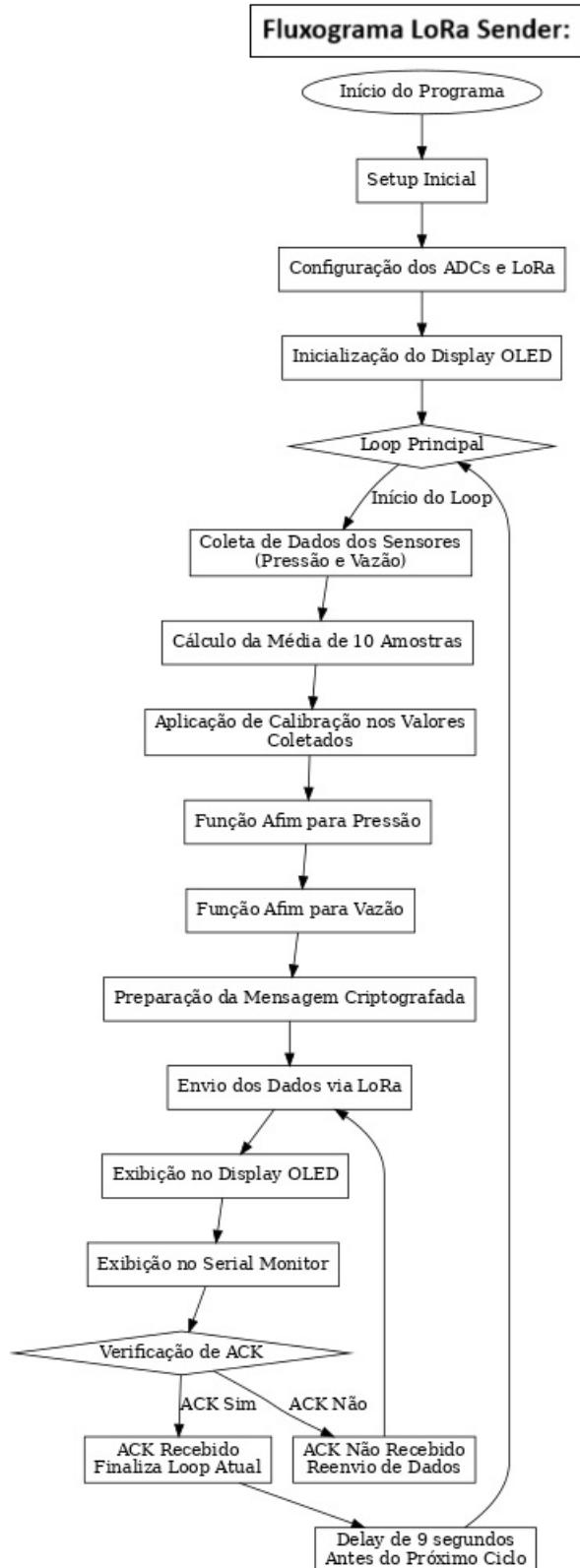
$$Tensao(V) = \frac{Leitura\,ADC}{4096} \cdot 3.3 \quad (3.1)$$

Essa configuração é ideal para aplicações que requerem precisão, pois a resolução de 12 bits fornece maior granularidade na conversão analógica-digital. Há ainda uma atenuação de 11 dB, através da função "analogSettAttenuation()", adicionada no código do LoRa Sender. A atenuação é necessária porque, por padrão, o ADC da ESP32 trabalha em uma faixa limitada (0V a 1,1V), o que pode não ser suficiente para sensores que operam em tensões mais altas. A ESP32 oferece quatro opções de atenuação para aumentar a faixa de entrada do ADC dadas pela tabela 1, disponível em (SYSTEMS, 2021). O que amplia o intervalo de tensão de entrada para aproximadamente 3,3 V, evitando saturação para sensores que operam em altas tensões.

A média das leituras reduzem os ruídos e flutuações, o algoritmo coleta 10 leituras consecutivas e calcula a média, o que melhora a estabilidade dos valores lidos.

- Calibração e Ajuste dos Dados:

Figura 5 – Fluxograma do algoritmo LoRa Sender.



Fonte: o autor

Tabela 1 – Faixa de tensão medida para diferentes níveis de atenuação do ADC da ESP32

Atenuação	Faixa de tensão medida	
ADC_ATTEN_DB_0	100 mV	950 mV
ADC_ATTEN_DB_2_5	100 mV	1250 mV
ADC_ATTEN_DB_6	150 mV	1750 mV
ADC_ATTEN_DB_11	150 mV	2450 mV

A calibração é realizada para ajustar os valores lidos pelo ADC aos valores reais fornecidos por uma fonte de tensão da marca Minipa modelo MPS-3005 ao mesmo tempo que são validados pelo multímetro. O modelo do multímetro utilizado é o Minipa ET-2042F. Isso corrige desvios causados pela não linearidade dos sensores ou do circuito.

A Figura 7 mostra o esquemático do circuito de leitura de tensão provinda da fonte de tensão e também com o módulo Heltec LoRa 32 V2 rodando um código de leitura de tensão para preencher a tabela com os valores de tensão lida e levantamento dos gráficos de calibração e ajuste.

Uma tabela inserida no código, denominada calibrationTable, armazena pares de valores: Tensão lida pelo ADC e a tensão real medida pela fonte de bancada. A calibração utiliza interpolação linear entre dois pontos consecutivos da tabela para encontrar o valor calibrado:

$$Ajuste = V_{real} + inclinação(V_{lido} - V_{lido1}) \quad (3.2)$$

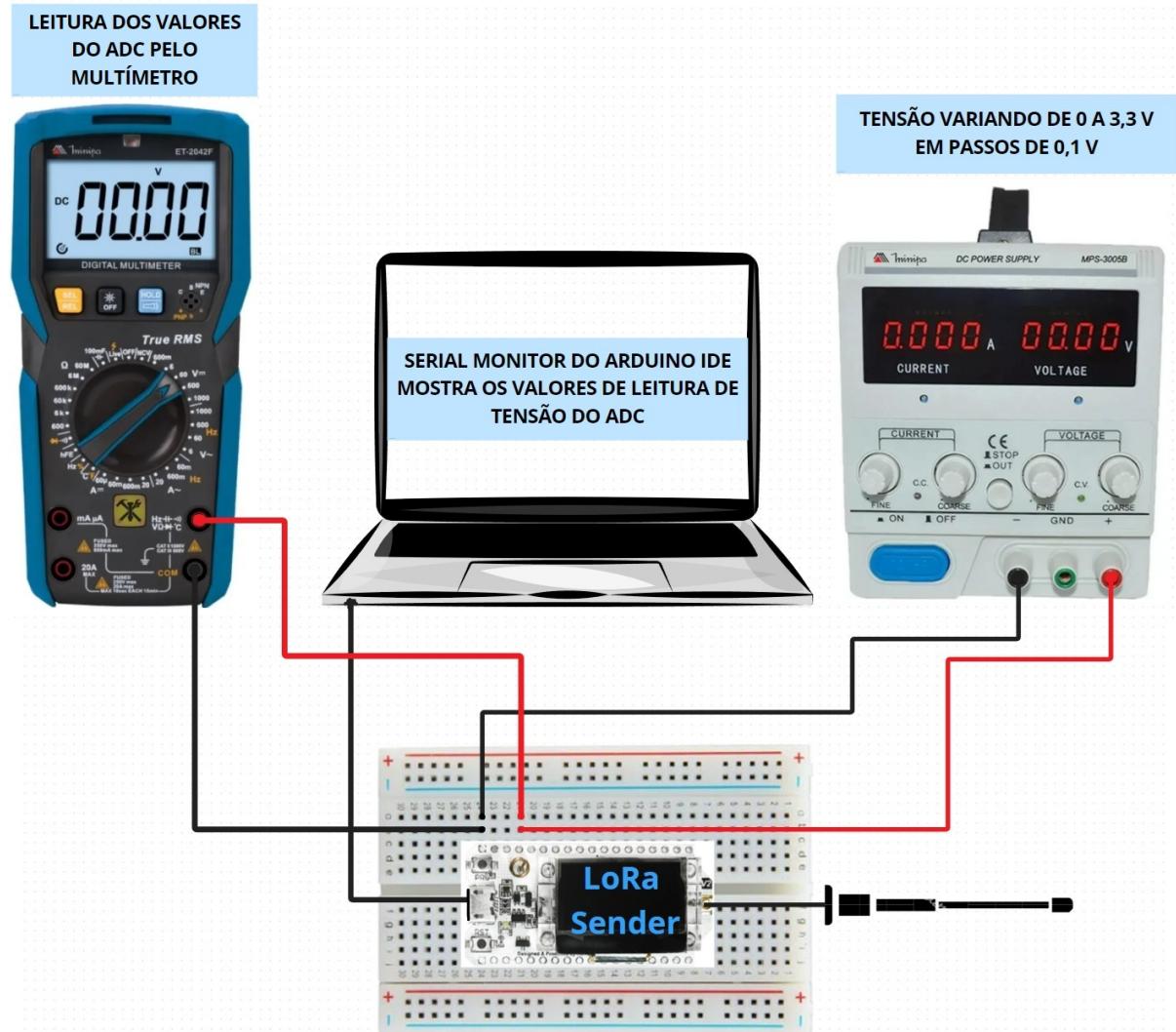
Onde:

$$Inclinação = \frac{V_{real2} - V_{real1}}{V_{lido2} - V_{lido1}} \quad (3.3)$$

Esse método foi escolhido pois garante que os dados ajustados sejam o mais próximos dos valores inseridos pela fonte de tensão.

A Figura 7 apresenta o circuito de conexão dos sensores ao módulo Heltec LoRa 32 V2, projetado para realizar a calibração e o ajuste dos dados adquiridos. No sistema, o sensor utilizado opera em um intervalo de corrente padrão de 4 a 20 mA, característico de sensores industriais. No entanto, como o módulo Heltec realiza medições baseadas em tensão, foi necessário converter o sinal de corrente para um sinal de tensão proporcional. Para isso, foi inserido um resistor de 150 Ω no circuito (3 V/20 mA = 150 Ω).

Figura 6 – Esquemático do circuito de calibração e ajuste dos pinos ADC do módulo Heltec LoRa 32 V2.



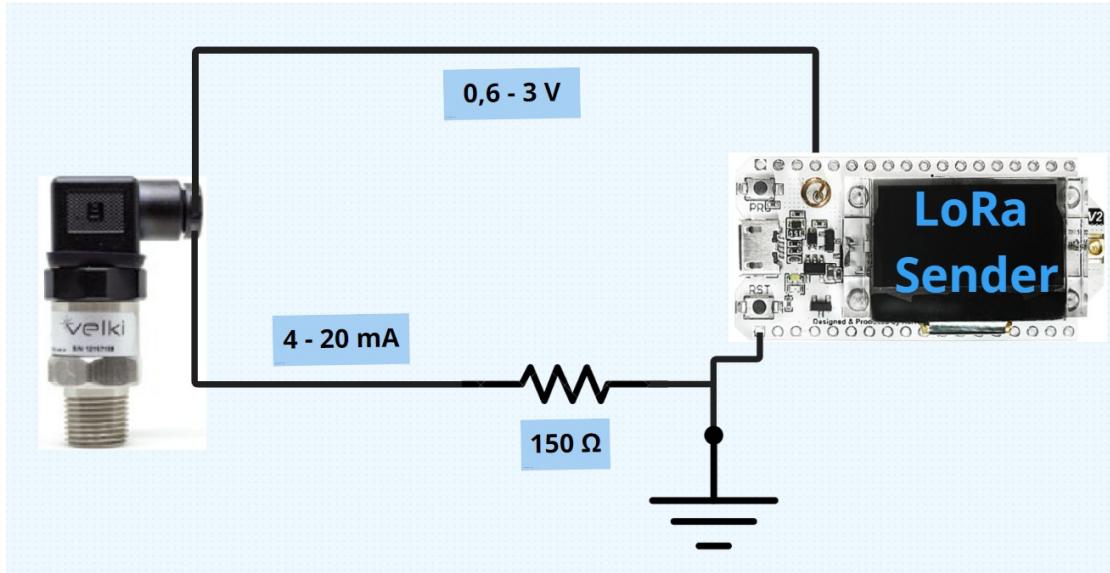
Fonte: o autor.

Após a inserção do resistor, a faixa de corrente é convertida em uma tensão proporcional, variando de aproximadamente 0,6 V a 3 V. Esse intervalo foi escolhido devido à sua maior precisão e menor propensão a erros durante a leitura dos dados pelo conversor analógico-digital (ADC) da ESP32. O intervalo definido está dentro do limite operacional seguro do conversor analógico-digital (ADC) do módulo Heltec, garantindo a integridade dos dados adquiridos.

- **Conversão para Pressão e Vazão**

Após o ajuste de tensão dos pinos ADC, utilizando a tabela de interpolação, os valores obtidos são convertidos para unidades de engenharia (pressão em metros de coluna d’água - mca - vazão em litros por segundo - L/s - e nível em metros - m). Essa conversão é realizada por meio de funções lineares (funções afins), ajustadas para relacionar o intervalo de tensão calibrado com os intervalos operacionais dos

Figura 7 – Montagem do circuito de conexão dos sensores ao módulo Heltec LoRa 32 V2



Fonte: o autor

sensores.

– Função Linear para Pressão:

A função afim que converte a tensão calibrada (V_{calib}) em pressão (P) é dada por:

$$P = \frac{P_{max}}{V_{max} - V_{min}} V_{calib} - P_{max} \frac{V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (3.4)$$

Onde:

P_{max} = valor máximo de pressão do sistema

V_{max} e V_{min} = limites superior e inferior do intervalo de tensão utilizado

V_{calib} = tensão calibrada

A função afim de conversão da tensão calibrada 3.4 é equivalente para vazão (Q) e nível (N).

Embora o ADC da ESP32 seja configurado para operar no intervalo completo de 0 a 3,3 V, os testes realizados com a fonte de tensão revelaram uma limitação significativa nas leituras nos extremos do intervalo. O ADC da ESP32 utiliza arquitetura SAR (Successive Approximation Register), que apresenta precisão limitada nas bordas do intervalo de conversão e leitura de dados.

No **Intervalo Inferior** (0 a 0,4 V) as leituras do ADC ficaram consistentemente abaixo dos valores reais, por exemplo, ao aplicar 0,3 V o adc registrava valores muito próximos de 0 V.

Já no **Intervalo Superior** (3,1 V a 3,3 V) as leituras ficaram acima dos valores reais; por exemplo, ao aplicar 3,15 V, o ADC reportava a leitura de 3,29 ou 3,3 V.

Essas imprecisões tornam o uso desses intervalos inadequado para aplicações que demandam alta fidelidade nas medições. Portanto, a solução adotada foi restringir o intervalo de operação dos sensores, entre 0,6 V a 3 V, onde os testes demonstraram maior precisão e fidelidade nas leituras. Este intervalo foi escolhido por fornecer uma correspondência mais confiável entre os valores aplicados pela fonte e as leituras do ADC.

Com a escolha do intervalo, as funções lineares foram ajustadas para trabalhar exclusivamente dentro do intervalo de tensão confiável. Esse ajuste garante que os valores de pressão e vazão calculados sejam mais precisos, uma vez que o sistema se concentra nas regiões de maior fidelidade do ADC.

Exemplo de conversão:

Se $V_{min} = 0,6$ V, $V_{max} = 3,0$ V e $P_{max} = 50$ mca, para uma tensão calibrada $V_{calib} = 1,8$ V:

$$P = \frac{50\text{mca}}{(3 - 0,6)V} 1,8V - 50\text{mca} \frac{0,6V}{(3 - 0,6)V} = (37,5 - 12,5)\text{mca} = 25\text{mca} \quad (3.5)$$

- **Preparação e Criptografia dos Dados:**

Os dados calibrados de pressão, vazão e/ou nível, são formatados como uma string com um prefixo de identificação do dispositivo, exemplo:

$$\text{Mensagem : "M.S P: x.xx V: y.yy"} \quad (3.6)$$

Onde:

"M.S"= identificador único da LoRa Sender, (3 caracteres fixos).

"P: x.xx"= valor qualquer de pressão, por exemplo: "P: 2.00"(8 caracteres, incluindo espaço e o ponto decimal)

"V: y.yy"= valor qualquer de vazão, por exemplo: "V: 20.00"(9 caracteres)

A string total é então convertida para um *array* de caracteres para transmissão.

- **Criptografia AES-128:**

A criptografia aplicada ao *payload*, como explicado antes, usa o algoritmo AES, com uma chave de 128 bits (16 bytes). Esse algoritmo opera em blocos de 16 bytes e caso, o *payload* não seja múltiplo desse tamanho, é adicionado um preenchimento (padding) para completar o último bloco.

Se a mensagem original for: "M.S P: 2.00 V: 20.00", teremos um total de 20 bytes, neste caso, 20 bytes são expandidos para 32 bytes, ou seja, dois blocos de 16 bytes. Portanto o tamanho total da mensagem criptografada será de 256 bits. A mensagem criptografada é então transmitida pelo LoRa, o que aumenta o tempo no ar proporcionalmente devido ao aumento do *payload*.

A mensagem em ASCII (em hexadecimal) é a seguinte:

$$4d\ 2e\ 53\ 20\ 50\ 3a\ 20\ 32\ 2e\ 30\ 30\ 20\ 56\ 3a\ 20\ 32\ 30\ 2e\ 30\ 30 \quad (3.7)$$

Os 12 bytes adicionais de *padding* (valores 0x00) são incluídos para completar o segundo bloco de 16 bytes:

$$\begin{aligned} &4d\ 2e\ 53\ 20\ 50\ 3a\ 20\ 32\ 2e\ 30\ 30\ 20\ 56\ 3a\ 20\ 32 \\ &\quad 30\ 2e\ 30\ 30\ 20\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00\ 00 \end{aligned} \quad (3.8)$$

A mensagem é então criptografada e transformada em uma sequência de 32 bytes, com valores ilegíveis até serem descriptografados pelo gateway, que possui a mesma chave e o mesmo vetor de inicialização (IV).

O AES-128 segue um processo de 10 rodadas (rounds) de transformação:

– **Substituição Inicial (SubBytes):**

Cada byte do plaintext é substituído por um valor na S-box (Substitution Box), uma matriz de substituição fixa, baseada em operações matemáticas em campos finitos ($GF(2^8)$).

Exemplo: O primeiro byte da mensagem é 0x4d. Consultando a S-Box padrão:

$$S\text{-Box}(0x4d) = 0xf1 \quad (3.9)$$

Resultando após substituir todos os bytes:

$$Plaintext \ apos \ SubBytes : f1\ e2\ 6a\ 10... \quad (3.10)$$

– **Realinhamiento (ShiftRows):**

As linhas da matriz de estado (4x4 bytes) são deslocadas:

Primeira linha: sem mudança

Segunda linha: deslocada 1 byte à esquerda

Terceira linha: deslocada 2 bytes à esquerda

Quarta linha: deslocada 3 bytes à esquerda

Este realinhamento embaralha os bytes para difusão.

– **Mistura de colunas (MixColumns):**

Cada coluna da matriz é multiplicada por uma matriz fixa no campo finito $GF(2^8)$, o que combina os valores e aumenta a complexidade.

