

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



Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de  
Monitoramento e Controle utilizando  
Arquitetura Híbrida de Comunicação

Emmanuel Leite de Medeiros

João Pessoa  
Setembro - 2021

Emmanuel Leite de Medeiros

# **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento e Controle utilizando Arquitetura Híbrida de Comunicação**

**Dissertação de Mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPB (área de concentração: Controle e Automação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGE

Orientador: Dr. Juan Moises Maurício Villanueva

Coorientador: Dr. Carlos Alberto de Souza Filho

João Pessoa-PB

Setembro de 2021



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

M488p Medeiros, Emmanuel Leite de.

Projeto e desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle utilizando arquitetura híbrida de comunicação / Emmanuel Leite de Medeiros. - João Pessoa, 2021.

64 f. : il.

Orientação: Juan Moises Maurício Villanueva.

Coorientação: Carlos Alberto de Souza Filho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Abastecimento de água - Monitoramento. 2. Sistemas de monitoramento e controle sem fio. 3. Sistemas de abastecimento de água. 4. Internet das coisas. 5. LoRa. I. Villanueva, Juan Moises Maurício. II. Souza Filho, Carlos Alberto de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 644.6-047.36(043)

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


A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

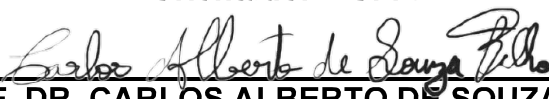
**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E  
CONTROLE UTILIZANDO ARQUITETURA HÍBRIDA DE COMUNICAÇÃO**

Elaborada por  
**EMMANUEL LEITE DE MEDEIROS**


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

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. DR. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA**  
Orientador – UFPB

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. DR. CARLOS ALBERTO DE SOUZA FILHO**  
Coorientador – UFPB

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

 Documento assinado digitalmente  
Antonio Marcus Nogueira Lima  
Data: 01/11/2021 11:09:34-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>  
\_\_\_\_\_  
**PROF. DR. ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA**  
Examinador Externo – UFCG

  
\_\_\_\_\_  
**PROF. DR. IVANOVITCH MEDEIROS DANTAS DA SILVA**  
Examinador Externo – UFRN

João Pessoa/PB, 29 de setembro de 2021

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelas ajudas e oportunidades concedidas de fazer este trabalho e pela oportunidade de evoluir o conhecimento adquirido na graduação.

Agradeço a família, a minha namorada Alana e aos amigos por todo apoio e carinho que ajudaram a aliviar o meu fardo do trabalho e superar dificuldades.

Agradeço aos professores, principalmente ao professor Carlos Alberto e professor Juan, e demais colegas que forneceram apoio e conhecimentos que auxiliaram no entendimento e na base de estudos do projeto.

*“Uma experiência nunca é um fracasso,  
pois sempre vem demonstrar algo.”  
(Thomas Edison)*

# Resumo

Um dos grandes desafios enfrentados por Sistemas de Abastecimento de Água é gerenciar eficientemente os recursos hídricos no decorrer da distribuição de água. Para considerá-los eficientes, é necessário utilizar ferramentas que proporcionem baixo consumo hídrico e energético, baixo custo de manutenção e que forneçam água mediante a demanda exigida. Entretanto, devido ao seu dimensionamento e particularidades, esses sistemas possuem uma série de dificuldades de projeto como: alto custo operacional e de implementação; ausências de soluções versáteis e robustas para monitoramento e controle. Essas dificuldades acarretam em um dos principais problemas em sistemas de abastecimento, que são as perdas por vazamentos. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, mais de 39% de água potável é desperdiçada devido a vazamentos ao longo de sua distribuição. Com o surgimento da Indústria 4.0, novos conceitos e tecnologias vêm sendo aplicados em Sistemas de Abastecimento de Água, a fim de melhorar o monitoramento e controle de processos industriais. Dentre eles, destaca-se o conceito de Internet das Coisas ou *Internet of Things*. O uso desse conceito na indústria permite a interconexão entre sensores e atuadores por meio de dispositivos de telecomunicação, trazendo benefícios como redução de custos de implementação, de manutenção e ampliação da cobertura de redes industriais. Entretanto, a pouca robustez do sinal de rádio frequência, o baixo alcance de transmissão e o elevado consumo energético de dispositivos são alguns dos principais empecilhos enfrentados por soluções sem fio. Dessa forma, neste trabalho tem-se como objetivo o desenvolvimento de um sistema de aquisição e controle com funcionalidade de comunicação híbrida. O sistema é composto por módulos de comunicação sem fio de longa distância e baixo consumo energético (LoRa), além de ser compatível com protocolos de comunicação consolidados industrialmente. A estrutura híbrida minimiza o custo envolvido no uso de LoRa, uma vez que permite interconectar sensores e atuadores nas proximidades do ponto de transmissão através de cabos. Além disso, o uso de LoRa pelo sistema permite o monitoramento e controle de reservatórios, adutoras ou estações elevatória de água de forma remota, localizados principalmente em pontos sem acesso a *internet* ou telefonia móvel. Em testes realizados, o alcance da transmissão do sistema via LoRa foi em torno de 1,1 km. Destaca-se também o erro médio de medição de 0,78% e o acionamento remoto do controlador por um servidor *web*.

**Palavras-chaves:** LoRa. Sistemas de Monitoramento e Controle Sem Fio. Sistemas de Abastecimento de Água. Internet das Coisas

# Abstract

One of the biggest challenges of water supply systems is to manage water resources appropriately and efficiently during the distribution. These systems are efficient when they use or implement tools that provide low water and energy consumption, low maintenance cost and supply water according to demand. However, there are many design problems related to water supply systems due to their dimensions and particularities, such as high cost of implementation and operation and lack of monitoring for different scenarios, resulting in problems such as leakage. According to a Brazilian research from Sanitation National Information System 39% of water is wasted due to leakage. The Industry 4.0 concept brings new techniques and technologies that benefit water supply systems and improve the monitoring and control of the industrial process, such as the Internet of Things (IoT). The IoT in industry systems allows the interconnection between sensors and actuators through telecommunication devices and brings benefits such as low costs of implementation and maintenance and increased coverage of sensing and performance. However, the poor signal strength of radio frequency devices, the low signal coverage and the high power consumption are some of the problems faced by wireless systems. Therefore, this work aims to develop an acquisition and control system with hybrid communication. The system has long-range, low-power (LoRa) modules, in addition to compatibility with various industrial protocols. The hybrid structure minimizes the cost of deployment with LoRa, as it allows the interconnection of sensors and actuator in the vicinity of the transmission point through cables. The LoRa used in the system allows a remote monitoring and control of water tanks, pipelines or water pump stations in areas without internet or mobile data coverage. The system transmission through LoRa reaches 1.1 km. The main results to be highlighted are the mean of measurement of 0,78% and the remote triggering of control through a web server.

**Keywords:** LoRa. Wireless Monitoring and Control System. Water Supply Systems. Internet of Things.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Spread Spectrum ou Espalhamento Espectral - Fonte: (HAYKIN; MOHER, 2008) . . . . .	11
Figura 2 – Estrutura da comunicação do protocolo MQTT - Fonte: Própria do autor	13
Figura 3 – Sistema de abastecimento de água. Fonte: (TSUTIYA, 2006) . . . . .	16
Figura 4 – Componentes de uma estação elevatória de água. Fonte: (TSUTIYA, 2006) . . . . .	16
Figura 5 – Diagrama de forças em um elemento fluido em equilíbrio. Fonte: Própria do autor . . . . .	18
Figura 6 – Sistema de Abastecimento na Paraíba. Fonte: SNIRH . . . . .	19
Figura 7 – Situação do Abastecimento de Água e Distribuição da população no Brasil. . . . .	20
Figura 8 – Mapa de cobertura de telefonia móvel. Fonte: ANATEL . . . . .	22
Figura 9 – Diagrama de Rede com o sistema proposto. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	24
Figura 10 – Arquitetura do hardware. Fonte: Própria do autor . . . . .	24
Figura 11 – Módulo LoRa. Fonte: Ebyte . . . . .	26
Figura 12 – Módulo LoRa. Fonte: Própria do Autor . . . . .	27
Figura 13 – Cenário com uso do SADIR. Fonte: Própria do autor . . . . .	28
Figura 14 – Interface Web Implementada. Fonte: Própria do Autor. . . . .	29
Figura 15 – Diagrama de Estados do Firmware. Fonte: (MEDEIROS et al., 2021). . . . .	30
Figura 16 – Protocolo de Comunicação do SADIR. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021). . . . .	31
Figura 17 – Cenário utilizado na análise de transmissão. Fonte: (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	33
Figura 18 – Ruído do Chevrolet Prisma captado pelo Analisador de Espectro. Fonte: (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	36
Figura 19 – Cenário para análise da aquisição. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	37
Figura 20 – Ruído na saída do circuito de condicionamento: a) Sem blindagem. b) Com blindagem Fonte: (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	39
Figura 21 – Ruído coletado pelo supervisor Fonte: (MEDEIROS, 2018) . . . . .	41
Figura 22 – Vista de Frente. Fonte: Própria do Autor . . . . .	42
Figura 23 – Vista de Trás. Fonte: Própria do Autor . . . . .	43
Figura 24 – Sensor MPX5010 e Conjunto de bombas. Fonte: Própria do Autor. . . . .	43
Figura 25 – Imagem visualizada pela câmera de monitoramento. Fonte: Própria do Autor . . . . .	44

Figura 26 – Malha de Controle da Plataforma de Tanques. Fonte: Própria do Autor	45
Figura 27 – Resposta do Controlador. Fonte: Própria do Autor . . . . .	46



# Lista de tabelas

Tabela 1 – <i>Spreading Fator</i> e Comprimento do código de Espalhamento (SEM-TECH, 2016) . . . . .	12
Tabela 2 – Comparação do Erro de Aquisição do Sensor MPX com relação ao Manômetro e PROMAG 30F. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	38
Tabela 3 – Comparativo de custos entre SADIR e CLPs. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021) . . . . .	47

# Lista de abreviaturas e siglas

SAA	Sistema de Abastecimento de Água
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
LoRa	<i>Long Range</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
SNHIR	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicação
SADIR	Sistema de Aquisição de Dados e Interface de Rede
EEA	Estação Elevatória de Água
ETA	Estação de Tratamento de Água
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
LAC	Laboratório de Automação e Controle

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	1
1.1	Objetivos . . . . .	4
1.2	Principais Contribuições . . . . .	4
1.3	Estrutura do Trabalho . . . . .	5
2	ESTADO DA ARTE . . . . .	6
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	10
3.1	Tecnologia LoRa . . . . .	10
3.1.1	LoRa PHY . . . . .	10
3.2	Protocolo MQTT . . . . .	12
4	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA . . . . .	15
4.1	Sistemas de Abastecimento de Água . . . . .	15
4.2	Contextualização e Cenários para Aplicações . . . . .	19
5	DESCRIÇÃO DO SISTEMA . . . . .	23
6	RESULTADOS . . . . .	32
6.1	Análise da Comunicação sem fio . . . . .	32
6.2	Análise da aquisição de variáveis hidráulicas . . . . .	37
6.3	Análise do controle de nível . . . . .	42
6.4	Outras Análises . . . . .	46
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	48
	REFERÊNCIAS . . . . .	50

# 1 Introdução

Presentes na sociedade e indústria, os sistemas de controle podem ser encontrados em inúmeras aplicações, como no controle de processos em minas de carvão (KUNKUN; XIANGONG, 2014), regulagem do nível e concentração química de líquidos em tanques (NISE, 2017) e controle da distribuição de óleo em oleodutos (LI et al., 2018).

Muitos dos sistemas de controle industriais usam métodos clássicos de controle, como por exemplo: utilização de controlador *on/off* e PI (proporcional e integral) no controle de temperatura de termo-formação de plástico (HERNANDEZ-AMBATO et al., 2018) e uso de controlador PID (proporcional, integral e derivativo) para estabilização de robôs humanoides (LÓPEZ et al., 2013).

Além dos métodos clássicos, novas estruturas e técnicas têm sido aplicadas em implementações de sistemas de controle como Internet das Coisas (IoT)<sup>1</sup>, inteligência artificial e computação em nuvem. Essas estruturas e técnicas surgiram devido ao processo de modernização denominada de quarta revolução industrial ou indústria 4.0. Dentro desse contexto, pode-se citar aplicações como: uso de inteligência artificial e computação em nuvem em sistemas de distribuição de energia (WANG et al., 2018); aplicação de IoT no controle e monitoramento de tráfego urbano (ZHU et al., 2019).

Tanto os sistemas de controle clássicos quanto os modernos são aplicados ao monitoramento e controle de diversos processos e recursos, como por exemplo a água. Ela é um recurso essencial à vida e influencia diversos setores industriais como química ou agricultura, além dos setores da economia e saúde (KASHID; PARDESHI, 2014). Um dos setores a ser destacado neste trabalho é o setor de abastecimento de água.

O setor de abastecimento de água é formado por um sistema composto por equipamentos e serviços voltados para o fornecimento de água para residências e indústrias (MOREIRA et al., 2020). Um dos maiores desafios enfrentados em Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) é a distribuição e gerenciamento eficientes de recursos hídricos. Pode-se considerá-los eficientes a partir do momento em que operam com baixo consumo de água e energia, com baixo custo de manutenção e distribuem água mediante a demanda exigida pelo consumidor (RIGHETTO, 2002).

Os SAAs possuem uma diversidade de cenários em que os sistemas de controle podem ser aplicados. Entre as aplicações, tem-se o monitoramento e controle da vazão e pressão em adutoras, monitoramento e controle da dosagem de substâncias químicas no processo de tratamento de água ou controle do bombeamento de água em estações elevatórias.

---

<sup>1</sup> Do inglês *Internet of Things*

Porém, há uma série de fatores que dificultam a otimização de SAAs, tais como: o dimensionamento estrutural; o alto custo operacional; ausência de técnicas de detecção de perdas; ausência de sistemas capazes de operar em diferentes cenários; ausência de sistemas que atuem em locais remotos e sem acesso a internet. Esses fatores impactam diretamente na complexidade de implementação de projetos e de soluções para SAAs (MOREIRA et al., 2020). Esses empecilhos ocasionam um dos principais problemas vistos em sistemas de abastecimento de água, que é a perda por vazamento de água.

Vazamentos de água acarretam no desperdício e contaminação da água, além de representarem riscos aos edifícios ou construções (SHERKSI et al., 2013). Em um estudo apresentado pelo Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) (2019), cerca de 39% de água é perdida ao longo da distribuição devido a vazamentos na rede de distribuição. Esse vazamentos podem ser ocasionadas devido à ineficiência da soluções utilizadas; pela ausência de aplicação de sistemas de monitoramento e controle em determinadas regiões; e por ligações clandestinas.

Para minimizar o impacto desses problemas e aumentar a eficiência das SAAs, pode-se encontrar na literatura alternativas como a interconexão de sensores em rede para controle e monitoramento de processos ao longo da distribuição de água (MOREIRA et al., 2020) e desenvolvimento de algoritmos de otimização de pressão e fluxo de redes hidráulicas (RIGHETTO, 2002).

As soluções comumente aplicadas em SAAs são constituídas por sensores, atuadores e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) (HOFFMANN, 2019). Esses componentes são estruturados de forma centralizada, em que os sensores e atuadores estão conectadas diretamente aos CLPs através de cabos. Em aplicações mais complexas, estruturam-se esses componentes em rede a fim de reduzir o uso de cabos na conexão direta entre esses elementos e o CLP (SIDDESH et al., 2016).