Exemplo para a primeira coluna ([f1,e2,6a,10]):

$$\text{Nova Coluna} = \text{Matriz fixa. Coluna atual} \quad (3.11)$$

– **Adição de Chave (AddRoundKey):**

Nesta etapa, a matriz dos dados é combinada com a chave AES usando a operação matemática OU Exclusivo (XOR), ou seja operador lógico que compara dois bits, se os dois bits forem iguais, o resultado é 0, e se forem diferentes o resultado é 1.

Neste contexto do AES, cada byte da matriz de estado é combinado com o byte correspondente da chave usando a operação XOR. Por exemplo, para o primeiro byte da matriz de estado (0xf1) e o primeiro byte da chave (0x00):

$$\text{Resultado} = 0xf1 \oplus 0x00 = 0xf1 \quad (3.12)$$

Outro exemplo, se o byte da matriz de estado for 0x5a e o byte correspondente da chave for 0x3c:

$$\text{Resultado} = 0x5a \oplus 0x3c \quad (3.13)$$

Convertendo para binário:

$$0x5a = 01011010, 0x3c=00111100 \quad (3.14)$$

Operando bit a bit:

$$01011010 \oplus 00111100 = 01100110 \text{ (que é } 0x66 \text{ em hexadecimal)} \quad (3.15)$$

Depois que todos os bytes da matriz de dados são combinados com a chave, a matriz resultante é usada como entrada para a próxima etapa do algoritmo.

Os passos acima são repetidos por 10 rodadas, com uma nova chave derivada em cada rodada a partir de um algoritmo de expansão de chave. No final, a matriz de estado final é o Ciphertext. A mensagem é transformada em:

$$\text{Ciphertext: } a1\ 3b\ c4\ 5d\ 67\ 8e\ 29\ f2\dots \quad (3.16)$$

- **Transmissão dos Dados e *Handshake* (ACK):**

Após a criptografia, os dados são transmitidos pelo LoRa usando os parâmetros configurados. O *handshake* implementa uma troca de mensagens para confirmar a recepção dos dados:

- O sender envia os dados ao gateway.
- O gateway recebe os dados e envia de volta uma mensagem de confirmação de recebimento dos dados.
- Enquanto isso, o Sender aguarda o ACK do Gateway dentro de um intervalo de 5 segundos.
- Se o ACK for recebido, a comunicação é confirmada e o Sender se prepara para mais um loop.
- Caso contrário, os dados são reenviados.

- **Exibição e Depuração:**

O display OLED exibe os valores de pressão e vazão, bem como o status da transmissão e do ACK. Isso facilita a depuração em campo.

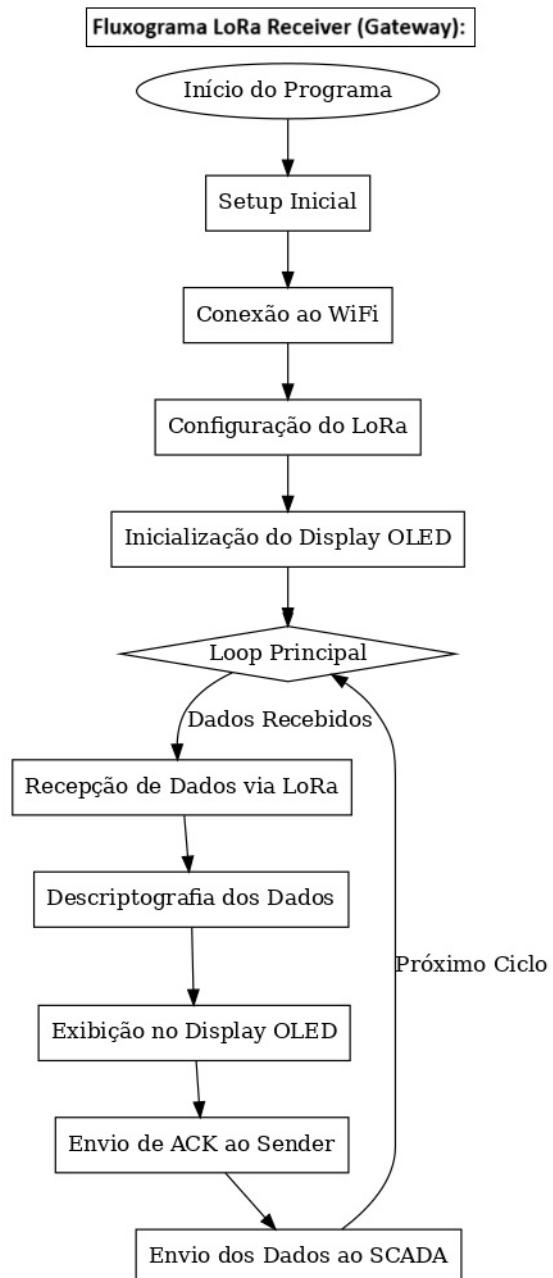
3.2.2 Algoritmo: LoRa Gateway

O algoritmo LoRa Gateway é uma solução integrada que combina conexão Wi-Fi, protocolos HTTP e MQTT quando necessário, comunicação LoRa e integração com o sistema SCADA. Pelo menos 23 versões diferentes foram escritas e muitas delas foram descartadas, para se atingir então, a versão final implementada do algoritmo atualmente, a qual está descrita por meio de um fluxograma apresentado na Figura 8.

- **Bibliotecas Utilizadas:**

- **Wire.h e Arduino.h:** fornecem suporte básico à comunicação entre dispositivos e a base para programação no ambiente Arduino.
- **Wifi.h e HTTPClient.h:** Facilitam a conexão do ESP32 à rede Wi-Fi e o envio de dados para o servidor SCADA via protocolo HTTP.
- **LoRaWan_APP.h:** Biblioteca introduzida para configurar e gerenciar a comunicação LoRa, essencial para operações robustas em redes de longa distância.
- **HT_SSD1306Wire.h:** Responsável pelo controle do display OLED, permitindo a exibição de informações do sistema, como status da conexão e dados recebidos.

Figura 8 – Fluxograma do algoritmo LoRa Receiver Gateway.



Fonte: o autor

- **AESLib.h:** Implementa a descriptografia AES, garantindo segurança na troca de dados.
- **Configurações do LoRa:** Os parâmetros do rádio LoRa foram configurados para maximizar a eficiência e o alcance da comunicação.
 - **Frequência de Operação (RF_Frequency): 915 MHz**

É a faixa de canais de frequência central da transmissão do LoRa. Essa frequência é regulamentada no Brasil para aplicações ISM (*Industrial Scientific, and Medical*), sendo ideal para LoRa. A escolha de 915 MHz oferece um equilíbrio entre penetração de obstáculos e alcance de sinal.
 - **Potência de Transmissão (TX_OUTPUT_POWER): 14 dBm**

É a potência do sinal de saída do transmissor, geralmente medida em decibéis-miliwatt. O limite aconselhado pela ANATEL para LoRa na faixa de 900 MHz é de 14 dBm. Quanto maior a potência aumenta o alcance de comunicação, mas também aumenta o consumo de energia e pode causar interferências.
 - **Largura de Banda (LORA_BANDWIDTH): 125 kHz**

A largura de banda é a quantidade máxima de dados que podem ser transmitidos e proporciona alta sensibilidade no receptor favorecendo longas distâncias.

125 kHz (banda estreita): padrão para longas distâncias e baixa taxa de dados.

250 kHz (banda média): compromisso entre distância e taxa de dados.

500 kHz (banda larga): para maiores taxas de dados porém possui menor alcance de distância.
 - **Fator de Espalhamento (LORA_SPREADING_FACTOR): 7 a 12**

Controla a relação entre a taxa de dados e a robustez da comunicação. Um fator de espalhamento menor (SF) reduz o tempo no ar dos pacotes, favorecendo maior taxa de dados. O cálculo do tempo no ar será mostrado abaixo.

SF menor (ex: 7): Maior taxa de dados, menor alcance e menor sensibilidade.

SF maior (ex: 12): Menor taxa de dados, maior alcance e maior sensibilidade.
 - **Taxa de Codificação (LORA_CODINGRATE): 4/5**

Determina o número de bits adicionados para correção de erros (FEC = Forward Error Correction). Definindo assim, a quantidade da redundância nos pacotes transmitidos para corrigir erros de transmissão.

Valores comuns: 4/5, 4/6, 4/7, 4/8

CR menor (4/5): Maior taxa de dados, menor proteção contra erros.

CR maior (4/8): Menor taxa de dados, maior robustez contra ruídos e interferências com baixo impacto na largura de banda útil.

– **Comprimento do Preambulo (LORA_PREAMBLE_LENGTH): 8**

Número de símbolos enviados antes dos dados úteis da transmissão. Ele permite que os receptores detectem e sincronizem a transmissão balanceando a sincronização rápida com o receptor e estabilidade em ambientes ruidosos.

Valores típicos: de 6 a 12 símbolos, sendo 8 um valor comum.

Preâmbulo curto: Reduz o tempo de detecção.

Preâmbulo longo: Melhora a robustez da detecção.

- **Cálculo do Tempo no Ar dos Dados:**

O ToA, também conhecido como Tempo no Ar, é o tempo esperado em que os dados trafegam no ar, do TX (rádio transmissor dos dados) ao RX (rádio receptor dos dados) e é crítico para evitar colisões nos envios de dados em redes LoRa e garantir sua eficiência de comunicação. A fórmula do ToA pode ser acessada em (CORPORATION, 2021) e é dada por:

$$ToA = T_{preamble} + T_{payload}, \quad (3.17)$$

$T_{preamble}$: tempo necessário para enviar o preâmbulo

$T_{payload}$: tempo necessário para enviar o *payload*

Onde o $T_{preamble}$ é dado por:

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25)T_{sym}, \quad (3.18)$$

Sendo:

$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}$: tempo de símbolo ou o tempo necessário para a transmissão de um único símbolo LoRa, o qual poderá ser diferente a depender do Fator de Espalhamento (SF) e Largura de Banda (BW).

$n_{preamble}$ é o comprimento do preâmbulo, *setado* via código.

A fórmula a seguir fornece o número do *Payload* ou carga útil dos símbolos:

$$n_{payload} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right\rceil (CR + 4), 0 \right) \quad (3.19)$$

Onde:

PL: é o número do *payload* em bytes (1 a 255).

SF: Fator de Espalhamento (6 a 12).

IH = 0: quando o *header* estiver habilitado e o IH = 1 quando o *header* não estiver presente.

DE = 1: quando LowDataRateOptimize = 1 e DE = 0 para outros casos.

CR = é a taxa de codificação (1 corresponde a 4/5, 4 a 4/8).

A duração da carga útil ou *Payload*, é então o período do símbolo multiplicado pelo número de símbolos do *Payload*:

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_{sym} \quad (3.20)$$

Portanto, para um *payload* de 64 bytes:

Largura de banda = 125 kHz.

SF = 7.

Preâmbulo = 8.

Taxa de codificação = 1 = 4/5.

Low data rate optimization = No. (habilitado para Largura de Banda de 125 kHz e Fator de Espalhamento de >=11)

Cálculo:

$$ToA = 87,3ms. \quad (3.21)$$

Levando em consideração o fato de que os dados estão sendo enviados a cada 10 segundos, este ToA é suficiente e serve como referência da comunicação dentro das margens toleradas para minimizar interferências. E pode ser totalmente diferente a partir da mudança dos parâmetros. A calculadora do ToA também está disponível em (CORPORATION, 2025).

- **Estrutura do Algoritmo:**

O algoritmo é dividido em três partes principais:

- **Inicialização:**

Configura o Wi-Fi para conexão com a rede local.

Iniciaiza o rádio LoRa com os parâmetros mencionados.

Configura o display OLED para exibir mensagens de status.

– **Recepção de Dados (OnRxDone):**

Descriptografa o *payload* recebido usando a criptografia AES-128.

Extrai os dados de pressão, vazão e/ou nível, exibindo-os no display OLED e no monitor serial.

Calcula e armazena os valores de RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), indicando a qualidade do sinal.

– **Envio de Resposta e Dados para o SCADA:**

Após receber os dados, envia um pacote de confirmação (ACK) ao dispositivo sender para garantir a confiabilidade da comunicação.

Transmite os dados de pressão e vazão ao servidor SCADA via protocolo HTTP.

– **Integração com o SCADA:**

Os dados são enviados ao SCADA por meio de requisições HTTP GET. Essa opção simplifica a integração com os servidores web padrão e facilita a depuração.

O algoritmo desenvolvido representa o início de várias atualizações que estão sendo implementadas ao longo da necessidade de cada localidade a serem instalados. As escolhas dos parâmetros do LoRa e as configurações do sistema foram otimizadas para cada cenário de instalação, para garantir eficiência na transmissão e recepção de dados.

3.3 Sensores

Os sensores utilizados no projeto desempenham um papel muito importante no monitoramento dos sinais coletados em redes de distribuição e reservatórios de água. Os dados capturados por esses sensores são conectados aos pinos ADC do módulo Heltec LoRa 32 V2, permitindo a aquisição, processamento e transmissão eficiente das informações para o sistema supervisório SCADA. Abaixo, detalha-se o funcionamento e a importância de cada tipo de sensor.

Todos os sensores mencionados a seguir operam dentro de intervalos de tensão calibrados (0,6 V a 3 V), garantindo maior precisão nas leituras. A escolha desses sensores foi baseada em critérios como robustez, valor e compatibilidade com o ADC do ESP32 embarcado no módulo, assegurando que o sistema opere de forma confiável mesmo em condições adversas.

3.3.1 Sensor de Pressão

Os sensores de pressão monitoram a pressão da água em tubulações e reservatórios, garantindo o funcionamento adequado da rede de distribuição. Esses sensores convertem a pressão exercida pelo fluido em um sinal elétrico proporcional, geralmente na forma de

uma tensão analógica e alguns modelos em forma de corrente elétrica. Esse sinal é então lido pelo ADC da LoRa 32 V2 e convertido em valores utilizáveis por meio de calibração.

Portanto, o sensor de pressão é fundamental para detectar anomalias, como quedas de pressão que podem indicar vazamentos ou bloqueios na tubulação. Além disso, ele permite verificar se a pressão se mantém dentro dos parâmetros operacionais desejados, garantindo a segurança e eficiência do sistema.

A CAGEPA utiliza o Transmissor de Pressão Mini VK011 IP65, da fabricante Velki, o qual possui um design bem compacto e foi projetado para atender às aplicações industriais e resolver os desafios de pequenos espaços com precisão e eficiência. Sua construção é totalmente em AISI316L, o que torna compatível com a maioria dos processos industriais. Apresenta eletrônica microcontrolada, com componentes SMD e de acordo com o fabricante, o sensor possui tecnologia exclusiva, da compensação de temperatura, o que torna uma excelente opção para diferentes demandas da indústria.

Figura 9 – Detalhes do sensor



Fonte: Manual do sensor, disponível em (VELKI, 2020), adaptado pelo autor

Seu princípio de funcionamento é do tipo piezoresistivo, portanto mede a pressão das tubulações através de um componente chamado diafragma, que fica em contato direto com o fluido. Conforme a pressão varia, o diafragma é pressionado com intensidade proporcional. Um pequeno sensor localizado na parte interna do diafragma converte a variação de pressão em uma variação de resistência elétrica equivalente. Um pequeno circuito eletrônico transforma essa informação em um sinal de corrente de 4-20 mA ou tensão de 0 a 10 Vcc ou 0 a 5 Vcc, compatível com praticamente todos os dispositivos de automação como CLPs, indicadores digitais, módulos ESDs, Arduinos e outros. A Figura 9 mostra detalhes do sensor e a Figura 10 mostra a tabela de dados técnicos do sensor:

Figura 10 – Tabela de dados técnicos sensor de pressão VK011



DADOS TÉCNICO IP68

Tipo de sensor	Piezoresistivo		
Faixa de medição	-1...0BAR	0...0,1BAR até 0...250BAR	
Precisão	+/- 0,25%F.E. (incluso hysteresis e repetibilidade)		
Estabilidade	Faixa de medição > 2 BAR = 0,1...0,2%FE		
	Faixa de medição ≤ 2 BAR = 2...4mBAR		
Sobrepressão	Conforme tabela		
Material do diafragma	Aço Inoxidável AISI-316L		
Óleo de preenchimento do sensor	Padrão silicone, outros disponíveis		
Temperatura do fluido	-40°...100°C		
Temperatura ambiente	-10°...80°C		
Material do invólucro	Aço Inoxidável AISI-316L		
Grau de proteção	IP65		
Conexão elétrica tipo	DIN43650		
Cabo de comunicação	Confeccionado em PVC (*Opcional)		
Material da conexão	Aço Inoxidável AISI-316L		
Conexão ao processo	1/4"BSP , 1/4"NPT , 1/2"BSP , 1/2"NPT , 3/4"BSP , 3/4"NPT e outros		
Material em contato com o processo	Aço Inoxidável AISI-316L + O'ring em FPM (fluorocarbono), outras combinações de materiais disponíveis.		
Sinal de saída	4...20mA	0...10VCC	0...5VCC
Limite sinal de saída	3.2...22.3mA	-1.2...11.2V	-0,6...5,6V
Alimentação	8...32VDC	13...32VDC	8...32VDC
Resistência de carga	<(U-8) / 0.025 A	> 5kΩ	> 5kΩ
Limite de frequência	2kHz	2kHz	2kHz
Consumo de energia	Max. 24mA	Max. 5mA	Max. 5mA
Tempo de resposta	(0-99%) < 5ms		
Compatibilidade eletromagnética	EN 61000-6-2: 2005 EN 61000-6-3: 2005 EN 61326-2-3: 2006		

Fonte: Manual do sensor, página 2, disponível em (VELKI, 2020)

3.3.2 Sensor de Vazão

O sensor de vazão mede a quantidade de água que passa por uma tubulação em um intervalo de tempo, geralmente em litros por segundo (L/s) mas também em metros cúbicos por hora (m^3/h). Esses sensores utilizam diferentes tecnologias, como turbinas, sensores ultrassônicos ou eletromagnéticos, para gerar um sinal proporcional à vazão.

Esse monitoramento contínuo da vazão é essencial para o controle operacional, permitindo identificar alterações no consumo ou possíveis fugas.

A CAGEPA utiliza dois modelos de medidores de vazão, sendo eles: Medidor de Vazão Ultrassônico Fixo Clampflow da empresa Sanesoluti e o Medidor de Volume/Vazão Ultrassônico Carretel a Bateria R500 Ultramag também da empresa Sanesoluti e ambos os modelos são fabricados na China, portanto outras empresas do ramo também podem ter acesso e revendê-los.

- **Medidor de Vazão Ultrassônico Clamp-On Fixo – Clamp-Flow:** O instrumento atende a uma grande faixa de diâmetros de tubulação (15 a 6000 mm) e possui instalação do tipo “clamp-on”, onde os sensores são instalados externamente à tubulação sem que haja contato com o líquido ou serviço de intervenção para a montagem. O sensor de vazão e a sua aplicação nas tubulações são demonstradas na Figura 11.

Figura 11 – Medidor de vazão Clamp-On Fixo – Clamp-Flow



Fonte: adaptado de (SANESOLUTI, 2022b) pelo autor.

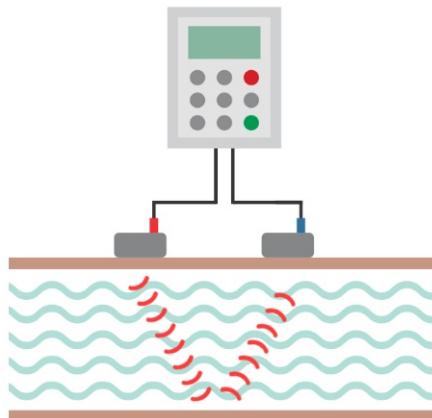
O princípio de funcionamento do sensor é na utilização dois transdutores montados na parede externa da tubulação que emitem e recebem pulsos de ultrassom ao longo da seção da tubulação para determinação da velocidade de escoamento do fluido. Quando um sinal ultrassônico é transmitido ao longo da seção de uma tubulação por um líquido fluindo, há uma diferença entre o tempo de propagação (ou trânsito) de um transdutor até o outro dependendo do sentido do fluxo.

A Figura 12 demonstra seu funcionamento; Uma onda ultrassônica que acompanha o mesmo sentido do fluxo aumenta sua velocidade de propagação, enquanto, a onda ultrassônica que se propaga no sentido oposto ao do fluxo diminui a sua velocidade de propagação. Se a diferença entre os dois tempos de propagação (ou trânsito) forem medidos com precisão, é possível determinar a velocidade de escoamento deste fluxo e, por consequência, a sua vazão. As especificações técnicas do sensor estão disponíveis na Tabela 2.

- **Vazão Ultrassônico Carretel a Bateria R500 – Ultramag**

De acordo com (SANESOLUTI, 2022a), o medidor de Volume/Vazão Ultrassônico Carretel a Bateria R500 Ultramag é uma inovação tecnológica no campo da medição de líquidos, oferecida pela Sanesoluti ao mercado nacional. Este dispositivo combina a precisão dos medidores de vazão eletromagnéticos com um custo competitivo

Figura 12 – Princípio de funcionamento do medidor de vazão Clamp-On Fixo – Clamp-Flow



Fonte: adaptado de (SANESOLUTI, 2022b) pelo autor.

Tabela 2 – Especificações técnicas do sensor de vazão Clamp-On Fixo Clamp-Flow

Especificação	Valor/Informação
Faixa de medição	-12 a 12m/s (bidirecional)
Precisão	$\pm 1\%$ da medição
Repetibilidade	$\pm 0,2\%$
Protocolos	Modbus
Temperatura de trabalho	-10°C a 70°C
Alimentação	24 Vcc ou 110/220 Vca
Registro de dados	Opcional, via cartão de memória SD
Saídas	4-20 mA, relé pulsos, RS485
Transdutores	Clamp on: P: Diâmetros de 15 a 100 mm M: Diâmetros de 50 a 700 mm G: Diâmetros de 300 a 6000 mm

Fonte: adaptado de (SANESOLUTI, 2022b) pelo autor.

semelhante ao dos medidores Woltmann, proporcionando uma solução eficiente e econômica para diversas aplicações.

Ele é capaz de operar em condições extremas de temperatura e pressão. É equipado com baterias de longa duração, oferecendo flexibilidade de instalação, especialmente em locais sem acesso fácil à rede elétrica.

O R500 Ultramag também utiliza a tecnologia ultrassônica para medir a vazão de líquidos, ou seja, emissão e recepção de pulsos ultrassônicos que atravessam o fluido em movimento. Ao medir o tempo que esses pulsos levam para percorrer uma distância conhecida, o medidor calcula com precisão a velocidade do fluxo e, consequentemente, a vazão volumétrica. A ausência de partes móveis no sensor reduz significativamente a necessidade de manutenção e elimina problemas comuns de

desgaste mecânico. A Figura 13 apresenta o medidor de vazão R500 Ultramag.

Figura 13 – Sensor de vazão ultrassônico R500 - Ultramag



Fonte: (SANESOLUTI, 2022a)

Portanto, os medidores Ultramag R500 e Clamp-Flow são dispositivos avançados para medição de vazão em redes de distribuição de água e sistemas industriais. Contudo, apresentam diferenças significativas no tipo de alimentação e configuração das suas saídas, que influenciam nas aplicações destinadas.

O Clamp-Flow possui uma saída de sinal no padrão 4-20 mA que é ativa, o que significa que o medidor fornece a corrente necessária para o funcionamento dessa saída. Para isso, ele requer uma fonte de alimentação externa, geralmente de 12-24 VDC. A dependência de uma fonte externa torna o ClampFlow ideal para aplicações industriais onde energia elétrica está prontamente disponível. No entanto, o consumo de energia relativamente elevado limita seu uso em ambientes remotos ou onde há restrições de infraestrutura elétrica.

Por outro lado, o Ultramag R500 é um medidor equipado com uma bateria interna de longa duração e um gerador interno que utiliza o fluxo de água para recarregar a bateria. Isso garante a operação autônoma do dispositivo, tornando-o ideal para aplicações em locais remotos. No entanto, sua saída 4-20 mA é passiva, o que significa que ela não fornece energia para o circuito externo. Nesse caso, é necessário conectar uma fonte de alimentação externa de 12-24 VDC para que essa saída funcione corretamente, uma vez que a bateria interna não é capaz de alimentá-la diretamente. A Tabela 3 destaca esses detalhes comparativos.

Tabela 3 – Comparaçāo Resumida - Clamp-Flow e RG500

Característica	Clamp-Flow	Ultramag R500
Tipo de saída	Ativa (4-20 mA)	Passiva (4-20 mA)
Fonte de alimentação	Necessária (12-24 VDC)	Sim para a saída 4-20 mA
Energia interna	Não possui	Bateria e recarga via fluxo
Aplicação	Ambientes com energia disponível	Locais de difícil acesso

Fonte: Adaptado pelo autor de (SANESOLUTI, 2022a) e (SANESOLUTI, 2022b)

3.3.3 Sonda de Nível

A sonda de nível monitora a altura da coluna de água em reservatórios ou tanques. Ele é usado para assegurar que o nível de água permaneça dentro de limites seguros, evitando transbordamentos ou esvaziamentos críticos. Os sensores de nível utilizados podem ser do tipo resistivo, ultrassônico ou baseado em pressão hidrostática, dependendo das características da aplicação.

Ao ser conectado ao ADC da Heltec LoRa 32 V2, a sonda de nível fornece leituras que são processadas e calibradas para entregar com precisão o nível de água, bem como no caso da medição de pressão e vazão. Essa informação é imprescindível para o controle automático de bombas e válvulas em reservatórios e mananciais, garantindo a distribuição eficiente de água na rede.

Sendo muito utilizadas em leitura de profundidade / nível em reservatórios de qualquer natureza, monitoração ambiental, saneamento, condomínios, hidráulica, Estações de tratamento de esgoto (ETE), lagoas de decantação e medição de nível em produtos corrosivos. Ela possui alto desempenho em esgoto e água salgada, proteção IP68, portanto não há entrada de água e também proteção embarcada contra surtos, raios e transiente.

Figura 14 – Sonda de nível VKL-213



Fonte: (VELKI, 2021b)

A CAGEPA opta por utilizar a Sonda de Nível VKL-213 da empresa Velki, que bem

como o sensor de pressão apresentado anteriormente, possui o princípio de funcionamento muito similar, por piezoresistividade. É uma sonda de nível construída em teflon, possui microcontrolador com componentes SMD embarcado, contempla também a tecnologia da compensação de temperatura, permitindo sua utilização em diferentes demandas da indústria. Cabo especial com compensação da pressão atmosférica.

Figura 15 – Especificações técnicas Sonda de Nível VK-213

DADOS TÉCNICO IP68	
Tipo de Sensor	Piezoresistivo
Faixa de Medição	0...1MCA À 0...100MCA
Precisão	+/-0,25%F.E. (Incluso hysterese e repetibilidade)
Estabilidade	0,1 ... 0,2% F.E.
Sobrepressão	1,5 x F. E.
Material do Diafragma	Aço Inoxidável AISI-316L
Óleo de preenchimento do Sensor	Padrão Silicone, outros disponíveis
Temperatura do Fluido	-40°C...50°C
Temperatura do Ambiente	-10°C...80°C
Material do Invólucro	TEFLON
Grau de Proteção	IP68
Conexão Elétrica Tipo	Prensa Cabo em Teflon
Cabo de Comunicação	Confeccionado em PVC ou Poliuretano Ventilado
Material em Contato com o Processo	Aço Inoxidável AISI-316L + O'ring em FPM (fluorocarbono), outras combinações de Materiais Disponíveis.
Sinal de Saída	4...20mA (a 2fios)
Limite Sinal de Saída	3,2...22,3mA
Alimentação	8...32VCC
Resistência de Carga	< (U-8) / 0,025 A
Limite de Frequência	2kHz
Consumo de Energia	Max. 24mA
Tempo de Resposta	(0-99%) < 5ms
Compatibilidade Eletromagnética	EN 61000-6-2: 2005 EN 61000-6-3: 2005 EN 61326-2-3: 2006

Fonte: Datasheet, disponível em (VELKI, 2021a), página 2

Uma vez que sonda de nível VKL-213, Figura 14, utiliza um princípio piezoresistivo para determinar o nível de líquidos. Ele mede a pressão que o líquido exerce sobre o sensor piezoresistivo, o mesmo contém um diafragma e a deformação do diafragma altera as propriedades elétricas internas do material, especificamente a resistência, que é então convertida em um sinal elétrico proporcional ao nível do líquido. O qual é capaz de detectar variações mínimas. Essas alterações são convertidas em sinais elétricos, como correntes no padrão de 4 a 20 mA ou tensões de 0 a 5 V ou 0 a 10 V. A Figura 14 mostra as especificações técnicas da sonda.

3.4 Antenas

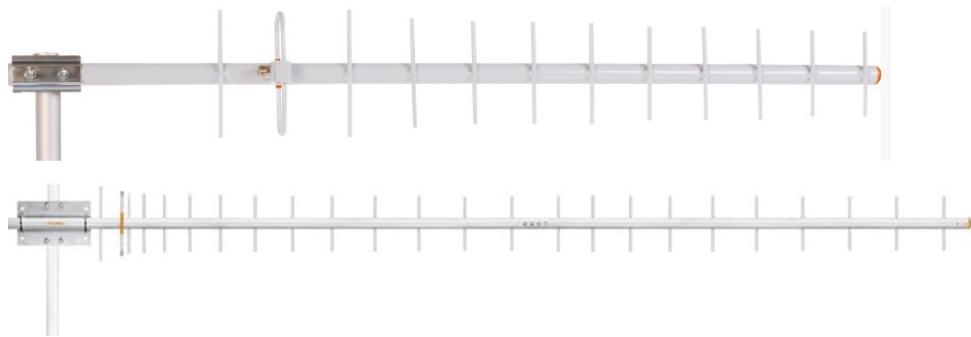
Tão importante quanto a escolha do sistema integrado, é a escolha do par de antenas adequado para garantir a eficiência da comunicação via LoRa. As antenas utilizadas, modelo Yagi CF914 e CH920, Figura 16, foram selecionadas devido às suas características de alto desempenho e adequação às condições específicas da aplicação.

A antena Yagi é uma antena direcional que utiliza múltiplos elementos paralelos (diretores, refletor e dipolo) para concentrar a energia do sinal em uma direção específica. Essa configuração resulta em uma propagação otimizada para distâncias maiores e melhor penetração em obstáculos, como vegetação e edificações.

No caso da Yagi CF914, o feixe principal apresenta ângulos de abertura de 40° no plano E e 46° no plano H, proporcionando uma cobertura controlada e concentrada. Esse comportamento é particularmente útil em aplicações de longa distância, onde a dispersão do sinal precisa ser minimizada.

As antenas Yagi apresentam um padrão de irradiação direcional, como apresentado na Figura 17, concentrando a energia em uma direção principal. Os diagramas de radiação mostram que o lóbulo principal é significativamente mais intenso que os lóbulos secundários, demonstrando a capacidade da antena de minimizar interferências laterais e traseiras. Essa característica é essencial para reduzir a interferência de sinais indesejados e garantir uma comunicação confiável em redes de telemetria.

Figura 16 – Antena CF914 Yagi de 14 dBi e 20 dBi - 900 MHz

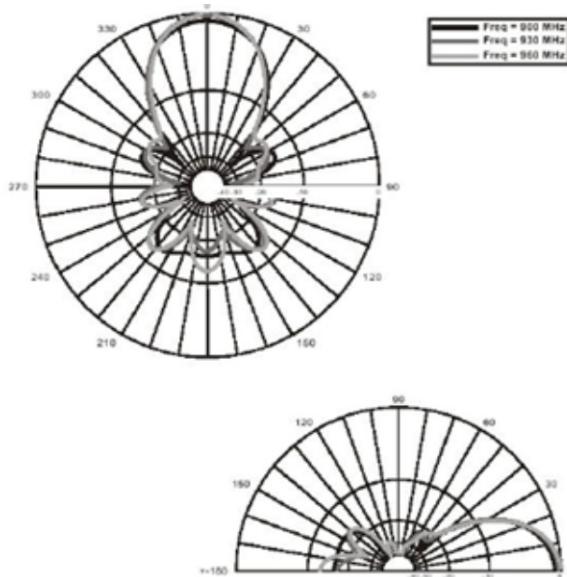


Fonte: disponível em (Alfacomp, 2025)

No caso do LoRa, que opera na faixa de 900 MHz, a qualidade da antena impacta diretamente a cobertura, o alcance e a estabilidade da conexão. A antena Yagi CF914 foi selecionada por apresentar ganho elevado de 14 dBi, fundamental para ampliar a área de cobertura em ambientes rurais e urbanos, onde as condições de propagação podem ser desafiadoras devido a obstáculos naturais e construções.

A antena Yagi CF914 é projetada para operar na faixa de 900 a 960 MHz e a Yagi CF920 é projetada para 890 MHz à 960 MHz, ideal para aplicações de IoT e telemetria. Suas principais especificações estão disponíveis em (Alfacomp, 2025) e incluem:

Figura 17 – Irradiação da antena CF914 Yagi de 14 dBi - 900 MHz



Fonte: disponível em (Alfacomp, 2025)

- **Ganho:** 14 dBi e 20 dBi, proporcionando uma amplificação significativa do sinal na direção desejada.
- **Impedância:** 50 ohms, garantindo compatibilidade com os módulos Heltec LoRa 32 V2.
- **Polarização:** Linear, com opções de polarização vertical ou horizontal, permitindo flexibilidade de instalação.
- **Relação Frente/Costa:** 15 dB e 20 dB, reduzindo interferências provenientes de sinais na direção oposta.
- **Relação de Onda Estacionária (R.O.E.):** Inferior a 2:1, assegurando baixa perda de retorno e eficiência na transferência de energia entre o transmissor e a antena.
- **Dimensões e Peso:** Comprimento de 116 cm e peso de 720 gramas. A CF920 possui comprimento de xx cm e 2,22 kg, facilitando sua instalação em diferentes locais, inclusive áreas remotas.
- **Resistência ao Vento:** Até 150 km/h e 50 km/h, respectivamente, garantindo robustez em condições climáticas adversas.

A escolha das antenas Yagi CF914 e CF920 para este projeto foi fundamentada em sua capacidade de oferecer o desempenho esperado na transmissão e recepção dos sinais e com características técnicas otimizadas para a faixa de 900 MHz juntamente, com o ganho, impedância, R.O.E. e padrões de irradiação.

3.5 Perfil de Visada

O levantamento do perfil de visada é o primeiro passo do planejamento e implantação de sistemas de comunicação via rádio, como o LoRa, na prática, que dependem de links confiáveis para a transmissão de dados. Este teste visa avaliar a existência de uma linha de visada clara entre o transmissor e o receptor, garantindo que as condições de propagação do sinal sejam adequadas e que as perdas na comunicação sejam minimizadas.

O perfil de visada é a análise do perfil topográfico entre dois pontos de comunicação, verificando se há obstáculos físicos ou interferências no trajeto do sinal, ou seja, uma simulação da viabilidade de comunicação entre os dois rádios que serão instalados. Ele considera elementos como relevo, edificações, vegetação e curvatura da Terra, além de parâmetros técnicos dos equipamentos, como potência de transmissão, ganho das antenas e frequência de operação.

Para o projeto, utilizou-se a ferramenta LinkCalc, (LIGOWAVE, 2025), que oferece uma interface para calcular o perfil de visada. Essa plataforma permite:

- Inserir parâmetros personalizados, como altura das antenas, frequência de operação e ganho.
- Configurar rádios da empresa mas também customizados, como o LoRa.
- Obter gráficos detalhados do perfil de terreno e verificar possíveis obstruções.

A assinatura para uso do LinkCalc foi cortesia da empresa WebLine Telecom (WEBLINE, 2025), destacando a colaboração no desenvolvimento do teste de visada de cada localidade presente neste trabalho.

Os elementos do teste de visada são:

- **Modo PtP (Point-to-Point):** O modo ponto a ponto é utilizado para estabelecer a comunicação direta entre dois rádios. Este modo é essencial para avaliar a qualidade do link entre um transmissor e um receptor sem interferências externas de outros dispositivos na rede.
- **Altura das Antenas:** A altura das antenas em relação ao nível do solo é crítica para evitar obstruções no trajeto do sinal. Antenas mais altas têm maior probabilidade de alcançar uma linha de visada desobstruída, especialmente em terrenos irregulares.
- **Ganho das Antenas:** O ganho da antena, medido em dBi, indica sua capacidade de concentrar a energia do sinal em uma direção específica. Antenas de maior ganho são preferíveis para comunicações de longo alcance, como as realizadas via LoRa.