Entretanto, há uma série de problemas acerca dessas soluções como: alto custo de implementação da rede cabeada; alto custo de dispositivos como CLPs; pouca mobilidade de instalação; e limitações quanto ao alcance da rede (GOMES et al., 2014). Em sistemas de abastecimento de água, tais problemas são observados em situações como o monitoramento de pontos de pressão em adutoras. Como são estruturas de ampla extensão de comprimento, o custo de implementação pode ser elevado devido ao uso de cabos. Outra situação é o controle do bombeamento de água de uma estação elevatória de água através do monitoramento do nível reservatórios. Este elemento pode estar distante da estação elevatória e localizado em um ponto de difícil acesso. Nessa situação, além do custo elevado, a falta de mobilidade no uso de cabos pode afetar a instalação de uma rede cabeada.

Com o surgimento da indústria 4.0, dispositivos IoT e sem fio são alternativas em implementações de redes de sensores e atuadores. Devido à ausência de cabos, as redes sem fio trazem benefícios como maior flexibilidade e baixo custo, tanto de instalação

quanto de manutenção, assim como a ampliação da cobertura de sensoriamento e atuação (CENTENARO et al., 2016). Em sistemas de abastecimento, a aplicação de IoT torna-se interessante uma vez que é possível monitorar e controlar pontos distantes entre si através da *internet*.

Todavia, não só os sistemas tradicionais, mas as soluções mais modernas também possuem problemas. A respeito do uso de sistemas sem fio, pode-se citar: a baixa robustez do sinal de dispositivos de radio frequência (RF); a limitação de alcance de transmissão de certas tecnologias; o alto consumo energético de sistemas alimentados por baterias (PARK et al., 2017; ARAÚJO et al., 2013). Com relação a IoT, no Brasil, há dificuldades na aplicação desse conceito. Isso é devido ao fato de que muitas regiões não possuem área cobertura de telefonia ou dados móveis adequadas.

Dessa forma, observa-se que as soluções para SAAs possuem diversas limitações como: o custo elevado de implementação devido ao uso de cabos para monitoramento e controle a longas distâncias; alto custo associado aos CLPs; dificuldades de monitoramento em regiões remotas e com baixa cobertura de telefonia ou dados móveis.

Considerando essas limitações e a necessidade de otimização de sistemas de abastecimento de água, neste trabalho é apresentado um dispositivo de aquisição e controle de dados com comunicação híbrida. Esse tipo de comunicação permite que o sistema faça aquisições de dados e controle as variáveis de processo de um SAA de duas formas: localmente, através de módulos de comunicação cabeados; e remotamente, a longas distâncias, a partir do uso de módulos de comunicação sem fio de baixo consumo energético e longo alcance (LoRa). Dessa forma, os custos de implementação com cabos para a transmissão de dados a longas distâncias são reduzidos, além de aumentar a flexibilidade e mobilidade de instalação em diferentes cenários. Além disso, é possível estabelecer uma ponte de comunicação entre redes sem fio e redes cabeadas consolidadas industrialmente (MEDEIROS et al., 2021).

A utilização de módulos LoRa permite que o sistema proposto monitore remotamente trechos de SAAs que estejam inseridas em regiões sem cobertura telefonia, dados móveis ou internet.

Com o sistema proposto, há diversas aplicações como por exemplo: monitorar remotamente o nível de reservatórios em regiões sem cobertura de dados móveis. A partir dos dados monitorados, controla-se localmente o bombeamento em estações elevatórias da água a ser transportada para esses reservatórios. Também é possível monitorar remotamente diversos pontos de uma adutora e controlar o bombeamento de água nela percorrido. Através dessas aplicações, pode-se regular as pressões nas linhas de distribuição, evitando possíveis vazamentos por excesso de pressão e reduzindo os índices de desperdício de água.

## 1.1 Objetivos

Neste trabalho de Dissertação de Mestrado tem-se como objetivo apresentar um sistema de aquisição de dados e controle com comunicação híbrida. O intuito do sistema é monitorar e controlar, localmente e remotamente, processos em vários cenários de um SAA, principalmente em pontos sem cobertura de internet ou telefonia. Dentre os objetivos alcançados neste trabalho, destacam-se os seguintes:

1. Desenvolvimento um sistema capaz de fazer aquisição de dados, principalmente de forma remota via LoRa.
2. Implementação de um *hardware* que permita a comunicação híbrida, isto é, que seja compatível com padrões industriais consolidados e módulos de comunicação sem fio.
3. Implementação de *drivers* e controlador para controle de bombas em SAAs.
4. Desenvolvimento de interfaces que permitam monitorar e controlar remotamente as variáveis e processos de SAAs.
5. Desenvolvimento de um protocolo responsável por fazer o controle da troca de dados entre os diferentes módulos de comunicação usado no sistema.

## 1.2 Principais Contribuições

Dentre as contribuições deste trabalho, destacam-se:

1. O desenvolvimento de um sistema de comunicação híbrida, capaz de integrar a comunicação entre redes industriais cabeadas com redes sem fio. O objetivo desse desenvolvimento é fornecer flexibilidade e robustez ao sistema. Com isso, o sistema é capaz de se adaptar a diversos cenários de SAAs e de resistir à interferências devido ao uso de padrões industriais consolidados.
2. O desenvolvimento de um sistema capaz de adquirir sinais de sensores comerciais e industriais, principalmente aqueles utilizados em SAAs. Além disso, é capaz de controlar processos envolvidos em SAAs, como o bombeamento de água.
3. A implementação de uma interface em um servidor Web para armazenar dados, exibir o comportamento do controlador e acionar remotamente o controle de bombeamento de água.
4. Detecção da influência da comunicação de módulos LoRa em sensores industriais e detecção de ruídos externos que causam interferências na transmissão de dados via LoRa.

No que diz respeito à divulgação dos resultados obtidos durante a pesquisa deste trabalho, lista-se a seguinte produção:

1. *Data Acquisition System using Hybrid Network based on LoRa for Hydraulic Plants* publicado na *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (MEDEIROS et al., 2021).

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, o trabalho encontra-se organizado em mais 6 capítulos:

No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte, em que são abordados as soluções atuais para monitoramento e controle sem fio e o impacto do uso de tecnologia sem fio.

No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica a respeito de sistemas de monitoramento e controle sem fio, a tecnologia LoRa e protocolo MQTT.

No Capítulo 4 são abordados a estrutura de sistemas de abastecimento de água, as variáveis envolvidas no processo de monitoramento e controle, além de abordar os problemas enfrentados pelos sistemas de abastecimento de água.

No Capítulo 5 é apresentada a descrição do sistema proposto utilizado para o monitoramento e controle de redes hidráulicas.

No Capítulo 6 são abordados os resultados de testes realizados com o sistema e o custo de implementação.

Por último, no Capítulo 7 são apresentadas as considerações finais do trabalho, destacando-se pontos fortes do sistema e das aplicações realizadas, assim como as perspectivas para a continuação deste trabalho.



## 2 Estado da Arte

Os sistemas de controle estão presentes tanto em aplicações simples do dia a dia quanto em aplicações industriais. Muitos dos elementos fazem uso de componentes cabeados, sendo que, em aplicações mais complexas, são estruturados em rede. Em sistemas de controle, os sensores coletam informações e as envia para dispositivos centrais, que monitoram e controlam a rede (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007).

Embora a tecnologia empregada em sistemas de controle em rede tenha amadurecido, as indústrias começaram a adotar dispositivos sem fio ao invés de dispositivos cabeados (BAILLIEUL; ANTSAKLIS, 2007). Após o advento do conceito de indústria 4.0, houve um aumento nas aplicações de dispositivos sem fio em redes de sensores industriais.

A agricultura é um setor que se beneficia com o uso de tecnologias sem fio. Segundo Kim, Evans e Iversen (2008), existe uma grande necessidade no monitoramento e controle dos sistemas de irrigação. Contudo, o uso de cabos nos campos de irrigação são um grande problema pois costumam ser onerosos devido à extensão da área a ser monitorada e podem comprometer algumas atividades agrícolas. Como solução, os autores adotaram uma rede *wireless* via Bluetooth.

Em (MIRABELLA; BRISCHETTO, 2011) foi avaliado o uso da tecnologia Zigbee para monitorar uma série de estufas. Em estufas é comum trocar o tipo de cultivo periodicamente ou mudar as posições das mesmas. Para essa aplicação, as RSSF proporcionam flexibilidade de instalação e manutenção.