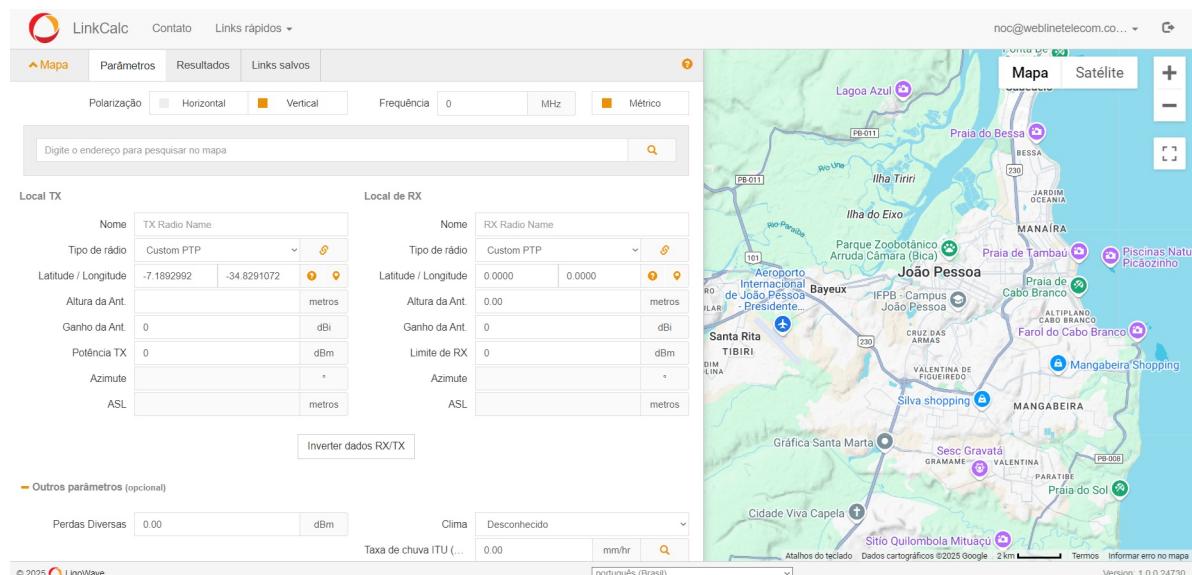
- **Limite de RX:** O limite de recepção (RX_{lim}) é a sensibilidade do receptor, geralmente expressa em dBm. É o menor nível de potência do sinal que o receptor consegue decodificar de forma confiável. Este parâmetro é essencial para determinar a viabilidade do link.
- **Potência de Transmissão (TX):** Representa a energia emitida pelo transmissor, medida em dBm. A potência do TX, combinada com o ganho da antena, influencia diretamente o alcance e a qualidade do sinal.
- **Azimute:** É o ângulo de orientação horizontal da antena em relação ao norte geográfico. O alinhamento correto do azimute é crucial para maximizar o acoplamento entre as antenas transmissora e receptora.
- **ASL (Above Sea Level):** A altura dos pontos de transmissão e recepção acima do nível do mar afeta o alcance do sinal, especialmente em terrenos montanhosos. Valores elevados de ASL geralmente resultam em menos obstruções.
- **Perdas Diversas em dBm:** As perdas no trajeto incluem atenuações causadas por obstáculos físicos, interferência atmosférica e outros fatores. A análise dessas perdas permite calcular a margem de link necessária para garantir uma comunicação estável.
- **Polarização da Antena:** As antenas podem operar com polarização vertical ou horizontal. No LoRa, a polarização deve ser consistente entre as antenas para maximizar a eficiência da comunicação, ou seja, se a antena do rádio Sender estiver apontada verticalmente, a antena do rádio Gateway Receiver também precisa estar apontada verticalmente, o mesmo vale para o apontamento horizontal. Caso contrário, pode haver perda de sinal, dado o fato de que a potência máxima dos rádios LoRa permitida em solo nacional é baixa, cerca de 14 dbm, o que equivale a mais ou menos 25,12 mW.
- **Frequência de Operação:** A frequência de operação determina as características de propagação do sinal. No LoRa, segundo a (ANATEL, 2023) (Agência Nacional de Telecomunicações), que é o órgão governamental que aprova o Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita e altera o Regulamento dos Serviços de Telecomunicações, o Regulamento de Gestão da Qualidade do Serviço de Comunicação Multimídia, e o Regulamento do Serviço Limitado Privado, a faixa permitida em território nacional é de 902 MHz à 907,5 MHz e de 915 MHz à 928 MHz, as faixas de 907,6 MHz à 914,9 são reservadas para utilização de GSM.
- **E.I.R.P. (Potência Equivalente Isotropicamente Radiada):** É a potência efetiva emitida em uma direção específica, levando em conta o ganho da antena e a potência de transmissão. Este valor é limitado por regulamentações locais para evitar

interferências. A ANATEL não impõe limites específicos de EIRP estabelecidos para a faixa de 900 MHz nas fontes consultadas. A Resolução nº 454, de 11 de dezembro de 2006, (ANATEL, 2006), que anteriormente estabelecia tais limites, foi revogada pela Resolução nº 757, de 8 de novembro de 2022 disponível em (ANATEL, 2022).

- Clima e Taxa de Chuva:** As condições climáticas, como chuva intensa, podem introduzir atenuações adicionais no sinal, especialmente em frequências mais altas. Para o LoRa, os impactos são menores devido à boa propagação em bandas sub-GHz.
- Distância Entre os Pontos:** A distância é um dos fatores mais influentes na análise do link. Quanto maior a distância, maior será a atenuação do sinal e, portanto, mais robustos devem ser os parâmetros do sistema.

A interface gráfica do perfil de visada é apresentada juntamente a seus parâmetros a serem adicionados de acordo com as características do projeto de envio de dados via rádio, na Figura 18.

Figura 18 – Interface gráfica do perfil de visada LinkCalc - Ligowave

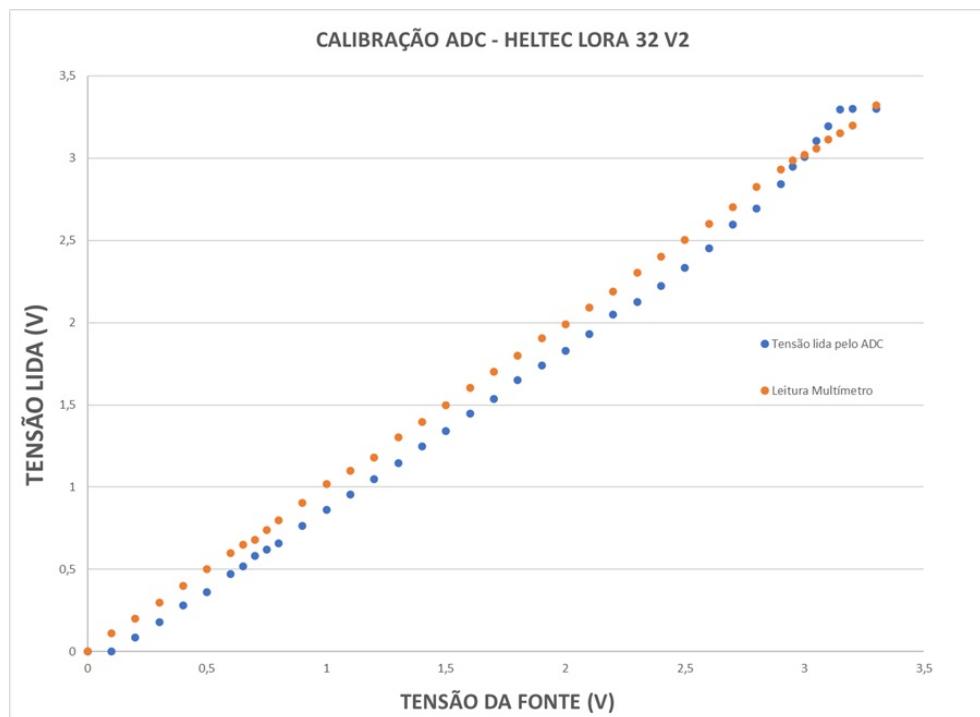


Fonte: Disponível em (LIGOWAVE, 2025), apenas para assinantes (*cortesia de (WEBLINE, 2025)*)

4 Resultados

Foram levantados os gráficos das curvas de calibração e ajuste dos pinos ADC, nas Figuras 19 e 20. Na Figura 19 são apresentados os gráficos das curvas de calibração, que mostram a relação entre os valores lidos pelos pinos ADCs e os valores de referência aplicados durante os testes. As curvas de calibração indicam a necessidade de ajustes para alinhar as leituras medidas com os valores reais, evidenciando as não linearidades presentes no ADC do ESP32 antes da compensação.

Figura 19 – Gráfico da Calibração dos pinos ADC - Heltec LoRa 32

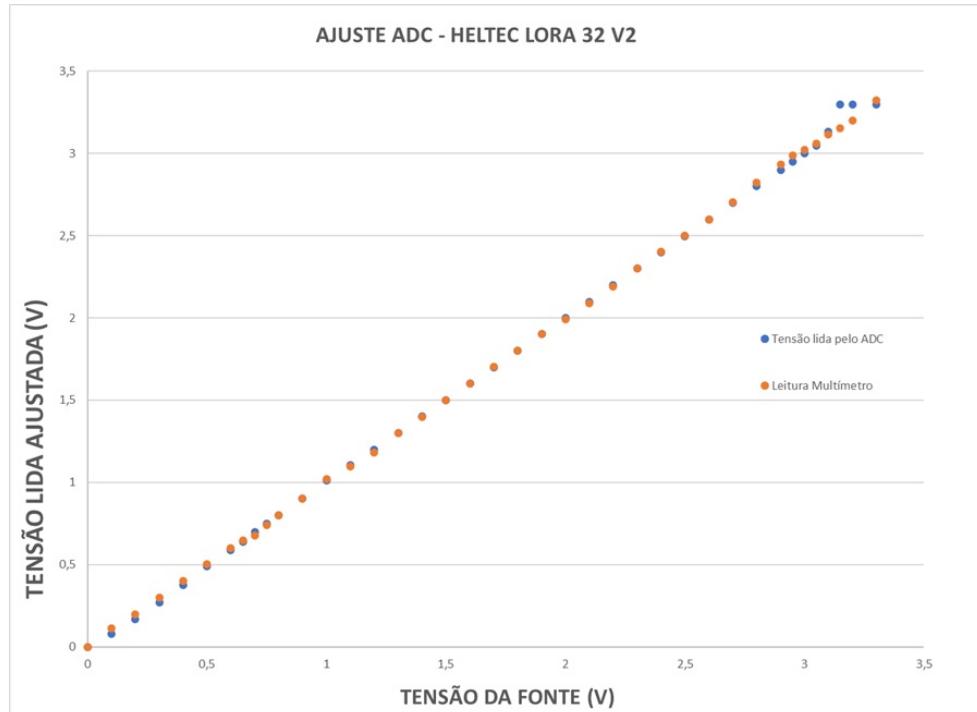


Fonte: o autor

A Figura 20 exibe as curvas de ajuste, obtidas após a aplicação do modelo de calibração desenvolvido e com o código devidamente implementado com a tabela de valores da fonte de tensão, multímetro e valores lidos pelo ADC do módulo com a interpolação matemática dos dados. Possibilitando que o ESP32 realize a correção automática das leituras, reduzindo significativamente os erros sistemáticos. Como resultado, os pinos ADCs calibrados passaram a fornecer medições com maior precisão, respeitando as limitações do conversor SAR, que possui uma resolução efetiva limitada e está sujeito a ruídos e flutuações elétricas.

Com a calibração concluída, o sistema está preparado para realizar a aquisição de dados de tensão com maior fidelidade, garantindo que os valores lidos reflitam de

Figura 20 – Gráfico dos pinos ADC Ajustados - Heltec LoRa 32



Fonte: o autor

forma mais exata as variações físicas captadas pelos sensores instalados no ambiente de monitoramento. Após o ajuste, foram realizados os primeiros testes de leitura para confirmação da fidelidade do ajuste.

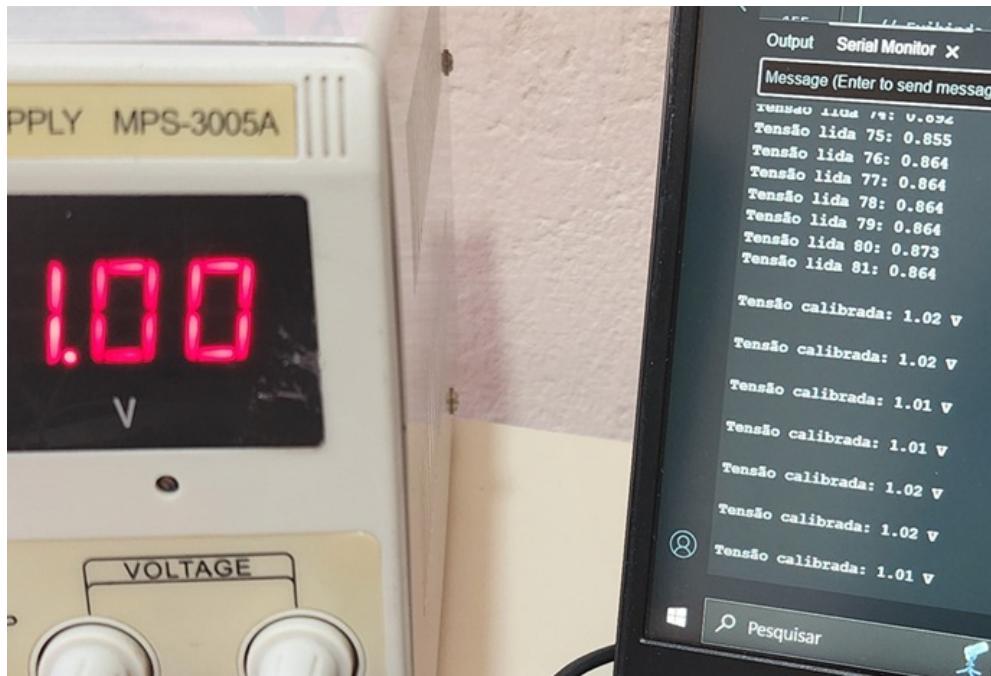
A Figura 21 demonstra o ensaio de leitura do ADC ajustado do módulo, percebe-se portanto, que a tensão lida está o mais próximo possível do valor da fonte de tensão que está alimentando o pino ADC, confirmando a fidelidade da calibração e ajuste dos pinos.

As Figuras 22 e 23 ilustram o funcionamento do processo de transmissão de dados entre os módulos LoRa no ambiente de testes. O objetivo deste experimento foi validar a comunicação entre o *Sender* e o *Gateway*, garantindo a integridade e a confiabilidade na troca de informações antes da implementação definitiva no sistema de monitoramento da CAGEPA.

Para este teste, foi configurado um valor fixo de vazão de 700 L/s no pino ADC 37 do módulo *Sender*, evitando variações e garantindo que a leitura permanecesse estável. Já no pino ADC 36, foi aplicada uma tensão variável correspondente a uma pressão de até 50 mca (metros de coluna d'água), simulando diferentes condições de operação da rede hidráulica. Essa estratégia permitiu testar a transmissão de dados com um valor fixo e outro variável, assegurando que o sistema estivesse apto a lidar corretamente com ambos os tipos de leituras.

Na Figura 22, observa-se o *Gateway* (à esquerda) conectando-se à rede Wi-Fi,

Figura 21 – Leitura do ADC ajustado - módulo Heltec LoRa 32 V2



Fonte: o autor

enquanto o *Sender* (à direita) permanece aguardando a conexão do *Gateway* para reenviar os pacotes de dados. Esse comportamento é essencial para evitar perdas de transmissão e garantir que os dados sejam entregues corretamente ao servidor.

Figura 22 – *Gateway*, à esquerda, conectando ao Wi-Fi e *Sender*, à direita, aguardando-o para reenviar os pacotes.



Fonte: o autor

Na Figura 23, o *Gateway* recebe os pacotes de dados enviados pelo *Sender* e transmite um ACK (*Acknowledgment*) de confirmação, assegurando que a comunicação foi bem-sucedida. Esse mecanismo é fundamental para o protocolo implementado, pois evita falhas na transmissão ao permitir que o *Sender* retransmita pacotes caso não receba a confirmação da entrega.

Com o teste realizado, confirmou-se que os dados de pressão e vazão foram corretamente coletados pelo *Sender*, transmitidos via LoRa, recebidos pelo *Gateway* e finalmente encaminhados ao sistema supervisório SCADA. Essa validação comprova a robustez do

Figura 23 – *Gateway* recebe os pacotes de dados, envia o ACK de confirmação, garantindo que a transmissão foi bem sucedida



Fonte: o autor

sistema de transmissão, garantindo que os dados adquiridos pelos sensores sejam processados em tempo real e enviados ao servidor de monitoramento, viabilizando uma gestão eficiente da rede de distribuição de água.

A Figura 24 exemplifica o resultado da transmissão dos dados no serial monitor do Arduino IDE do LoRa *Gateway*. Os dados de IP e MAC são sensíveis e portanto foram suprimidos ao público.

Figura 24 – Serial Monitor Arduino IDE - Informações da transmissão (RSSI e SNR)

```
Message (Enter to send message to 'Heltec WiFi LoRa 32(V2)' on 'COM7') | New Line | 115200 baud
Conectando ao WiFi...
ESP32 LoRa V2 Heltec conectado ao WiFi!
IP:
MAC:
Pacote recebido com RSSI: -3 e SNR: 6
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 0.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -3 e SNR: 6
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 700.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -4 e SNR: 6
Recebido via LoRa - Pressão: 41.47 mca, Vazão: 700.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -4 e SNR: 6
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 700.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.

Ln 66, Col 46 Heltec WiFi LoRa 32(V2) on COM7 4 3
```

Fonte: o autor

O RSSI indica a potência do sinal recebido pelo módulo *Gateway*, medido em dBm (decibéis-miliwatts). Valores mais próximos de 0 dBm indicam sinais fortes, enquanto

valores negativos elevados (como -120 dBm) representam sinais fracos. Neste ensaio, o RSSI foi analisado para garantir que a comunicação LoRa estivesse ocorrendo dentro da faixa aceitável para operação confiável.

Já o SNR mede a relação entre o sinal útil e o ruído do ambiente. Valores positivos indicam uma transmissão limpa, enquanto valores negativos indicam que o ruído está impactando a recepção. No teste, observou-se que o SNR estava dentro dos limites aceitáveis, garantindo que os pacotes de dados foram recebidos corretamente, sem interferências significativas.

Nesse caso, o RSSI = -4 dBm significa que os módulos estão muito próximos um do outro, ou seja, transmissão com sinal forte, e o SNR = 6 dB, muito próximo à 10, significa que a transmissão está limpa e sem ruídos de interferência. Esses parâmetros são indispensáveis para avaliar a eficiência da transmissão e garantir a integridade dos dados enviados do *Sender* para o *Gateway*, otimizando a comunicação dentro da rede LoRa.

Com a confirmação tanto do ajuste dos ADCs do módulo, quanto da transmissão efetiva dos dados, o próximo passo foi escolher os locais onde seriam posteriormente instalados o sistema LoRa PtP. O comportamento dos gráficos de pressão podem ser diferentes a depender da localidade e de como está sendo o seu controle.

Foi solicitado pela CAGEPA, através de reuniões estratégicas, que duas localidades seriam primariamente mais adequadas, pois há necessidade de que as medições de pressão sejam inseridas no SCADA. Uma dessas localidades é no bairro de Mangabeira na cidade de João Pessoa, no colégio chamado ECIT Severino Dias de Oliveira ou também conhecido como Mestre Sivuca e a outra em Cabedelo, que contempla a distribuição de água do reservatório de número 26.

4.1 ECIT Severino Dias de Oliveira (Mestre Sivuca) - Mangabeira

A primeira rede LoRa da CAGEPA foi instalada no Colégio Estadual Mestre Sivuca, por se tratar de uma região limítrofe entre as áreas de influência do Reservatório 7 (R7), localizado em Mangabeira I, ao lado do Mercado Público de Mangabeira, e do Reservatório 32 (R32), situado em Mangabeira VIII, Cidade Verde. A CAGEPA não dispunha de medições da pressão nessa localidade, razão pela qual o sistema LoRa foi implantado com o objetivo de monitorar o comportamento da rede e realizar os ajustes necessários na distribuição, de modo a garantir que a pressão atingisse o valor mínimo de 10 metros de coluna d'água (mca) ou, pelo menos, se aproximasse desse limite. Essa intervenção se fez necessária devido à elevada intermitência no abastecimento da região, caracterizada por frequentes períodos de desabastecimento.

A Figura 25 apresenta a localização do PtP LoRa instalado no endereço R. Flor de

Íris, 399-333 - Mangabeira, João Pessoa - PB, 58033-455, onde o módulo LoRa *Gateway* foi instalado em 7°10'38"S 34°49'19"W e o LoRa *Sender* foi instalado em 7°10'37"S 34°49'23"W. Esse local foi estrategicamente escolhido para garantir a cobertura eficiente da comunicação via LoRa, permitindo o monitoramento remoto de dados de pressão da rede de distribuição de água.

Figura 25 – Localização do PtP LoRa - Mestre Sivuca - Mangabeira



Fonte: o autor, adaptado de (Google, 2025)

Os módulos, tanto LoRa *Sender* quanto o LoRa *Gateway*, estão instalados em uma caixa de proteção, onde são armazenados os principais componentes do sistema, incluindo a fonte de alimentação, a bateria de armazenamento e a placa de energia solar. O sistema foi projetado para garantir autonomia energética, permitindo o funcionamento contínuo mesmo em locais remotos ou em condições adversas.

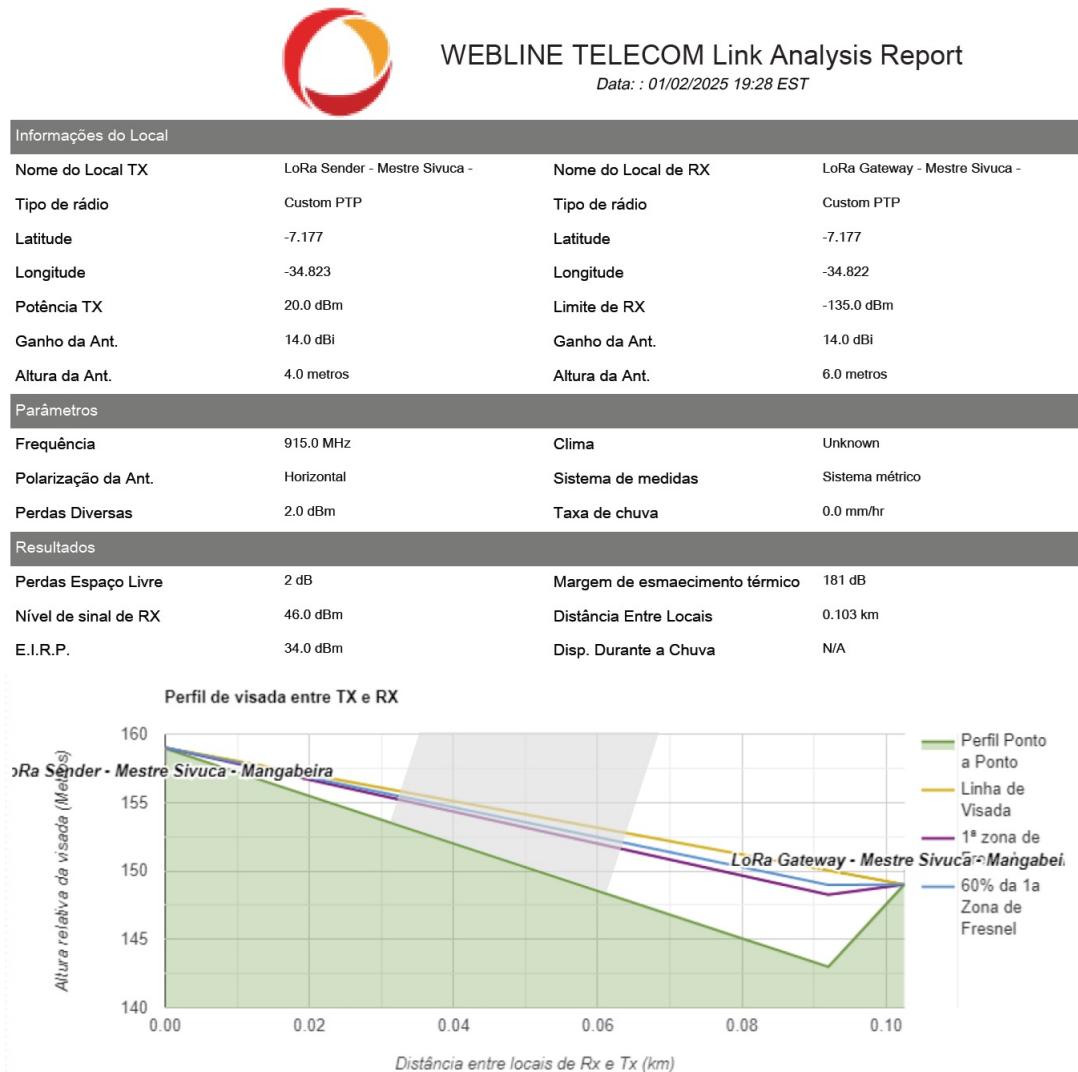
Além disso, foi incorporado um modem 4G com chip de internet (LTE), responsável por fornecer conexão à rede ao módulo LoRa *Gateway*, possibilitando que os dados recebidos do LoRa *Sender* sejam enviados ao sistema SCADA via protocolo HTTP.

Para maximizar o desempenho da transmissão, a antena do LoRa *Gateway* foi instalada a uma altura de 6 metros, garantindo um melhor alcance do sinal e reduzindo interferências. Essa altura favorece a propagação das ondas de rádio e melhora a estabilidade da comunicação entre o *Gateway* e os demais dispositivos da rede. A antena do LoRa *Sender* foi instalada a uma altura de 4 metros.

A distância entre as duas antenas é de cerca de 103 metros, ou seja, uma distância extremamente curta, dado que a transmissão via LoRa pode chegar a incríveis 15 km, em uma transmissão limpa e de visada direta.

A Figura 26 representa o perfil de visada realizado, com apoio de (WEBLINE, 2025), e nele foram inseridos algumas informações dos parâmetros da transmissão, como localização, altura das antenas, frequência de operação entre outros.

Figura 26 – Perfil de Visada do PtP Mestre Sivuca



Fonte: (LIGOWAVE, 2025) - Cortesia de (WEBLINE, 2025)

O perfil de visada ilustra a topografia do local e os principais obstáculos que poderiam impactar a propagação do sinal LoRa. O gráfico exibe três elementos essenciais para a análise da visada:

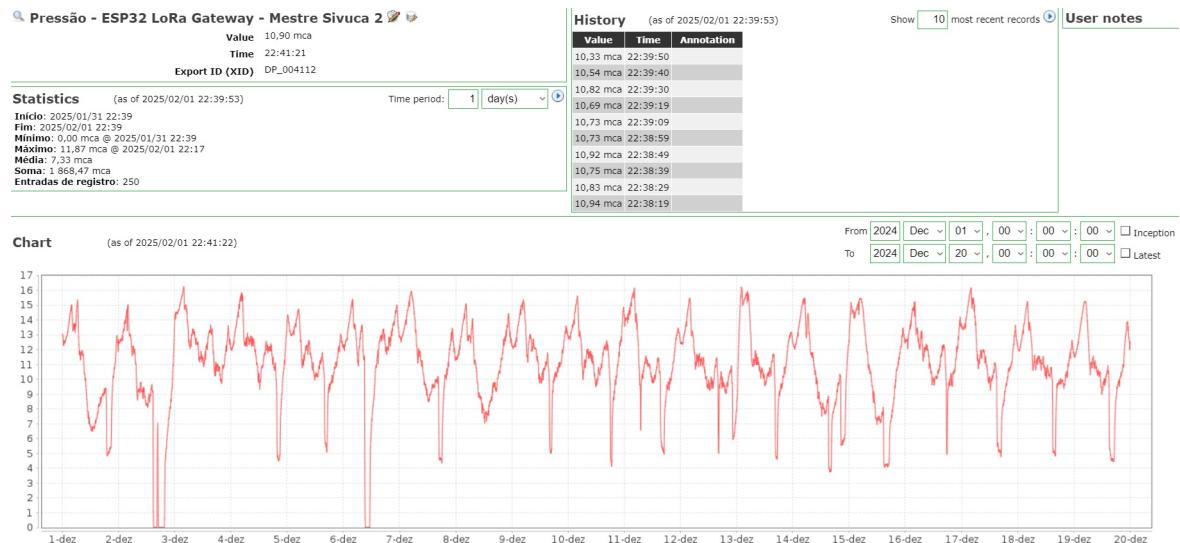
- **Linha de Visada:** Representa o caminho direto entre o transmissor (LoRa *Sender*) e o receptor (LoRa *Gateway*). Para uma transmissão ideal, a linha de visada deve estar livre de obstáculos, permitindo a propagação sem interferências.
- **Perfil Ponto a Ponto:** Representa a topologia do local, ou seja, montanhas, ladeiras, etc.
- **1^a Zona de Fresnel:** Área elíptica ao redor da linha de visada, necessária para evitar reflexões e dispersões do sinal. Quando essa zona é obstruída, ocorrem perdas de sinal por difração, o que pode impactar a qualidade da recepção.

- 60% da 1ª Zona de Fresnel:** Considera-se que, para minimizar perdas, ao menos 60% dessa zona deve estar desobstruída. Isso garante que a maior parte da energia do sinal seja propagada corretamente, reduzindo interferências e perdas de potência.

No gráfico da Figura 26, o bloco cinza representa o prédio do colégio, um possível obstáculo para a comunicação. Embora o teste de visada indique que o prédio poderia ser um fator limitante, a configuração do sistema demonstrou que a recepção dos pacotes foi bem-sucedida. O *Gateway* conseguiu receber os dados transmitidos pelo LoRa *Sender* de forma concisa e estável, demonstrando a robustez da tecnologia LoRa na transmissão mesmo em cenários urbanos.

O único fator limitante identificado foi a conexão do modem 4G, responsável pelo envio dos dados ao SCADA. Em momentos de queda da internet móvel, o *Gateway* não conseguia encaminhar as informações para o sistema supervisório, evidenciando que a dependência do 4G pode ser analisado para melhorias futuras.

Figura 27 – Recepção dos dados de pressão do Mestre Sivuca no servidor CAGEPA - SCADA



Fonte: o autor

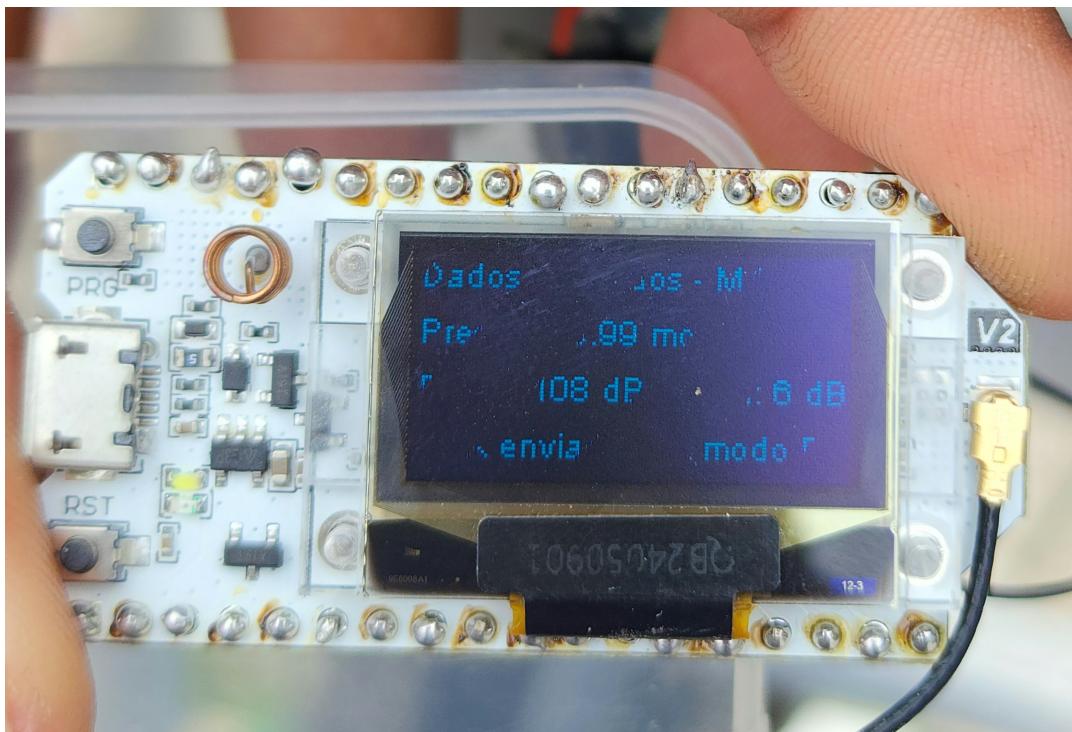
A Figura 27 expõe a janela em que os dados enviados pelo LoRa *Gateway* é recepcionado pelo servidor interno da CAGEPA no SCADA. Nele é possível verificar o gráfico dos dados, onde o eixo x representa o tempo ou data, depende de como o usuário seta essa visualização, e no eixo y representa os dados de pressão, os quais também podem ser visualizados na tabela "History", logo acima do gráfico. Para se obter e confirmar a veracidade do padrão dos dados de pressão pelos módulos, o sistema precisou ser instalado no início de Dezembro de 2024.

Os dados ilustrados pela Figura 27, representam de forma fiel a resposta ao comportamento da dinâmica de consumo diário em sistema de abastecimento de água. Em

horário noturno temos elevação da pressão na rede de distribuição proveniente da redução consumo dos usuários e queda da pressão no horário diurno (horário de pico) onde ocorre o aumento da vazão de consumo dos usuários.

A string de dados enviadas pelo LoRa *Sender* possui 12 bytes de comprimento em texto + 4 bytes de preenchimento pela criptografia AES-128, totalizando 16 bytes, com o payload de 32 bytes o que dá um ToA total esperado de 87,30 ms sendo enviados a cada 10 segundos. O display OLED do LoRa *Gateway*, 28, apresentou algumas falhas quando foi conectado ao controlador de carga, entretanto ainda é possível ver o RSSI de -108 dBm e o SNR de 6 dB, o que caracteriza uma transmissão extremamente pouco ruidosa. Ajustes serão feitos no controlador de carga para que a tensão correta seja entregue ao módulo.

Figura 28 – Exibição da recepção dos dados pelo display OLED - Mestre Sivuca



Fonte: o autor

Com o objetivo de aprimorar a qualidade da comunicação LoRa no ponto instalado no Colégio Estadual Mestre Sivuca, foi realizada uma reconfiguração dos parâmetros de transmissão do rádio LoRa. Inicialmente, utilizavam-se configurações padrão com foco em economia de energia e simplicidade, especialmente em razão da curta distância entre os módulos. No entanto, observou-se que, mesmo com essa proximidade, a estabilidade da comunicação poderia ser beneficiada com ajustes finos. Dentre as modificações realizadas, destacam-se:

- **LORA TX OUTPUT POWER 14:** A potência de transmissão foi elevada de 9 dBm para 14 dBm, valor máximo recomendado, buscando garantir maior robustez do sinal

e reduzir perdas provocadas por obstáculos pontuais ou variações no ambiente eletromagnético. Embora a distância entre os módulos seja curta, obstáculos como o edifício do colégio ainda poderia interferir na qualidade da recepção. Essa elevação de potência contribuiu diretamente para a melhora no valor de RSSI, onde houve uma melhora de -108 dBm (configuração antiga) para -55 dBm (nova configuração).

- **LORA BANDWIDTH 1:** Foi mantida a largura de banda em 125 kHz, considerada ideal para aplicações de longo alcance e comunicação confiável.
- **LORA SPREADING FACTOR 10:** O fator de espalhamento foi ajustado para SF10, aumentando o tempo de transmissão dos pacotes, mas garantindo maior imunidade ao ruído e maior sensibilidade de recepção. O SF10 permite que o sinal seja mais facilmente distinguido do ruído de fundo. Isso é refletido na melhora do SNR, que passou de -10 dB para 7 dB, demonstrando um sinal imensamente mais limpo e com interferência mínima ou quase nenhuma para ambiente real e não controlado.
- **LORA PREAMBLE LENGTH 8:** O comprimento do preâmbulo foi definido como 8 símbolos, garantindo uma boa sincronização entre transmissor e receptor, o que é especialmente útil para reduzir falhas de detecção no início da transmissão.

Os resultados observados na Figura 29, reforça a eficácia dessas alterações. Com os novos parâmetros, os valores médios melhoraram cerca de 49,1% para o RSSI e 16,07% para o SNR. Esses indicadores são essenciais para garantir que os dados criptografados sejam recebidos de forma confiável. A estabilidade observada no gráfico também sugere que a comunicação LoRa tornou-se menos suscetível a oscilações momentâneas ou perdas de pacotes, favorecendo uma operação contínua, mesmo com a oscilação da rede 4G.

4.2 Reservatório 26 (R26) - Cabedelo

A segunda instalação do sistema LoRa foi realizada no município de Cabedelo, na Paraíba, visando expandir o monitoramento remoto da rede de distribuição de água. O LoRa *Sender* foi posicionado nas coordenadas 6°58'16"S 34°49'43"W, enquanto o LoRa *Gateway* foi instalado em 6°58'18"S 34°49'57"W. A Figura 30 ilustra a localização exata desses pontos utilizando o Google Earth, permitindo uma visualização clara da infraestrutura de comunicação estabelecida na região.

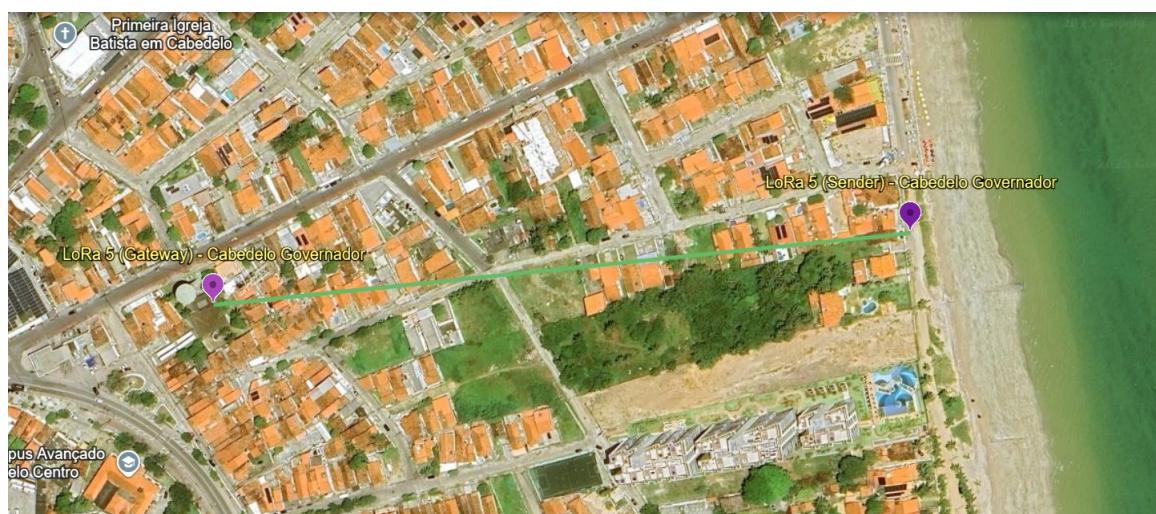
O R26 da CAGEPA é um reservatório elevado com capacidade de 400 metros cúbicos, abastecido pela adutora Gramame. Sua função é distribuir água tratada para a região central de Cabedelo, estendendo-se até a praia de Areia Dourada. Atende a uma população de aproximadamente 41.000 habitantes e consumo diário de 8.196.000 litros.