Também é possível ver outras aplicações na agricultura em (GUTIÉRREZ et al., 2013). Dessa vez, foram utilizados módulos Zigbee para estruturar a rede de sensores. Os nós sensores estavam conectados a baterias, sendo necessário o uso de módulos de transmissão sem fio de baixo consumo energético, como Zigbee. Os dados dos sensores são enviados a um servidor *Web* através de um *gateway* Zigbee-GPRS. Esse *gateway* é responsável por fazer uma ponte de comunicação entre dispositivos Zigbee e GPRS. Os dados do servidor web, por sua vez, são acessados em tempo real por celular ou computador com conexão à internet. Além disso, o servidor permite programação e controle do tempo de irrigação do sistema.

Em (RAM et al., 2015), foi desenvolvido um sistema supervisor baseado em tecnologia GSM que visa proteger plantações agrícolas contra a aridez ou excesso de água no solo. Nessa aplicação, há sensores que monitoram o estado do solo por meio de sensores instalados na plantação. Esses sensores enviam alertas para um supervisor por meio de um modem GSM, indicando a necessidade de drenar o solo ou irrigá-lo. A depender da situação, o usuário, por meio de um celular com internet, enviará o comando necessário

para drenagem ou irrigação do solo.

Em (RAHMATI; YAZDIZADEH; YAZDIZADEH, 2017) a tecnologia sem fio utilizada também foi GSM. Nessa aplicação, sensores ultrassônicos foram usados para a detecção de vazamentos em tubulações de gás. Esses sensores estavam conectados a microcontroladores com transceptores GPRS/GSM embarcados. Os dados eram enviados e armazenados em um servidor em nuvem, que era acessado remotamente por uma central de controle. Essa central é responsável por controlar remotamente atuadores localizados em pontos específicos da tubulação a fim de amenizar os vazamentos de gás. Atrelado a essa tecnologia sem fio, existem algoritmos de inteligência artificial que, com os dados monitorados, modelam a rede de distribuição de gás.

Segundo Park et al. (2017), há várias aplicações que demonstram a importância e o impacto do uso de dispositivos sem fio em sistemas de monitoramento e controle. No que concerne a veículos automotivos, a adoção de dispositivos sem fio visa a redução de custos de manufatura e manutenção com fios de transmissão de dados e de alimentação de sensores. Os fios podem ser equivalentes a 40 kg de peso e chegam a percorrer até 4 km dentro dos veículos (PARK et al., 2017). Com a aplicação de dispositivos sem fio em rede, a comunicação de sensores e atuadores com unidades de controle se dá por meio de transmissão sem fio. Assim, reduz-se o peso devido aos fios, melhorando a eficiência, dinâmica, consumo e outros fatores dos veículos.

De maneira similar aos automóveis, as aeronaves contêm uma gama de sensores e atuadores (cerca de 5000 dispositivos) interconectados por uma vasta rede cabeada, representando cerca de 2 a 5% do peso do avião. A quantidade de fios no modelo A350-9000 pesa aproximadamente 23 toneladas, afirmam Park et al. (2017). Entre os dispositivos sem fio em aviões, estão sensores de detecção de fumaça e gelo na estrutura da aeronave, bem como sensores no motor e no trem de pouso. Em 2015, a União Internacional de Telecomunicações concedeu o uso das bandas de frequência entre 4,2 e 4,4 GHz em aplicações *wireless* como forma de substituição dos fios de aeronaves.

O impacto de sistemas sem fio pode ser visto na automação de prédios. Neste tipo de aplicação, integram-se componentes de aquecimento ou refrigeração de salas, sistemas de bombeamento, etc. Esses sistemas são voltados à otimização do consumo de energia elétrica e água de prédios. O uso de sensores e atuadores sem fio na automação industrial podem economizar cerca de 90% do custo de desenvolvimento em comparação à implementação de sistemas cabeados (PARK et al., 2017).

Apesar da variedade de soluções e aplicações em redes sem fio, as tecnologias empregadas em sistemas de controle possuem limitações. Tecnologias como Bluetooth ou Zigbee têm baixo consumo de energia, sendo interessante para aplicações com sensores alimentados com bateria mas que possuem baixa cobertura de sinal. Já sistemas com sinal GPRS/GSM têm ampla cobertura, porém com a utilização de vários sensores e atuadores,

é possível haver um congestionamento na transmissão e recepção de dados (CENTENARO et al., 2016). Além disto, dependendo da localização da aplicação, é possível ter baixa potência de comunicação, dificultando a utilização dessa tecnologia em certas regiões (MEDEIROS et al., 2019).

Mediante essas limitações, novas tecnologias vêm surgindo, como por exemplo o LoRa, cuja aplicação é voltada para implementações de redes de baixo consumo energético, longo alcance de transmissão e aplicações IoT (CENTENARO et al., 2016). Dessa forma, estudos e aplicações estão sendo realizados com essa tecnologia.

Em (RIZZI et al., 2017), é apresentado um estudo que avalia o comportamento do uso da tecnologia LoRa em certas aplicações como automação industrial e residencial. Nesse estudo foram levados em consideração parâmetros como latência e número de nós da rede. Ao fim do estudo, observa-se que a tecnologia empregada satisfaz as necessidades das aplicações mencionadas.

Guibene et al. (2017) apresentaram uma avaliação dentro do contexto de cidades inteligentes. Nesse trabalho, avaliou-se a viabilidade da tecnologia LoRa aplicada a um estudo de caso de monitoramento de rios. O sistema projetado é composto por uma boia que contém sensores alimentados por bateria e painel solar, que monitoram fatores como temperatura, profundidade do rio, velocidade da boia e alimentação da bateria. Os dados foram enviados a cada 10 minutos aos *gateways* LoRa espalhados ao longo do rio, que encaminhavam os dados para internet, permitindo o monitoramento remoto dos dados. Nesse foram obtidos resultados satisfatórios no que se refere à alimentação do sistema durante um período de 8 meses.

Os autores Ochoa et al. (2017) fizeram uma análise com módulos LoRa e avaliaram o consumo em diferentes topologias de rede (*star* e *mesh*). Alterando determinados parâmetros dos módulos, é possível otimizar o consumo energético em ambas topologias.

Já os autores Rahman et al. (2018) realizaram a análise de propagação entre módulos LoRa a fim de substituir terminais de transmissão de dados climáticos. Esses terminais são aplicados em locais remotos, como zonas rurais, e utilizam comunicação via satélite para transmissão de dados. Contudo, apesar da transmissão ser confiável, os custos de aplicação e manutenção são elevados. Para essa aplicação, os autores observaram que os módulos LoRa podem ser uma alternativa eficiente e de baixo custo para substituírem esses terminais.

Outro estudo, conduzido por Jr et al. (2018), analisou a performance de uma rede com módulos LoRa, buscando otimizar a rede por meio da variação da antena usada pelos módulos.

Além dos estudos e análises, há também aplicações práticas com o uso de LoRa. Os autores Saravanan, Das e Iyer (2017) usaram esta tecnologia para monitorar e controlar o

fluxo de uma rede de água de um canal em uma cidade. Já os autores [Zhao et al. \(2017\)](#) aplicaram a tecnologia LoRa em irrigação de campos agrícolas. Segundo eles, a distância de comunicação entre o nó sensor instalado em um determinado ponto de irrigação e o *gateway* responsável por coletar os dados e enviá-los a um servidor *Web* é de até 8 km. Portanto, o sistema de irrigação proposto pode cobrir até 200 hectares.

A rede de sensores *wireless* com LoRa também tem sido utilizada em detecção de fogo em florestas, apontam [Adnan et al. \(2018\)](#). Nesse caso, vale destacar o uso da topologia *mesh* na RSSF pois, caso um nó se desconecte da rede, existem outras rotas para o dado percorrer até a central de monitoramento. Os autores [Huh e Kim \(2019\)](#) apontam outras aplicações de módulos LoRa e rede *mesh*, como por exemplo aplicações em sistemas de monitoramento de tubos de incêndio, controle inteligente da iluminação urbana, monitoramento e controle de tubulações de gases tóxicos.