Figura 29 – Serial monitor - Arduino IDE: ECIT Mestre Sivuca - JP

```
Pacote recebido com RSSI: -55 e SNR: 7  
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.  
  
Pacote recebido com RSSI: -55 e SNR: 7  
Recebido via LoRa - Pressão: 9.49 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.  
  
Pacote recebido com RSSI: -57 e SNR: 7  
Recebido via LoRa - Pressão: 9.66 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.  
  
Pacote recebido com RSSI: -55 e SNR: 7  
Recebido via LoRa - Pressão: 9.54 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.  
  
Pacote recebido com RSSI: -57 e SNR: 7  
Recebido via LoRa - Pressão: 9.36 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.
```

Fonte: o autor

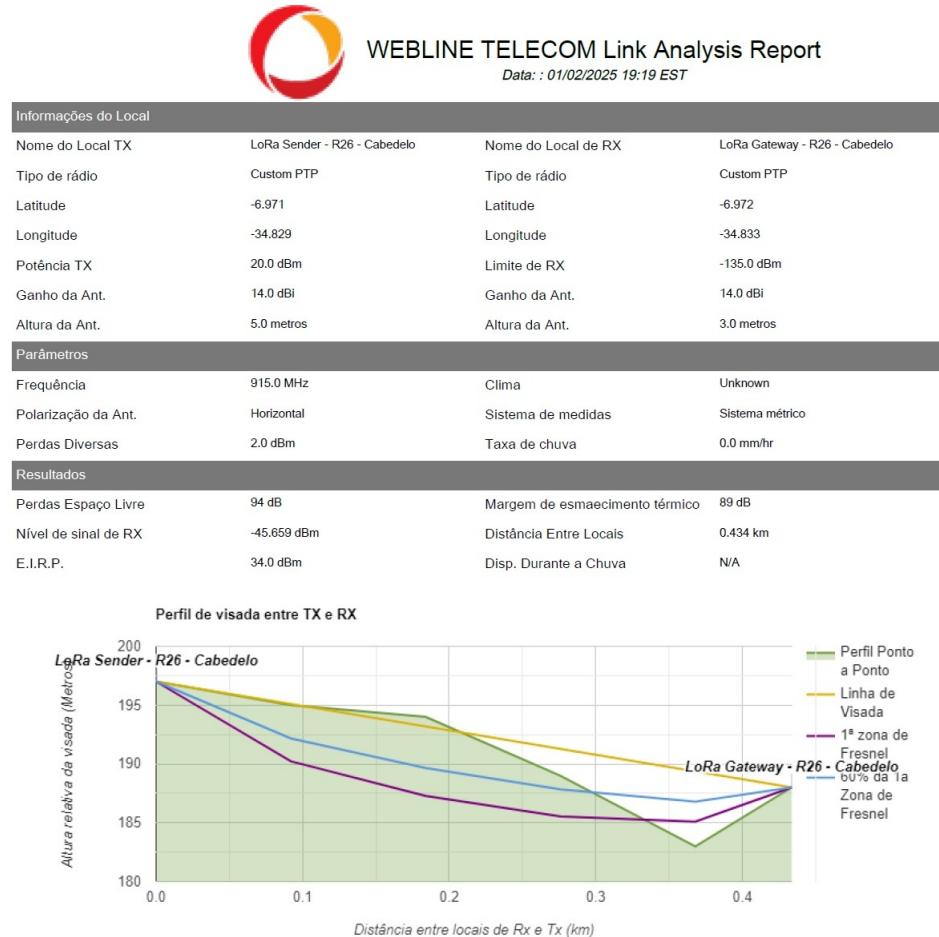
Figura 30 – Localização do PtP LoRa - R26



Fonte: o autor, adaptado de (Google, 2025)

A Figura 31 exibe o perfil de visada do PtP LoRa em Cabedelo, para avaliar as condições de propagação do sinal na localidade. A distância entre o LoRa *Sender* e o LoRa *Gateway* é de aproximadamente 434 metros, um fator que contribui significativamente para a robustez da comunicação. As antenas foram instaladas a uma altura de 5 metros e 3 metros, do LoRa *Sender* e *Gateway* respectivamente, garantindo que a propagação ocorra dentro das condições mínimas para propagação do sinal.

Figura 31 – Perfil de Visada do PtP do R26 - Cabedelo



Fonte: (LIGOWAVE, 2025) - Cortesia de (WEBLINE, 2025)

O gráfico de perfil ponto a ponto demonstra que a topografia do local e sugere a presença de possíveis obstáculos que poderiam interferir na transmissão dos pacotes. Entretanto, os testes demonstraram que, apesar das projeções do modelo indicarem que a topografia poderia representar uma barreira para a propagação do sinal, a comunicação ocorreu de forma eficiente e estável. Isso se deve, possivelmente, ao uso de antenas de alto ganho e à curta distância do enlace, fatores que minimizaram os impactos de eventuais obstruções físicas.

A string de dados enviadas pelo LoRa *Sender*, bem como no caso do Mestre Sivuca, também possui 12 bytes de comprimento em texto + 4 bytes de preenchimento pela

Figura 32 – Recepção dos dados de pressão do R26 - Cabedelo, no servidor CAGEPA - SCADA



Fonte: o autor

Figura 33 – Exibição da recepção dos dados pelo display OLED - R26



Fonte: o autor

criptografia AES-128, totalizando 16 bytes, com o payload de 32 bytes o que dá um ToA total esperado de 87,30 ms sendo enviados a cada 10 segundos.

Os dados estão sendo recebidos com um RSSI de -102 dBm e um SNR de -10 dB, na Figura 33, o que implica dizer que a potência do sinal está dentro da faixa esperada do LoRa, entretanto o SNR está muito baixo, o que implica dizer que são necessárias mudanças de parâmetros ou até mesmo das antenas. O *handshake* (ACK = *Acknowledge*) foi enviado para o TX (*LoRa Sender*) e o *Gateway* entrará em modo de RX ou modo de recepção de sinal, novamente, aguardando o loop de 10 segundos do *LoRa Sender* para receber os próximos dados.

Já a Figura 32 apresenta os dados de pressão recebidos no SCADA, validando o funcionamento do sistema de monitoramento em tempo real. O padrão de pressão registrado está correto, indicando que os sensores foram adequadamente calibrados e que os dados estão sendo transmitidos de forma precisa e confiável.

Entre os dias 05/01 a 06/01, 22/01 a 23/01, 30/01 a 31/01 e 01/02 a 02/02 houve queda de conexão Wi-Fi, energia elétrica e parada na distribuição de água por manutenção nas redes locais, por essa razão houve diferença no padrão no gráfico, e quedas ou constância nos valores de leitura, uma vez que, caso o haja queda de Wi-Fi o último valor lido permanecerá constante, que é o caso do dia 01/02 ao dia 02/02, enquanto que no caso de paradas na distribuição de água representam o padrão apresentados no dia 06/01 e 22/01.

Com a finalidade de aprimorar a estabilidade e a qualidade da comunicação no enlace LoRa localizado na estação de bombeamento do Reservatório 26 (R26), em Cabedelo, foram adotadas algumas medidas técnicas relevantes, cujos resultados são ilustrados na Figura apresentada. O sistema LoRa, responsável pelo envio remoto de dados de pressão para o SCADA, apresentava anteriormente valores de intensidade de sinal (RSSI) em torno de -102 dBm e uma razão sinal-ruído (SNR) negativa, alcançando -10 dB. Após intervenções estratégicas, observou-se uma melhora significativa nos parâmetros de recepção.

Dentre as modificações realizadas, destaca-se a substituição dos cabos coaxiais das antenas, anteriormente suscetíveis a interferências, por modelos com malha de blindagem reforçada, capazes de minimizar perdas por atenuação e proteger o sinal contra ruídos eletromagnéticos externos. Essa melhoria na integridade do enlace contribui diretamente para o ganho de desempenho observado. O RSSI passou de -102 dBm para -86 dBm, uma melhora de aproximadamente 15,7%, enquanto o SNR evoluiu de -10 dB para 6 dB, correspondendo a uma elevação expressiva de 16% na qualidade do sinal recebido.

Os dados obtidos confirmam a estabilidade do enlace, com o módulo LoRa *Gateway* recebendo pacotes consistentes e confiáveis. Os valores de pressão, superiores a 12 metros de coluna d'água (mca), atestam o correto funcionamento do sensor e sua adequada integração

Figura 34 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão R26 - Cabedelo

```

Pacote recebido com RSSI: -86 e SNR: 8
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca
ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -86 e SNR: 8
Recebido via LoRa - Pressão: 12.65 mca
ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -86 e SNR: 7
Recebido via LoRa - Pressão: 12.56 mca
ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -86 e SNR: 7
Recebido via LoRa - Pressão: 12.74 mca
ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -86 e SNR: 6
Recebido via LoRa - Pressão: 12.68 mca
ACK enviado, voltando para modo RX.

```

Fonte: o autor

ao sistema de telemetria. A confiabilidade da transmissão, evidenciada pelas respostas automáticas de ACK, demonstra a eficiência do sistema após os ajustes implementados.

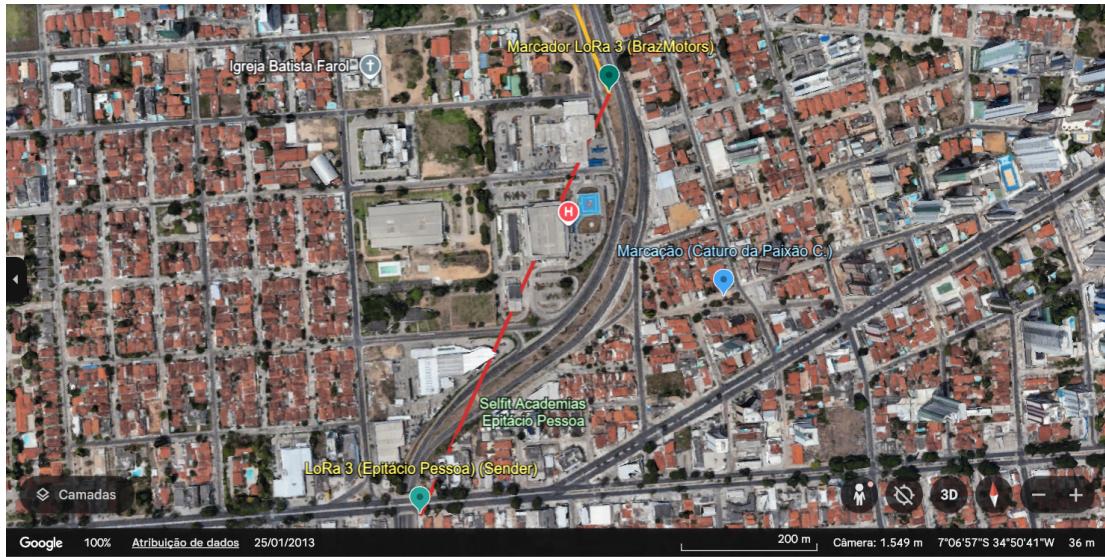
4.3 Epitácio / Pedro Gondim - JP

A instalação do sistema LoRa no trecho entre o ponto Epitácio, LoRa *Sender*, localizado em 7°07'11"S 34°50'41"W e Pedro Gondim, LoRa *Gateway*, localizada em 7°06'52"S 34°50'31"W, Figura 35, foi motivada por uma demanda crescente na área de influência do Bairro dos Estados, em João Pessoa. Tradicionalmente, essa região era abastecida pelo reservatório R6, localizado na região da Torre. No entanto, devido ao aumento substancial do consumo, o R6 deixou de ser suficiente para atender toda a área de maneira satisfatória. Como solução emergencial, adotou-se a alimentação suplementar via adutora pela BR-230, localizada em frente à unidade de Pedro Gondim, possibilitando um reforço direto na rede.

O sensor instalado no ponto Epitácio passou a ser responsável pela coleta e envio, em tempo real, dos dados de pressão e vazão da rede. Essas informações são essenciais para o controle técnico da injusão de água no bairro dos Estados. Com isso, tornou-se possível regular com precisão a quantidade de água fornecida, assegurando que áreas críticas, passassem a ser abastecidas de forma regular e adequada. Além disso, o sistema evita a ocorrência de sobrepressões, que poderiam comprometer a integridade da rede com o surgimento de novos vazamentos.

Antes da ativação da comunicação LoRa, foi realizado um estudo de visada entre

Figura 35 – Localização do PtP LoRa - Epitácio / Pedro Gondim - JP



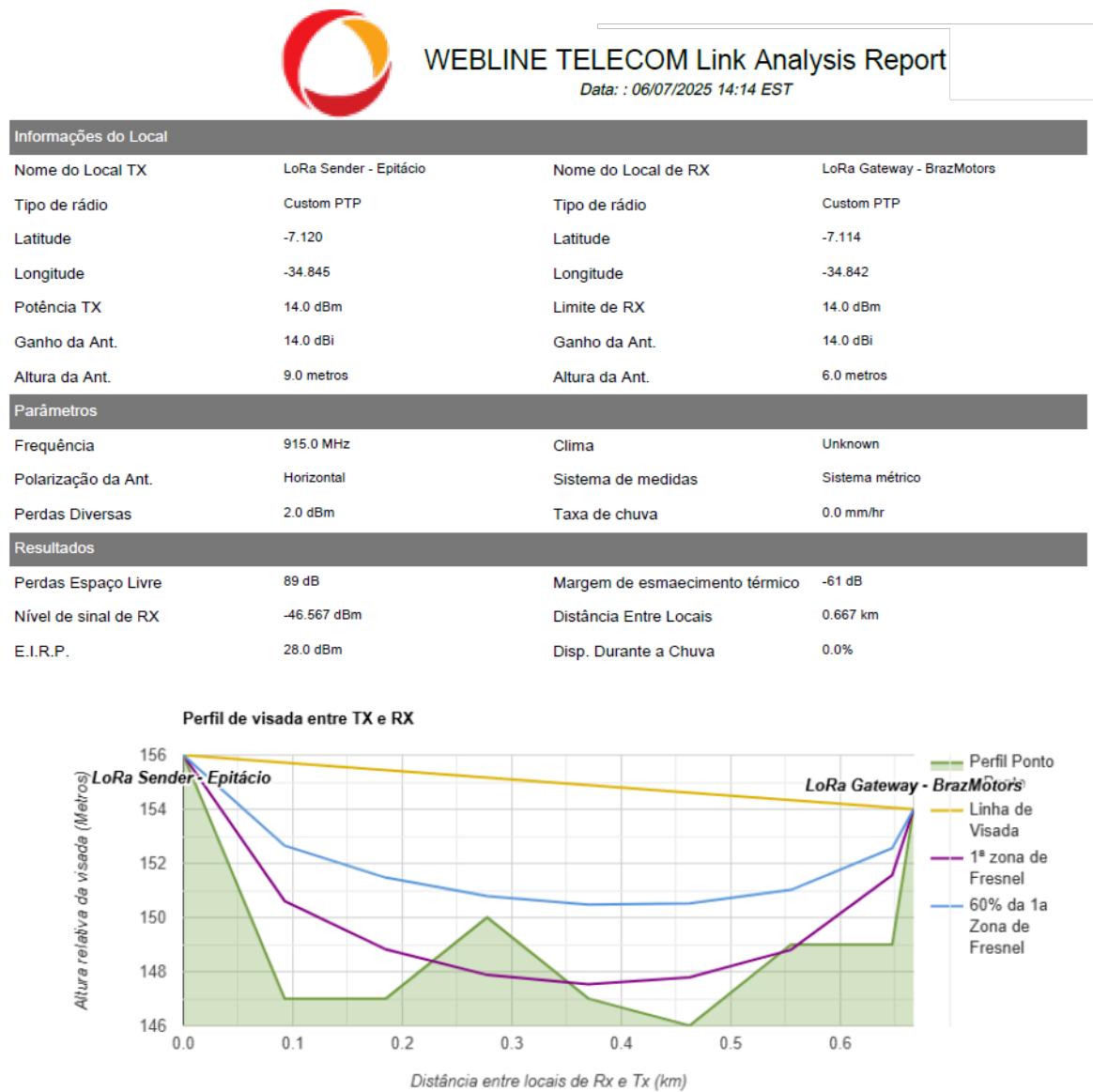
Fonte: o autor, adaptado de (Google, 2025)

o ponto de transmissão (Epitácio) e o *Gateway* receptor (Pedro Gondim). A distância total entre os dispositivos é de 667 metros. A análise demonstrou uma linha de visada direta, com mínima obstrução na 1^a zona de Fresnel, mesmo nos pontos de maior variação altimétrica. As perdas por espaço livre foram estimadas em 89 dB, com nível de sinal de recepção de aproximadamente -46,6 dBm e margem de esmaecimento térmico de -61 dB, valores plenamente satisfatórios para a comunicação em 915 MHz.

Foram utilizadas antenas de 14 dBi em ambas as extremidades, com potência de transmissão de 14 dBm. O gráfico do perfil de visada (Figura 36) comprova a provável viabilidade do enlace, topologicamente falando, sem levar em consideração os prédios do hospital e interferências significativas. A adoção dessa solução tecnológica permitiu, portanto, não apenas mitigar falhas no abastecimento, mas também racionalizar o uso dos recursos hídricos e preservar a integridade física da rede de distribuição.

Com base nos dados registrados durante a transmissão entre o ponto Epitácio (LoRa *Sender*), Figura 37, e o *Gateway* em Pedro Gondim, observa-se que os valores de RSSI variaram entre -89 dBm e -95 dBm, enquanto o SNR oscilou entre 1 dB e 3 dB. Esses indicadores, são considerados aceitáveis para o padrão de comunicação LoRa, especialmente em ambientes urbanos com interferências e obstáculos como prédios e árvores. A estabilidade da recepção, mesmo com SNR baixo, demonstra a robustez do protocolo LoRa, que é projetado para operar com eficiência em situações de baixa relação sinal/ruído. Apesar dos pacotes de dados terem retornado com leituras de pressão e vazão zeradas, o canal de comunicação permaneceu ativo, com ACKs enviados com sucesso, evidenciando que o enlace estável foi mantido. Ressalta-se que os valores zerados de vazão devem-se a um problema identificado na saída de dados do sensor, que se encontra

Figura 36 – Perfil de Visada do PtP da transmissão Epitácio / Pedro Gondim - JP



Fonte: (LIGOWAVE, 2025) - Cortesia de (WEBLINE, 2025)

danificada. A substituição do sensor já está prevista e será realizada em breve para garantir a integridade dos dados coletados. Esses resultados validam a viabilidade do sistema, mesmo em condições adversas.

Figura 37 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão Epitácio / Pedro Gondim - JP

```
Pacote recebido com RSSI: -89 e SNR: 3
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 0.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -92 e SNR: 2
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 0.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -93 e SNR: 2
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 0.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -93 e SNR: 1
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 0.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
Pacote recebido com RSSI: -95 e SNR: 2
Recebido via LoRa - Pressão: 0.00 mca, Vazão: 0.00 L/s

ACK enviado, voltando para modo RX.
```

Fonte: o autor

Figura 38 – Recepção dos dados de vazão - Epitácio/Pedro Gondim, no servidor CAGEPA - SCADA



Fonte: o autor

A evolução da vazão, Figura 38, registrada no período de março a junho de 2025, evidencia um padrão cíclico típico de consumo urbano. Observa-se uma oscilação regular

da vazão entre 0 L/s e cerca de 8 L/s, indicando variações naturais no uso da água ao longo do dia, com picos geralmente associados aos horários de maior demanda (como início da manhã e final da tarde). Ao longo do tempo, o sistema manteve a consistência na coleta e envio das medições via LoRa, conforme refletido pela densidade e continuidade dos dados plotados. A interrupção brusca no final da série e os valores zerados recentes se devem à falha na saída de dados do sensor. O gráfico comprova a eficiência do enlace de comunicação e a importância do monitoramento contínuo para a gestão de redes de abastecimento.