Os autores [Bhawiyuga et al. \(2019\)](#) utilizaram, em sua aplicação, o protocolo MQTT para fazer a conexão de *gateways* LoRa à internet, pois este protocolo tem características de uso de pouca largura de banda e baixo consumo energético.

Tendo vista as pesquisas atuais que estão sendo realizadas na área de monitoramento e controle, este trabalho visa desenvolver um sistema de monitoramento e controle de grandezas hidráulicas utilizando comunicação LoRa e o conceito de IoT, a fim de fornecer uma solução de baixo custo quando comparado com soluções tradicionais.

## 3 Fundamentação Teórica

Neste Capítulo, são abordados os conteúdos necessários para o entendimento da implementação proposta neste trabalho. O Capítulo é subdividido em: Tecnologia LoRa, em que é apresentado sucintamente seu funcionamento; e Protocolo MQTT, em que são apresentadas as características de funcionamento.

### 3.1 Tecnologia LoRa

A indústria 4.0 visa solucionar problemas atuais como eficiência de recursos e energia ([KAGERMANN; WAHLSTER, 2013](#)) através da automação inteligente de sistemas. Uma das formas melhorar a eficiência do consumo energético é através da adoção de redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*).

As redes LPWAN são focadas em baixa taxa de transferência de dados, baixo custo, além de garantir o maior alcance de transmissão com baixo consumo energético. São redes que estão atreladas ao conceito de IoT ([LAVRIC; POPA, 2017](#)) e são formadas por diferentes tecnologias. Essas tecnologias são classificadas em dois tipos baseados no alcance de transmissão ([LAVRIC; POPA, 2017](#)): LPWANs com menos de 1000 m de alcance, como Zigbee, WiFi e Bluetooth; LPWANs com mais de 1000 m de alcance, como LoRa, Sigfox e DASH7.

LoRa, do inglês *Long-Range*, é uma tecnologia de comunicação de radio frequência (RF) empregada principalmente em dispositivos alimentados por bateria devido ao baixo consumo energético e que permitam um longo alcance de cobertura de sinal ([AUGUSTIN et al., 2016](#)). Utilizando o modelo OSI (*Open System Interconnection*), essa tecnologia é encontrada na camada física, que será utilizada neste trabalho, e camada de enlace.

#### 3.1.1 LoRa PHY

A camada física (LoRa PHY) foi desenvolvida pela empresa Semtech. Nela se encontram detalhes das faixas de frequência de operação, cobertura de transmissão, modulação, entre outros parâmetros.

Uma das principais características encontradas na camada física de módulos LoRa é a sua modulação, denominada *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Segundo a [Semtech \(2016\)](#), essa modulação é responsável por proporcionar aos módulos LoRa um longo alcance e maior imunidade a interferências e interceptações.

*Spread Spectrum* ou Espalhamento Espectral é uma técnica de modulação que

espalha um sinal ao longo de todo o espectro, fazendo com que o sinal resultante tenha uma largura de banda maior que o sinal original. Para que esse processo ocorra, é necessário inserir um código de espalhamento ao sinal original (HAYKIN; MOHER, 2008), como ilustrado na Figura 1. Como consequência desse espalhamento, a amplitude do sinal diminui à medida que o sinal é espalhado.

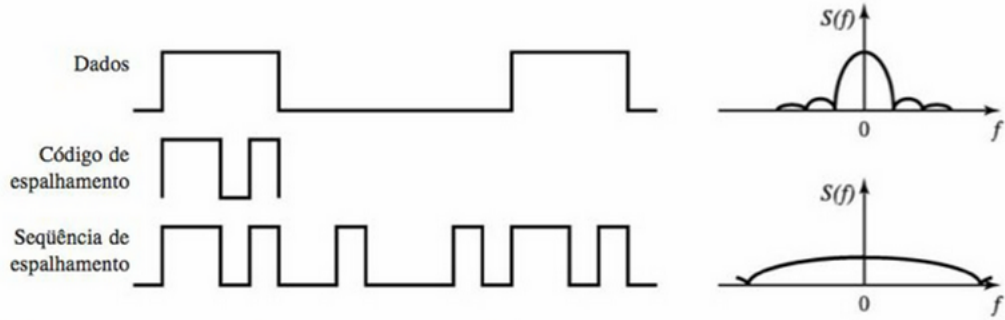


Figura 1 – Spread Spectrum ou Espalhamento Espectral - Fonte: (HAYKIN; MOHER, 2008)

No caso da técnica CSS, esse código de espalhamento é um sinal *Chirp* cuja característica é variar a frequência de um sinal ao longo do tempo (MANN; HAYKIN, 1995). Segundo Haykin e Moher (2008), a técnica de espalhamento espectral fornece ao sistema maior imunidade ao ruído devido ao código de espalhamento utilizado na transmissão do sinal também ser utilizado na recepção para decodificação e reestruturação do sinal de dados. Supondo que o sinal transmitido (sequência de espalhamento na Figura 1) sofra interferência externa, o sinal recebido será a sequência de espalhamento mais ruído. Ao aplicar o código de espalhamento no sinal recebido, a sequência de espalhamento retorna à sua forma original, enquanto o ruído é espalhado por todo o espectro, tendo sua amplitude reduzida e ruído minimizado, podendo este ser eliminado por um filtro posteriormente.

Na modulação LoRa, um dos principais parâmetros para configuração dos módulos a ser destacado é o *spreading factor* (SF). Conforme Semtech (2016), o SF é um fator que determina o comprimento do código de espalhamento e sua relação pode ser encontrada na Tabela 1.

Outro parâmetro importante é a taxa de transmissão de dados no ar ( $R$ ) que depende do SF e também da *largura de banda* do sinal ( $BW$ ), conforme a Equação 3.1. Por fim, o *coding rate* (CR) é um parâmetro usado para detecção e correção de erros. Através da configuração desses parâmetros é possível determinar o alcance da cobertura de transmissão dos sinais de módulos LoRa.

$$R = \frac{BW * CR}{2^{SF}} \text{ bit/sec} \quad (3.1)$$

Tabela 1 – *Spreading Fator* e Comprimento do código de Espalhamento ([SEMTECH, 2016](#))

Spreading Factor (SF)	Comprimento em Bytes do código de espalhamento*
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

\* O valor do comprimento é dado pela relação  $2^{SF}$

Os módulos LoRa operam nas faixas de frequência não licenciadas ISM (*Industry, Science and Medical*), que variam de acordo com regras estipuladas por cada país ou continente. Segundo a agência reguladora do Brasil, a Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), as faixas que módulos LoRa podem operar em locais públicos no Brasil são 902 a 907,5 MHz e 915 a 928 MHz.

## 3.2 Protocolo MQTT

*Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) é um protocolo de comunicação assíncrono, baseado no protocolo TCP/IP e foi desenvolvido pela IBM com o objetivo de conectar sensores a diferentes máquinas (M2M<sup>1</sup>) usando baixa taxa de transmissão ([IBM Developers, 2021](#)).

Por se basear no modelo *publish-subscribe*, os dispositivos que usam o protocolo MQTT geralmente trocam mensagens por meio de publicações automáticas em certos momentos. Isto significa que não ocorrem requisições para troca de mensagens, como acontece no protocolo TCP/IP. Dessa forma, os dispositivos gastam menos energia durante a troca de dados, sendo uma característica atrativa para aplicações IoT ([BHAWIYUGA et al., 2019](#)).

### Modelo Publish-Subscribe

*Publish-Subscribe* (Publicação-Assinatura) é baseado em dois principais componentes: *Broker* e Cliente. O *Broker* é responsável por receber, filtrar e encaminhar os dados recebidos dos Clientes à destinação correta. O Cliente é todo elemento capaz de interagir e trocar mensagens com o *Broker*, como por exemplo sensores IoTs ([IBM Developers, 2021](#)). As mensagens são organizadas hierarquicamente em tópicos.

<sup>1</sup> Machine to Machine

O cliente pode ser dividido em *publisher* e *subscriber*. O *publisher* é aquele que publica informações em um tópico, que é gerenciado pelo *broker*, enquanto o *subscriber* é aquele que assina um tópico para receber uma mensagem. Quando um cliente faz essa assinatura, o *broker* automaticamente encaminha a mensagem publicada no tópico para este cliente, evitando com que o *subscriber* faça requisições.

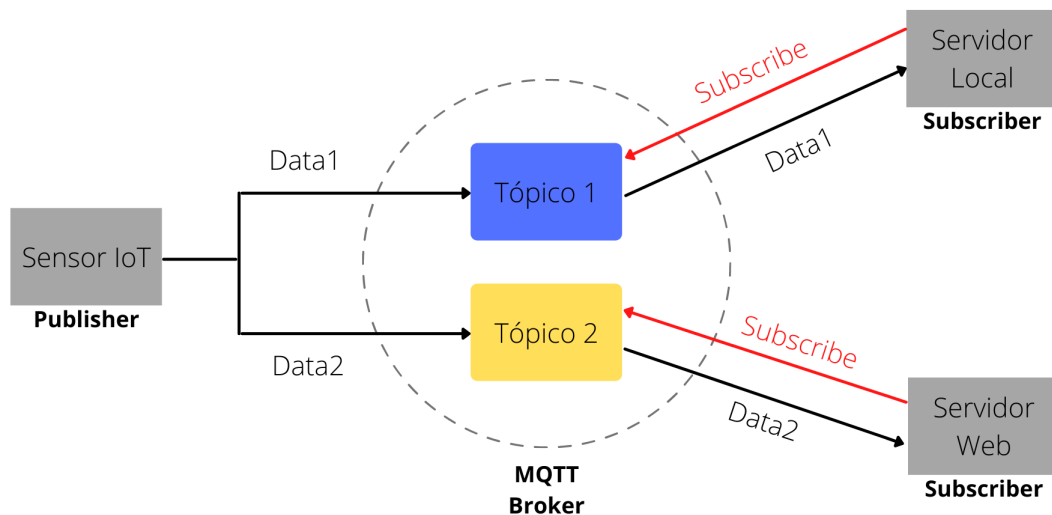


Figura 2 – Estrutura da comunicação do protocolo MQTT - Fonte: Própria do autor

Na Figura 2 está contido um exemplo de como pode ser a estrutura de comunicação do protocolo MQTT. Neste exemplo, um sensor IoT publica mensagens (Data1 e Data2) em diferentes tópicos (Tópico 1 e Tópico 2) que são gerenciados e armazenados pelo MQTT Broker. O Servidor Local é um *subscriber* que assina o Tópico 1 e consequentemente receberá automaticamente a mensagem Data1. Já o servidor Web é outro *subscriber* que assina o Tópico 2, recebendo a mensagem Data2 de forma automática.

Dentro do protocolo MQTT existem parâmetros importantes a serem configurados, como o QoS (*Quality of Service* ou Qualidade de Serviço). Este parâmetro determina com que frequência a mensagem de um tópico deve ser enviado ao *subscriber*.

O QoS de valor 0 é o modo de transferência de dados mais rápida porém menos confiável. Neste modo, a mensagem é enviada apenas uma vez ao cliente e, caso ele esteja desconectado, ele perde a mensagem.

No QoS de valor 1, a mensagem é entregue ao menos uma vez, isto é, o cliente recebe a mensagem, mas não necessariamente consegue armazená-la. Para que isto ocorra, o cliente envia um feedback ao *broker* ao receber uma mensagem, apenas para sinalizar o recebimento.

Por fim, o QoS de valor 2 é considerado o mais seguro pois nessa configuração



deve-se garantir a entrega da mensagem exatamente uma vez. Para isto, é necessário que o cliente envie uma mensagens de feedback que confirmem tanto o recebimento quanto o armazenamento do dado pelo cliente ([IBM Developers, 2021](#)).

## 4 Sistema de Abastecimento de Água

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema capaz de ser aplicado a sistemas de abastecimento de água. Dessa forma, são apresentados neste capítulo a estrutura de um SAA, as variáveis envolvidas no processo de monitoramento e controle de SAAs, um panorama da situação de SAAs no Brasil e cenários para aplicação do sistema.

### 4.1 Sistemas de Abastecimento de Água

Os sistemas de abastecimento de água têm como principal objetivo o fornecimento de água de qualidade, de acordo com a demanda exigida e com pressão adequada a estrutura. O monitoramento e controle são utilizados para garantir a qualidade do funcionamento de um SAA (TSUTIYA, 2006). Os elementos que o compõem estão ilustrados na Figura 3, podendo ser descritos como:

- Captação: unidade composta por um conjunto de estruturas que retiram água de mananciais destinadas ao sistema de abastecimento.
- Estação Elevatória: unidade formada por estruturas aplicadas à transferência de água de um ponto a outro - normalmente para um local mais elevado. As estações localizam-se entre as unidades do sistema de abastecimento.
- Adutora: canal que conduz a água entre as unidades de um SAA.
- Estação de Tratamento: unidade responsável por tratar a água de modo a torná-la potável.
- Reservatório: unidade que armazena água e regulariza as variações da vazão entre a adução e a rede de distribuição.
- Redes de distribuição: estrutura formada por tubulações que destina água potável aos consumidores.

Há uma série de atividades e estudos que são realizados antes de conceber um SAA, como: estudos das características físicas como topografia, relevo e localização; análise das características estruturais e sanitárias como índices de cobertura de água, esgoto e energia elétrica; estudos sobre aspectos sociais, econômicos e ambientais. Além disso, cada uma das partes dos SAAs devem ser projetados para condições de demanda máxima para evitar que o sistema opere com deficit durante horas ou dias. (TSUTIYA, 2006).

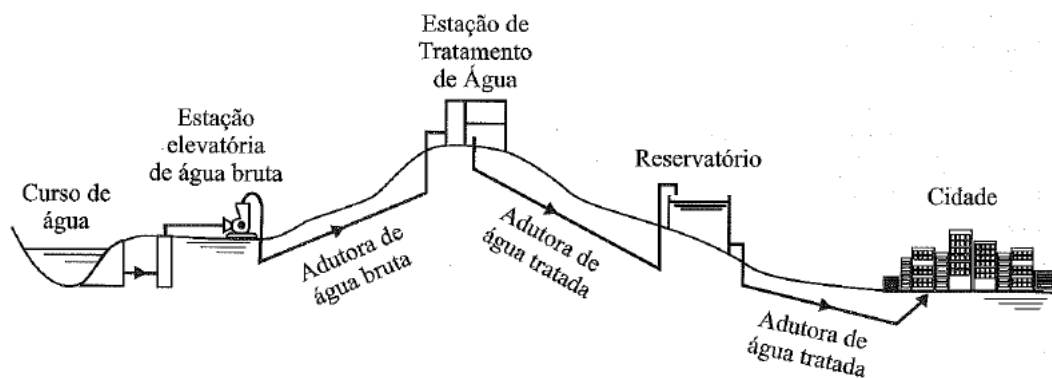


Figura 3 – Sistema de abastecimento de água. Fonte: (TSUTIYA, 2006)

Para o cenário de aplicação deste trabalho, destacam-se as Estações Elevatórias de Água (EEA). Elas são formadas por equipamentos eletromecânicos como bombas e motores, tubulações para o transporte de água e estruturas de construção civil como poços de sucção e casas de bombas (TSUTIYA, 2006). Na Figura 4, são ilustrados os equipamentos que compõe uma estação elevatória.