4.4 ETA São Gonçalo - PB

A Estação de Tratamento de Água (ETA) de São Gonçalo, localizada no município de mesmo nome, Figura 39, no estado da Paraíba, possui o importante papel de abastecer as cidades de Sousa, Marizópolis, a própria São Gonçalo e diversas comunidades adjacentes. Trata-se de um sistema de distribuição de médio porte, cuja eficiência operacional é diretamente afetada por variações na demanda, falhas técnicas e oscilações ambientais. Assim, o monitoramento em tempo real da vazão de saída da ETA é essencial para garantir o fornecimento contínuo e otimizado, assegurando a integridade do sistema e a disponibilidade hídrica para a população atendida.

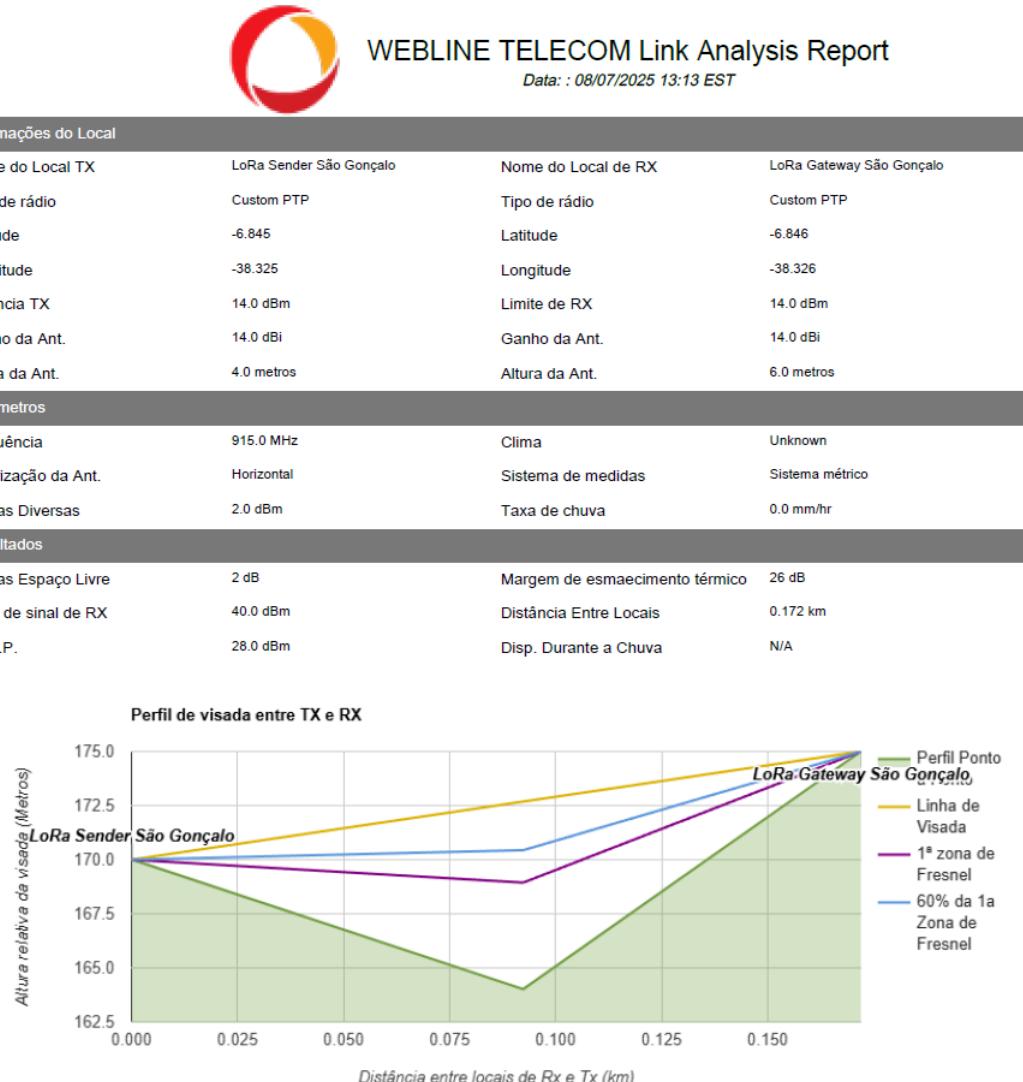
Figura 39 – Localização do PtP LoRa - ETA São Gonçalo - PB



Fonte: o autor, adaptado de (Google, 2025)

Nesse contexto, foi implementado o sistema de comunicação LoRa, para coleta de dados da vazão de distribuição de água. O transmissor LoRa (*Sender*) encontra-se localizado nas coordenadas geográficas 6°50'43"S, 38°19'29"W, enquanto o receptor (*Gateway*) está situado em 6°50'47"S, 38°19'32"W, conforme ilustrado na Figura 39. Apesar da curta distância entre os dispositivos (cerca de 172 metros), o perfil de visada, mostrado na

Figura 40 – Perfil de Visada do PtP da transmissão São Gonçalo - PB



Fonte: (LIGOWAVE, 2025) - Cortesia de (WEBLINE, 2025)

Figura 40, revela desafios significativos. Embora o gráfico indique uma linha de visada desobstruída, a realidade do local é mais complexa. A presença de vegetação densa e um desnível acentuado entre os pontos, com o transmissor posicionado em uma cota mais baixa em relação ao *Gateway*, impõem obstáculos naturais à propagação do sinal, podendo comprometer a estabilidade do enlace.

Inicialmente, os testes realizados evidenciaram um desempenho aquém do esperado. Como ilustrado na Figura 41 (à esquerda), os valores de RSSI estavam entre -110 e -111 dBm e o SNR variava de -5 a -4, o que indicava uma comunicação frágil e suscetível a perdas. Após ajustes nos parâmetros de comunicação LoRa, que passaram a adotar a mesma configuração utilizada com sucesso nas estações de Epitácio e Pedro Gondim (frequência de 915 MHz, SF7, BW125 kHz, entre outros), observou-se uma melhoria expressiva: o RSSI passou a -91 dBm e o SNR atingiu 8 a 9 (Figura 3, à direita). A melhora no RSSI foi de

aproximadamente 17,27%, e no SNR, a melhoria percentual foi de 180%, evidenciando que a parametrização adequada e o alinhamento das antenas foram decisivos para o sucesso do enlace.

Figura 41 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão São Gonçalo - PB

```

Pacote recebido com RSSI: -93 e SNR: 7
Recebido via LoRa - Vazão: 652.09 m³/h

ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -93 e SNR: 8
Recebido via LoRa - Vazão: 694.77 m³/h

ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -91 e SNR: 8
Recebido via LoRa - Vazão: 711.55 m³/h

ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -91 e SNR: 8
Recebido via LoRa - Vazão: 688.87 m³/h

ACK enviado, voltando para modo RX.

Pacote recebido com RSSI: -91 e SNR: 9
Recebido via LoRa - Vazão: 648.77 m³/h

ACK enviado, voltando para modo RX.

```

Fonte: o autor

Adicionalmente, a troca dos cabos coaxiais das antenas por modelos com blindagem reforçada também contribuiu para a mitigação de perdas por interferência eletromagnética, comuns em ambientes com equipamentos de alta potência e presença de descargas atmosféricas, o que é característico da região.

Por fim, na Figura 42, os dados coletados diretamente no sistema supervisório SCADA, nota-se que, embora a comunicação tenha se estabelecido de forma satisfatória após os ajustes, ocorreram interrupções pontuais nas leituras, atribuídas a falhas de energia, descargas atmosféricas que interferiram na eletricidade do prédio onde o *Gateway* se encontra e até mesmo intervenções operacionais na ETA. A vazão média registrada no sistema foi de 870,3 m³/h, o que equivale a 241,75 L/s, demonstrando um volume considerável de água sendo distribuído para o município de Sousa. Este dado é mais do que fundamental para o controle operacional da ETA, auxiliando na tomada de decisões em tempo real e promovendo maior eficiência na gestão hídrica da região.

Figura 42 – Recepção dos dados de vazão - ETA São Gonçalo, no servidor CAGEPA - SCADA



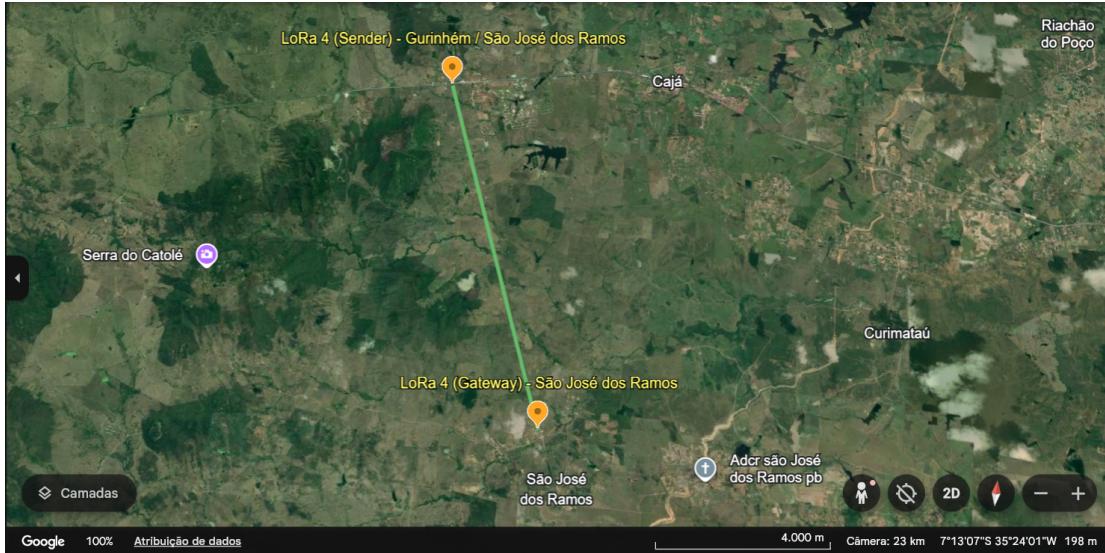
Fonte: o autor

4.5 Reservatório Elevado Boqueirão de Gurinhém / São José dos Ramos - PB

A próxima escolha de instalação *ponto-a-ponto* da rede LoRa de monitoramento foi no reservatório elevado de Boqueirão de Gurinhém – PB, localizada geograficamente conforme a Figura 43, nos pontos 7°10'27"S 35°23'49"W (LoRa Sender) e 7°14'41"S 35°22'21"W (LoRa Gateway). Essa instalação representa um importante passo na modernização do sistema de abastecimento da região agreste da Paraíba. O reservatório desempenhou papel estratégico no fornecimento de água para a localidade de Boqueirão de Gurinhém, operando com uma vazão média de 4,75 litros por segundo. Hoje, essa vazão é injetada diretamente na rede de distribuição, método esse que substituiu a tradicional alimentação por gravidade a partir do reservatório elevado. Tal mudança se deu em virtude das limitações observadas no modelo anterior, que se mostrou insuficiente para atender, de forma regular, a totalidade das residências conectadas ao sistema, sobretudo em áreas geograficamente mais elevadas ou afastadas.

Com a adoção do modelo de injeção direta, tornou-se possível manter uma distribuição contínua e proporcional à demanda local. O controle desse sistema é realizado por meio de bombas acionadas por inversores de frequência, cuja função é garantir um abastecimento contínuo com vazão ajustável em tempo real. A efetividade desse mecanismo depende, contudo, da coleta precisa de dados de pressão na extremidade da rede, o que passou a ser possível com a instalação de sensores conectados à rede LoRa no reservatório de Boqueirão de Gurinhém.

Figura 43 – Localização do PtP LoRa - Boqueirão de Gurinhém / São José dos Ramos



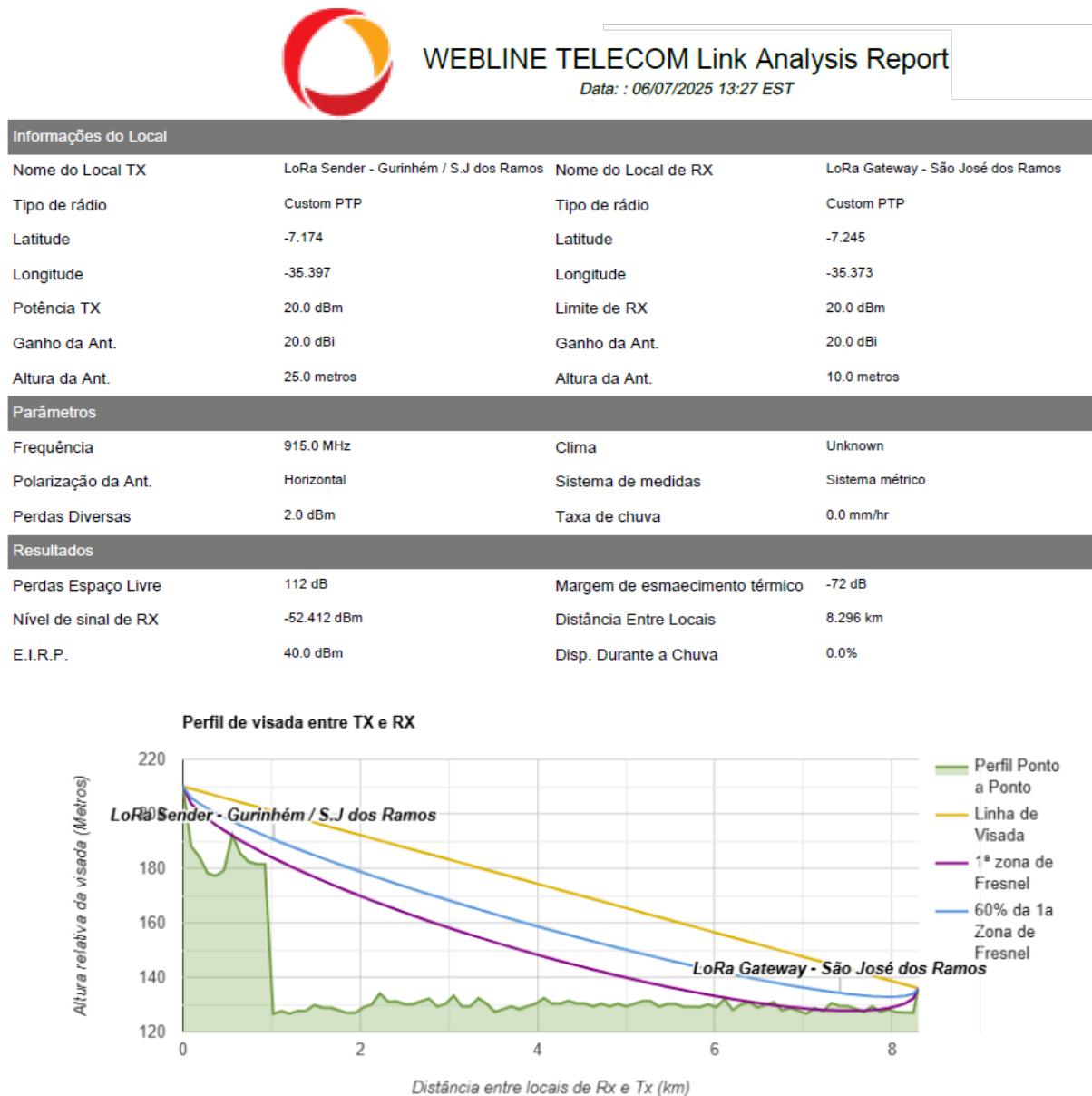
Fonte: o autor, adaptado de (Google, 2025)

Esses sensores desempenham um papel imprescindível na estabilidade operacional do sistema, devido ao fornecimento de leituras em tempo real da pressão exercida na tubulação, possibilitando a retroalimentação automática do controle de vazão. Antes da implementação desse monitoramento, observavam-se recorrentes falhas no abastecimento em setores periféricos, com destaque para localidades mais elevadas ou de difícil alcance hidráulico. Isso se devia à insuficiência de pressão exercida pelo reservatório elevado, incapaz de vencer as perdas de carga acumuladas ao longo da rede. Com os dados obtidos por telemetria, tornou-se possível identificar com clareza os pontos de estrangulamento hidráulico e, assim, calibrar o sistema de bombeamento para superar tais limitações.

Além do núcleo urbano de Boqueirão de Gurinhém, que possui aproximadamente 846 ligações residenciais, o sistema abastece também o Complexo Penitenciário de Gurinhém e mais 180 ligações urbanas complementares. O reservatório de Boqueirão, com volume útil de 50 m³, é responsável por alimentar toda essa demanda, configurando-se, portanto, como um componente essencial para a segurança hídrica da região. A instalação do ponto LoRa neste contexto permitiu não apenas o monitoramento remoto da pressão e da operação do sistema, mas também a implementação de estratégias mais inteligentes de controle, promovendo economia de energia elétrica, redução de perdas e aumento da eficiência operacional.

O perfil de visada, conforme Figura 44, revelou uma linha de visada desobstruída entre os pontos, com boa conformidade em relação à primeira zona de Fresnel. O sinal de recepção estimado foi de -52,412 dBm, valor considerado tecnicamente adequado, mesmo diante de uma perda de espaço livre de 112 dB. A margem de desvanecimento térmico foi projetada em -72 dB, indicando estabilidade mesmo em condições adversas. Tais dados

Figura 44 – Perfil de Visada do PtP da transmissão Gurinhém para São José dos Ramos - PB



Fonte: (LIGOWAVE, 2025) - Cortesia de (WEBLINE, 2025)

confirmaram a viabilidade do enlace ponto-a-ponto (PTP) para o padrão LoRa em 915 MHz, com baixa taxa de atenuação e perda mínima em campo aberto.

Devido à extensão da distância, tornou-se necessário ajustar os parâmetros físicos e operacionais do sistema. Foram empregadas antenas direcionais modelo CF-920 da fabricante Aquário, com ganho de $20 \text{ dBi} \pm 1$, possui 30 elementos ativos e impedância nominal de 50 ohm, assim como no modelo CF-914. Tais antenas, do tipo Yagi-Uda, garantem maior diretividade e redução de interferências, sendo ideais para enlaces de longo alcance. A potência de transmissão foi fixada em 20 dBm, com E.I.R.P. estimado de 40 dBm, o que assegura estabilidade de sinal mesmo em dias de baixa propagação.

No que se refere à configuração do rádio LoRa, foram parâmetros distintos dos demais pontos do projeto, visando maior robustez e confiabilidade da comunicação. Foram definidos:

- LORA BANDWIDTH 0, correspondente a uma largura de banda de 62,5 kHz;
- LORA SPREADING FACTOR 12, que proporciona maior alcance com redução no tempo de transmissão;
- LORA PREAMBLE LENGTH 12, aumentando a capacidade de sincronização entre transmissor e receptor.

Com essas adaptações, o sistema de transmissão foi plenamente estabilizado, viabilizando o envio dos dados de pressão em tempo real do sensor instalado em Gurinhém até o *Gateway* localizado em São José dos Ramos, integrando-se ao sistema supervisório SCADA da CAGEPA.

Os testes iniciais do enlace LoRa, Figura 45, demonstraram resultados satisfatórios quanto à qualidade do sinal. O RSSI médio foi de -110 dBm, com variações mínimas, e o SNR permaneceu constante em 4 dB, indicando boa relação sinal-ruído. Esses valores confirmam a viabilidade da comunicação a longa distância, mesmo operando próximo ao limite de sensibilidade do módulo LoRa. A estabilidade dos pacotes recebidos, aliada ao envio eficaz de confirmações (ACK), comprovam que o sistema é robusto e suficiente. A combinação de antenas de alto ganho, parâmetros otimizados de transmissão e visada desobstruída assegurou um desempenho confiável e adequado para o monitoramento contínuo da pressão e nível da rede.