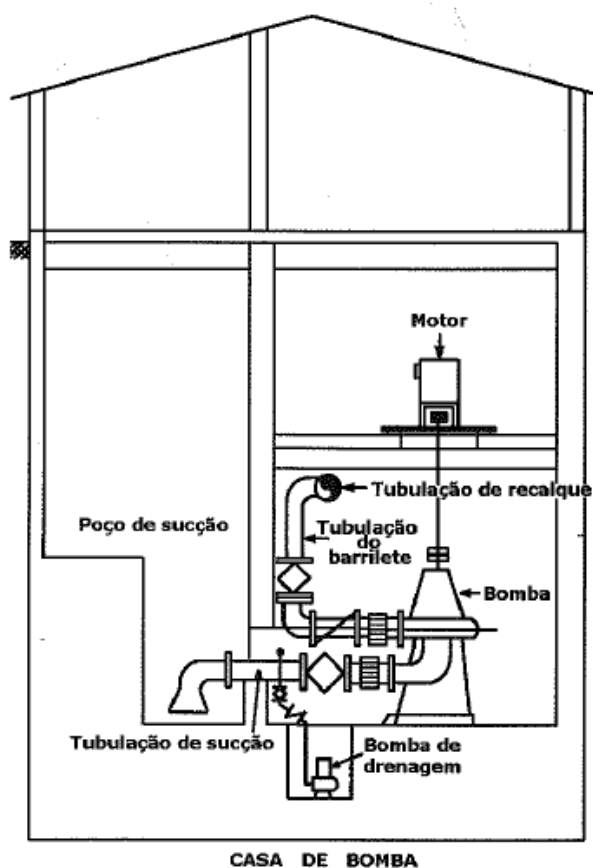


Figura 4 – Componentes de uma estação elevatória de água. Fonte: (TSUTIYA, 2006)

As estações elevatórias estão localizadas ao longo de toda a estrutura de um SAA. São utilizadas para mover a água geralmente de um ponto menor para maior elevação, seja na etapa de captação, adução, tratamento ou distribuição. As EEAs são aplicadas

principalmente quando a elevação da fonte não é suficiente para que o escoamento da água seja por gravidade, ou quando a estrutura de transporte por gravidade necessitar de escavações excessivas, profundas e custosas (SHAMMAS; WANG, 2013). Na Figura 3, tem-se um exemplo de aplicação de uma estação elevatória. Observa-se que a fonte de água está em um nível de elevação menor que a estação de tratamento. Assim, uma EEA é utilizada para transferir a água da fonte à estação de tratamento.

Nas EEAs, os sistemas de controle são aplicados ao bombeamento de água. O controle das bombas pode ser manual, em casos de emergência ou manutenção, e automático, para operação normal. O controle automático geralmente baseia-se no nível de água presente no poço de sucção, pois é a forma mais simples e comum de determinar uma relação entre a vazão afluyente e de recalque (TSUTIYA, 2006).

O nível do poço é detectado por sensores de níveis que são ajustados para comandar o acionamento e desligamento de bombas. Os sensores mais comuns encontrados em EEAs são do tipo bóia, pneumático, ultrassônico e sensores de nível com saída de 4 a 20 mA (TSUTIYA, 2006).

## Variáveis hidráulicas: Pressão e Nível

Segundo Balbinot e Brusamarello (2019), nível é definido como a altura de preenchimento entre o fundo de um recipiente até a superfície ou ponto de referência. A medição de nível pode ser feita através de dois métodos: medição direta e medição indireta.

No método direto, a medição da altura do nível é feita diretamente através de indicadores visuais, como uma régua, inseridos em recipientes translúcidos, através de boias, flutuadores ou através de indicadores magnéticos. No caso de medidores com boia ou flutuador, esses componentes tem massa específica inferior ao do líquido e são atrelados a um dispositivos de visualização. À medida que o fluido no recipiente varia, a posição da boia ou flutuador também muda. Os medidores com indicadores magnéticos funcionam de forma similar aos com boia, contudo a conexão entre a boia e o dispositivo de visualização é totalmente magnética (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019).

Nos métodos indiretos, a medição de nível é feita por meio de outras grandezas como força, peso, pressão e capacitância (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019). Na medição indireta, é possível relacionar o nível da coluna de água de tanques, poços ou reservatórios, com a pressão exercida na base desses elementos.

Para obter a relação entre nível e pressão, pode-se considerar um fluido de formato retangular em equilíbrio e incompressível, com largura  $\Delta x$ , altura  $\Delta y$  e profundidade unitária  $\Delta z$ , como ilustrado na Figura 5.

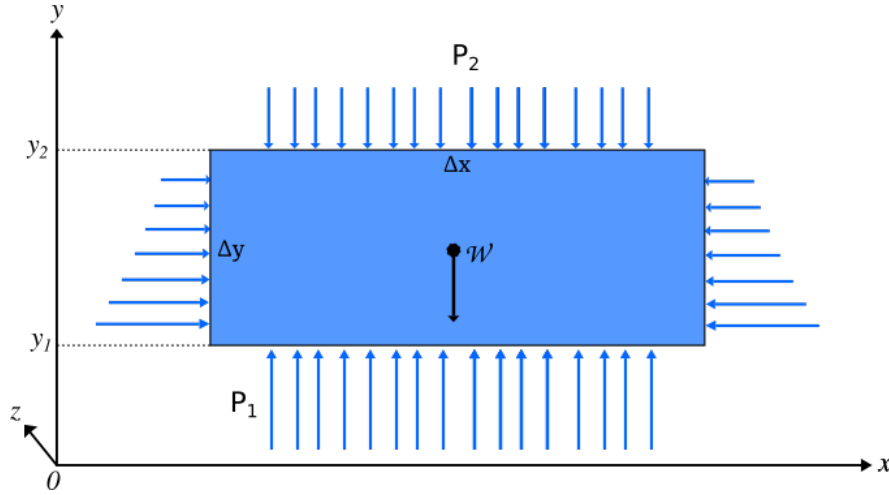


Figura 5 – Diagrama de forças em um elemento fluido em equilíbrio. Fonte: Própria do autor

Sabendo que pressão ( $P$ ) é uma força ( $F$ ) aplicada sobre uma determinada área ( $A$ ), a força resultante no eixo vertical  $y$  resulta em:

$$\sum F_y = ma_y = 0$$

$$P_1 \Delta x \Delta z - P_2 \Delta x \Delta z - \rho g \Delta x \Delta y \Delta z = 0, \quad (4.1)$$

em que  $P_1$  é a pressão aplicada na base do fluido de área  $\Delta x \Delta z$  e  $P_2$  é a pressão aplicada no topo do fluido. Além disso,  $W$  é o peso do fluido que possui densidade  $\rho$  constante, gravidade  $g$  e volume igual a  $\Delta x \Delta y \Delta z$ .

Reorganizando a Equação 4.1, obtém-se:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = -\rho g \Delta y$$

$$P_1 = P_2 + \rho g \Delta y \quad (4.2)$$

Dessa forma, a variação de pressão entre dois pontos é proporcional à distância  $\Delta y$  entre eles. O sinal negativo indica que a pressão aumenta de acordo com a profundidade.

Considerando o fluido imerso em um tanque aberto, com nível de profundidade  $h$  sobre a influência da pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ), logo  $P_2 = P_{atm}$ . Assim, tem-se:

$$P = P_{atm} + \rho g h$$

$$P_{man} = \rho g h, \quad (4.3)$$

em que  $P_{man}$  é a pressão manométrica, ou seja, é a diferença entre a pressão real em determinada posição com relação a pressão atmosférica. Assim, com a Equação 4.3 é possível determinar o nível de um fluido hidrostático em um tanque, poço ou reservatório através da pressão.

## 4.2 Contextualização e Cenários para Aplicações

Em sistemas industriais de grande porte como sistemas de abastecimento de água, existe a necessidade de sistemas com capacidade de supervisionar e controlar variáveis como vazão, pressão e temperatura (FLORES *et al.*, 2021). Entretanto, o seu dimensionamento dificulta a operação e processo de manutenção desses sistemas.

Na Figura 6 é ilustrada a distribuição de alguns dos elementos de um SAA ao longo do estado da Paraíba, sendo os pontos de captação de água ilustrados na Figura 6a e adutoras na Figura 6b. Diante desses cenários, observa-se as proporções da estrutura que um SAAs pode ter.