A análise da pressão da rede, Figura 46, revela um perfil dinâmico com oscilações acentuadas e recorrentes. A presença de vales marcados no gráfico reflete a queda de pressão nos períodos de maior consumo, geralmente durante o dia, quando há simultaneidade no uso da água pela população. Outros fatores, como acionamento ou desligamento das bombas, manutenção na rede e falhas pontuais no sistema de energia, também contribuem para

Figura 45 – Serial monitor - Arduino IDE: transmissão Gurinhém / São José dos Ramos - PB

```
O client SJR_LORA se conectou ao broker:  
Broker MQTT conectado  
  
Pacote recebido com RSSI: -110 dBm e SNR: 4 dB  
  
Recebido via LoRa:  
Nível: 0.00 m  
Pressão: 0.00 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.  
  
Valor enviado ao broker: 0.00  
  
  
Pacote recebido com RSSI: -110 dBm e SNR: 4 dB  
  
Recebido via LoRa:  
Nível: 3.58 m  
Pressão: 21.04 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.  
  
Valor enviado ao broker: 21.04  
  
  
Pacote recebido com RSSI: -109 dBm e SNR: 4 dB  
  
Recebido via LoRa:  
Nível: 3.58 m  
Pressão: 20.78 mca  
  
ACK enviado, voltando para modo RX.
```

Fonte: o autor

essas variações. Mesmo com essas oscilações, os dados mostram que o sistema conseguiu manter uma média próxima a 21 mca, garantindo abastecimento eficiente. O sistema LoRa assegurou a transmissão confiável das leituras, com integração eficaz ao SCADA.

Entre março e julho de 2025, Figura 47, observou-se um crescimento contínuo no nível do reservatório monitorado em Boqueirão de Gurinhém, variando de 2,90 m a 3,74 m. A estabilidade registrada evidencia o bom funcionamento do sistema de injeção direta, que mantém o reservatório abastecido de forma contínua. O código implementado no LoRa *Gateway* envia os dados ao SCADA via protocolo HTTP, assim como nos demais pontos. No entanto, considerando que o CLP Siemens responsável pelo controle de bombeamento, não possui suporte para recepção de dados via protocolo HTTP, foi incorporado adicionalmente o protocolo MQTT. Essa adaptação garantiu a comunicação eficiente entre o sistema embarcado e o CLP, permitindo o desligamento automático das bombas ao atingir o nível ideal, evitando extravasamento. A estratégia mostrou-se eficaz, com integração estável ao SCADA, CLP Siemens, controle preciso do reservatório e distribuição

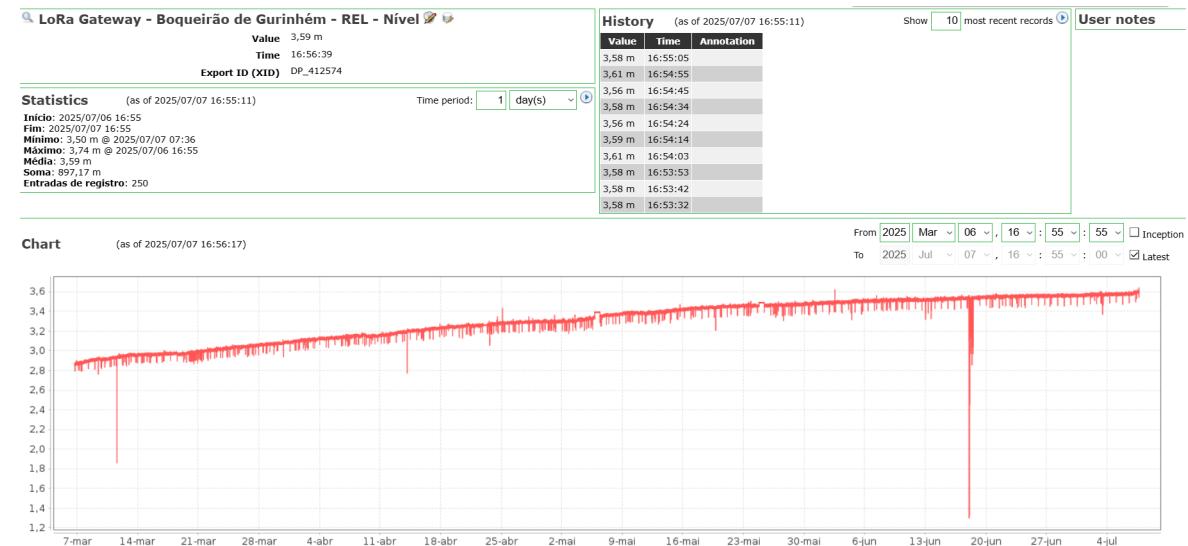
Figura 46 – Recepção dos dados de pressão - Reservatório Gurinhem, no servidor CAGEPA - SCADA



Fonte: o autor

de água.

Figura 47 – Recepção dos dados de nível - Reservatório Gurinhem, no servidor CAGEPA - SCADA



Fonte: o autor

5 Conclusões

A presente Dissertação de Mestrado teve como objetivo o desenvolvimento, implementação e validação de um sistema de monitoramento remoto baseado em tecnologia LoRa, integrado ao sistema SCADA da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CA-GEPA), com foco na melhoria da gestão operacional de abastecimento de água em regiões com desafios históricos de intermitência e pressão reduzida. A proposta foi concebida para atender à necessidade crescente de soluções tecnológicas eficientes e de baixo custo para o setor de saneamento básico, sobretudo em áreas críticas e de difícil acesso.

A fundamentação teórica abrangeu os princípios que englobam a Internet das Coisas (IoT), a tecnologia de modulação LoRa e a estrutura dos sistemas SCADA. Além disso, uma seção específica foi dedicada à análise do estado da arte, onde foram revisados trabalhos relevantes que demonstraram a aplicação bem-sucedida dessas tecnologias em diversas partes do mundo, a exemplo da Bélgica, Indonésia e China. Tais referências permitiram não apenas embasar tecnicamente o projeto, mas também estabelecer parâmetros comparativos para o desempenho e a viabilidade da solução proposta.

Em relação à metodologia, o projeto envolveu a instalação de módulos LoRa Sender e LoRa Gateway em diferentes pontos estratégicos do sistema de abastecimento da CA-GEPA, abrangendo localidades como Mangabeira, Boqueirão de Gurinhém, Pedro Gondim, Cabedelo e São Gonçalo. Cada ponto foi escolhido com base em critérios operacionais, como ausência de medições de pressão, necessidade de equalização da rede e dificuldades topográficas ou estruturais que inviabilizavam soluções tradicionais de telemetria.

Os resultados obtidos demonstraram a eficiência do sistema proposto. Em Mangabeira, por exemplo, o sistema permitiu a obtenção contínua de dados de pressão em uma área anteriormente sem monitoramento, possibilitando intervenções mais precisas na válvula redutora de pressão (VRP) e contribuindo diretamente para a redução da intermitência no abastecimento. Em Boqueirão de Gurinhém, a instalação do sensor de pressão e o uso de injecção direta na rede permitiram solucionar problemas históricos de desabastecimento em regiões periféricas, com o controle dinâmico da pressão via inversores de frequência.

Nos enlaces de longa distância, como o instalado entre São José dos Ramos e Gurinhém (8,3 km), a tecnologia LoRa demonstrou robustez, especialmente após ajustes nos parâmetros de transmissão, como o aumento do fator de espalhamento (SF12) e da largura de preâmbulo, além do uso de antenas direcionais com ganho de 20 dBi. O sistema apresentou valores de RSSI e SNR compatíveis com enlaces confiáveis, e mesmo em topografias desfavoráveis e com vegetação densa, como no caso da ETA de São Gonçalo, a

transmissão se mostrou eficiente após as devidas otimizações.

As análises gráficas extraídas do SCADA evidenciam o comportamento dinâmico da rede de distribuição ao longo dos meses monitorados. Os dados de pressão revelaram oscilação significativa ao longo do dia, condizente com o padrão de consumo da população, com vales durante os períodos de maior demanda e picos em horários de baixo consumo. Os dados de vazão também se mostraram valiosos, permitindo quantificar a distribuição real de água e detectar falhas, como sensores com saída danificada ou interrupções na transmissão causadas por instabilidades elétricas ou eventos atmosféricos.

A interoperabilidade do sistema com o SCADA, inicialmente via protocolo HTTP, foi aprimorada com a implementação paralela do protocolo MQTT, em casos específicos como o do CLP Siemens em São José dos Ramos, que não aceitava comunicações via HTTP. Essa flexibilidade reforça o caráter modular e adaptável da solução, que pode ser facilmente replicada e ajustada conforme as demandas operacionais e limitações técnicas de cada ponto da rede.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a integração entre tecnologias emergentes como LoRa, IoT e SCADA representa uma solução viável, escalável e eficaz para os desafios de monitoramento e controle no setor de saneamento. O sistema desenvolvido não apenas contribuiu para a melhoria da eficiência operacional da CAGEPA, como também abre caminhos para futuras expansões em outras localidades do estado, servindo de referência para outras companhias de abastecimento em contextos semelhantes.

Por fim, recomenda-se a continuidade dos investimentos em soluções baseadas em LoRa e IoT, com o fortalecimento da infraestrutura de comunicação, capacitação técnica das equipes envolvidas e ampliação da rede de sensores. Com esses avanços, será possível consolidar uma gestão cada vez mais inteligente, responsiva e sustentável dos recursos hídricos, em consonância com os princípios da governança digital e da universalização do acesso à água.

Referências

- Alfacomp. *CF914 - Antena Yagi 14 dBi 900 MHz*. 2025. Acessado em: 31 jan. 2025. Disponível em: <<https://alfacomp.net/produto/cf914-antena-yagi-14-dbi-900-mhz/>>.
- ANATEL. *Resolução nº 454, de 11 de dezembro de 2006 (REVOGADA)*. 2006. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/index.php/component/content/article?id=89&utm_source=chatgpt.com>.
- ANATEL. *Resolução Anatel nº 757, de 08 de novembro de 2022*. 2022. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2022/1760-resolucao-757>>.
- ANATEL. *Resolução nº 759, de 19 de janeiro de 2023*. 2023. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2023/1834-resolucao-759>>.
- ANITHA, T. et al. A review on communication protocols of industrial internet of things. In: *2022 2nd International Conference on Computing and Information Technology (ICCIT)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 418–423.
- ARAÚJO, J. P. L. d. *Automação Residencial Usando Protocolo MQTT, Node-RED e Assistente Pessoal Inteligente*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/28522>>.
- Brasil, Banco Nacional de Habitação (BNH). *Plano Nacional de Saneamento (PLANASA)*. 1971. Plano público de saneamento básico instituído para reduzir déficits de abastecimento de água e esgotamento sanitário, centralizando a gestão e financiamentos via BNH e FGTS direcionados às Companhias Estaduais de Saneamento Básico (CESBs). Criado durante o regime militar; institucionalizou a estadualização dos serviços de saneamento básico no Brasil :contentReference[oaicite:1]index=1.
- BZIUK, W. et al. On http performance in iot applications: An analysis of latency and throughput. In: *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 0350–0355.
- CAESB, A. *Balanço Hídrico Dashboard*. 2022. Acessado em 2025-01-29. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiN2NhYTc1M2YtZmQ4ZC00MWVILTk4NTgtNDA2NDNIZTY1Y2JlIwidCI6ImUyMzMjMTC1>>.
- Canva. *Canva: Ferramenta de Design Gráfico Online*. 2025. [Acessado em: 30-Jan-2025]. Disponível em: <<https://www.canva.com>>.
- CHENG, Y.; ZHANG, H.; HUANG, Y. Overview of communication protocols in internet of things: Architecture, development and future trends. In: *2018 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 627–630.
- Cisco. *CILE: Digitizing a 3,500-kilometer water distribution network*. 2023. Acesso em: 3 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.cisco.com/site/us/en/about/case-studies-customer-stories/cile.html>>.

- CORPORATION, S. *SX1276/77/78/79 Datasheet*. [S.l.], 2021. Accessed: February 3, 2025. Disponível em: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf?srsltid=AfmBOOrIfcFXng4okDMSPe6Ahgw4xmsprDNKzY7YPM7qfPi17EiWB2Vd>>.
- CORPORATION, S. *LoRa Calculator*. 2025. <<https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator>>. Acesso em: 03 fev. 2025.
- DAKIC, K. et al. Lora signal demodulation using deep learning, a time-domain approach. In: *2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.
- GEORGE, A. R. On babylonian lavatories and sewers. *Iraq*, p. 273–279, 2015. Based on cuneiform sources about ancient Mesopotamian sewer systems.
- Google. *Google Earth*. 2025. Acessado em: 31 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/>>.
- GOV. *Marco Legal do Saneamento*. 2020. Acessado em 2025-01-29. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/saneamento/marco-legal-do-saneamento>>.
- HANIF, M.; NGUYEN, H. H. Frequency-shift chirp spread spectrum communications with index modulation. *arXiv preprint arXiv:2102.04642*, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2102.04642>>.
- HARTONO, R. et al. Improved data transmission of smart water quality sensor devices in bengawan solo river with lora. In: *2022 1st International Conference on Smart Technology, Applied Informatics, and Engineering (APICS)*. [S.l.]: IEEE, 2022. p. 171–174. Acesso em: 3 jun. 2025.
- HELTEC. *WiFi LoRa 32(V2)*. 2017. Acessado em 2025-01-19. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32v2/>>.
- HOFF, T. von; CREVATIN, M. Http digest authentication in embedded automation systems. In: *EFTA 2003. 2003 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings (Cat. No.03TH8696)*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 390–397 vol.1.
- International Organization for Standardization (ISO). *OSI Model – Open Systems Interconnection reference model*. 1984. ISO standard defining the seven-layer model for network communications, providing a universal framework for interoperability and troubleshooting. Referência ao modelo OSI como base pedagógica e teórica na comunicação em redes.
- KASHYAP, M. A comparative analysis and implementation of coap and mqtt for iot applications. *Journal of IoT Systems (Springer)*, 2025. Avaliação comparativa entre os protocolos MQTT e CoAP, destacando suas eficiências e cenários de uso em aplicações de Internet das Coisas.
- KOIKE, Y.; TAKYU, O. Water level monitoring system based on 429mhz lora with packet level index modulation. In: *2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 76–81.

- LATA, K.; SAINI, S. Hardware software co-simulation of an aes-128 based data encryption in image processing systems for the internet of things environment. In: *2020 IEEE International Symposium on Smart Electronic Systems (iSES) (Formerly iNiS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 260–264.
- LIGOWAVE. *LinkCalc - Teste de Visada*. 2025. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://linkcalc.ligowave.com/QuickLink/gPtP>>.
- MARQUET, A.; MONTAVONT, N.; PAPADOPoulos, G. Z. Investigating theoretical performance and demodulation techniques for lora. In: *2019 IEEE 20th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Washington, DC, USA: IEEE, 2019. p. 7. ISBN 978-1-7281-2480-5. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2019.8793014>>.
- MARQUET, A.; MONTAVONT, N.; PAPADOPoulos, G. Z. Investigating theoretical performance and demodulation techniques for lora. In: *2019 IEEE 20th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- MERCHÁN, D. F. et al. Open source scada system for advanced monitoring of industrial processes. In: *2017 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 160–165.
- Ministério das Cidades - Governo do Brasil. *Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)*. 2025. [Acessado em: 30-Jan-2025]. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/plano-nacional-de-saneamento-basico-plansab>>.
- MOHANI, S. S. et al. Scada system framework for monitoring, controlling and data logging of industrial processing plants. In: *2020 International Conference on Computational Intelligence (ICCI)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 149–152.
- NGOM, B. et al. Lora-based measurement station for water quality monitoring: Case of botanical garden pool. In: *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.
- NTT Global. *Smart water monitoring for a sustainable future*. 2023. Acesso em: 3 jun. 2025. Disponível em: <<https://www.global.ntt/insights-hub/smart-water-monitoring-for-a-sustainable-future/>>.
- NTT Services. *CILE: Smart water utility with NTT and Cisco*. 2023. Acesso em: 3 jun. 2025. Disponível em: <<https://services.global.ntt/en-us/about-us/case-studies/cile>>.
- SANCHEZ-GOMEZ, J. et al. Performance study of lorawan for smart-city applications. In: *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GF)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 58–62.
- SANESOLUTI. *Medidor de Volume/Vazão Ultrassônico Carretel a Bateria R500 – Ultramag*. 2022. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://sanesoluti.com.br/produto/medidor-de-volume-vazao-ultrassonico-carretel-a-bateria-r500-ultramag/>>.
- SANESOLUTI. *Medidor Ultrassônico Fixo Clampflow VK2000*. 2022. Acessado em 2025-01-20. Disponível em: <<https://sanesoluti.com.br/produto/https-sanesoluti-com-br-produtos-medidor-de-volumevazao-ultrassonico-fixo-nao-intrusivo-clampon-co->>.

- SEMTECH. *LoRa Modulation Basics. Semtech Technical Documentation.* 2015. <<https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>>.
- SILVA, L. A. *Estudo da Aplicação de um Sistema IoT Baseado no Protocolo de Comunicação MQTT na Área da Robótica Industrial.* Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24847>>.
- SIREGAR, B.; TANJUNG, K.; NURMAYADI, F. Remotely controlled water flow monitoring system with mechanical control on the faucet using lora communication. In: *2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI).* [S.l.]: IEEE, 2020. Acesso em: 3 jun. 2025.
- SYSTEMS, E. *Analog to Digital Converter (ADC) - ESP32 - Espressif Systems.* [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4/esp32/api-reference/peripherals/adc.html#adc-attenuation>>.
- TAPIA, E. Assessing industrial communication protocols to bridge automation systems. *IEEE Access (via PubMed Central)*, 2023. Discussão comparativa sobre protocolos industriais como Modbus, PROFIBUS, Profinet e Ethernet/IP, em relação à aplicabilidade, desempenho e adequação a redes locais e amplas.
- VANGELISTA, L. Frequency shift chirp modulation: The lora modulation. *IEEE Signal Processing Letters*, IEEE, v. 24, n. 12, p. 1818–1821, 2017. ISSN 1070-9908. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/LSP.2017.2762960>>.
- VELKI. *Datasheet Transmissor de Pressão VKP011.* 2020. Acessado em 2025-01-20. Disponível em: <<https://velki.com.br/pt/manual/pt/velki-manual-vkp011-transmissor-de-pressao-mini-ip65-a4.pdf>>.
- VELKI. *Datasheet Sonda de Nível em Teflon - VKL-213.* 2021. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://velki.com.br/pt/manual/pt/vkl-213-rev01.pdf?v=770>>.
- VELKI. *Sonda de Nível em Teflon - VKL-213.* 2021. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://velki.com.br/pt/produto/medidores-de-nivel-liquido/sonda-de-nivel-liquido/sonda-de-nivel-em-teflon---vkl-213>>.
- WEBLINE, T. *Telecom Weblne.* 2025. Acessado em 2025-01-21. Disponível em: <<https://www.weblinetelecom.com.br>>.
- WU, N.; KHAN, M. Lora-based internet-of-things: A water quality monitoring system. In: *2019 SoutheastCon.* [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.
- ZHAO, L.; PAN, J.; LAN, X. Design of fire water supply pipeline pressure monitoring system based on lora. In: *2024 IEEE 6th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC).* IEEE, 2024. p. 401–405. Acesso em: 3 jun. 2025. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10575566>>.