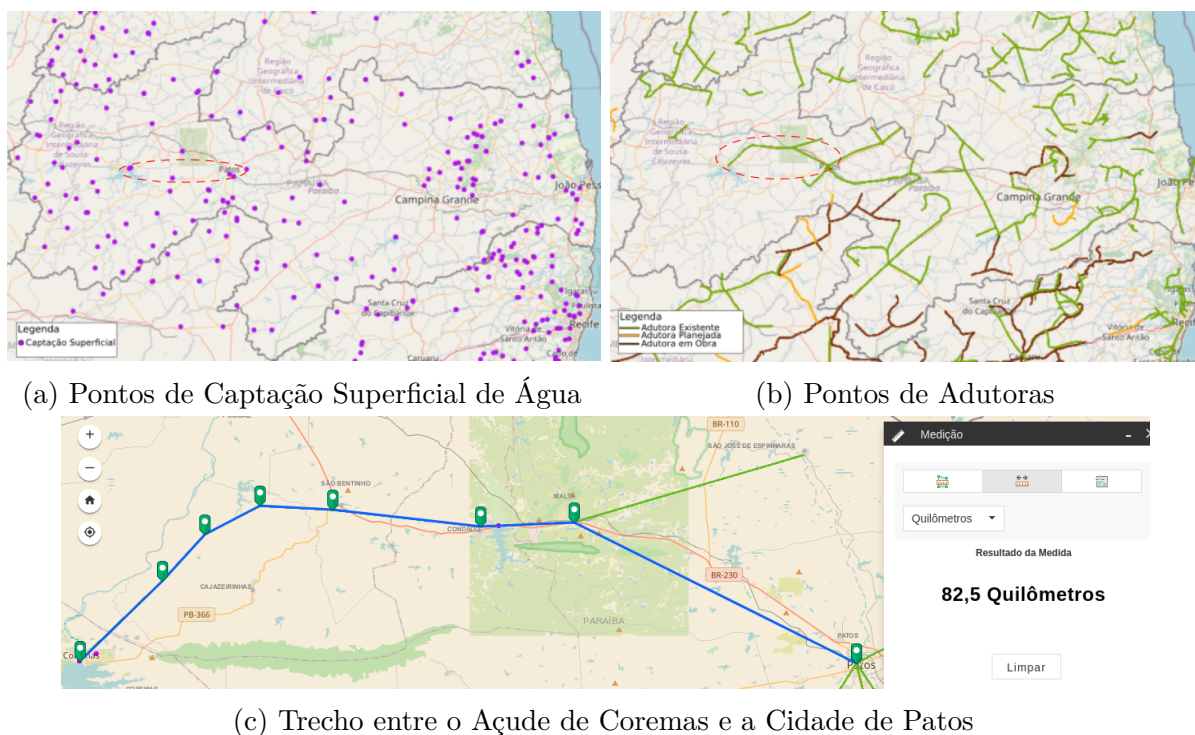
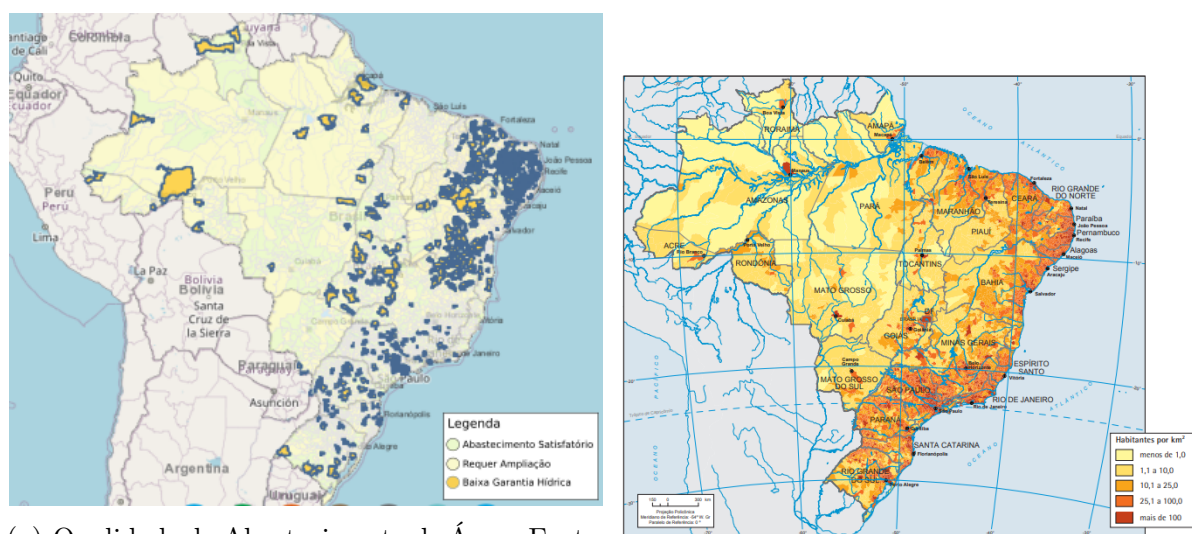


Figura 6 – Sistema de Abastecimento na Paraíba. Fonte: SNIRH

Na Figura 6c, é ilustrado o trecho da adutora que transporta água do açude de Coremas até a cidade de Patos. Essa adutora tem aproximadamente 82,5 km de extensão. Nesse cenário, implementar um sistema cabeado para monitoramento da pressão e vazão ao longo da adutora pode ser oneroso devido à sua extensão.

A distribuição de demanda de água é outro problema enfrentado pelos SAAs. O Brasil é dotado de uma vasta extensão territorial e apresenta condições das mais diversas,

principalmente no que se refere à distribuição populacional. Na Figura 7, é possível ver a relação entre a situação do sistema de abastecimento no país e sua densidade demográfica.



(a) Qualidade do Abastecimento de Água. Fonte: SNIRH

(b) Distribuição Poluacional. Fonte: IBGE

Figura 7 – Situação do Abastecimento de Água e Distribuição da população no Brasil.

Na Figura 7a, observa-se a situação do abastecimento de água ao longo do território brasileiro. As regiões destacadas em verde indicam que a qualidade do abastecimento é satisfatória. Em amarelo, destaca-se regiões em que o fornecimento não está comprometido, mas que apresentam a necessidade de ampliação do sistema de abastecimento. Em laranja e azul, são áreas com baixa garantia hídrica, ou seja, que precisam de ampliação pois o sistema já não supre as necessidades locais. Segundo dados do SNIRH<sup>1</sup>, apenas 26% da população urbana está em áreas com abastecimento de água satisfatório.

Comparando a Figura 7a com a Figura 7b, percebe-se que as regiões com problemas no abastecimento estão concentradas em pontos em que há uma maior densidade populacional. Quanto maior o número de pessoas em um local, maior será a demanda de água. Para suprir as demandas, é necessário ampliar o sistema, seja adicionando uma nova estrutura de captação, adução ou estações elevatórias. Essas novas estruturas podem estar localizadas em pontos consideravelmente distantes entre si. Isso implica que quanto maior for a distância entre esses novos pontos, maior será a dimensão estrutural do sistema de abastecimento. Consequentemente, maior será a dificuldade de fornecer um monitoramento e controle adequados e maior a dificuldade de distribuir água de forma otimizada.

Um fator que contribui ainda mais para um baixo fornecimento de água à população são as perdas, agravadas principalmente pelos vazamentos. Como mencionado no Capítulo 1, os vazamentos chegam representar 39% das perdas de água durante a distribuição. Essa porcentagem pode ser minimizada a tempo caso houvesse um monitoramento e controle apropriados.

<sup>1</sup> Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos



Dessa forma, o monitoramento e automação são estratégias importantes para evitar e controlar melhor as perdas de água ([Agência Nacional de Águas \(ANA\), \(2019\)](#)). Tendo em vista o dimensionamento e vazamentos devido à ausência de sistemas apropriados para SAAs, aplicações de monitoramento e controle sem fio se tornam viáveis e mais interessantes por se adequarem melhor aos diferentes cenários de SAAs.

Em [Abdelhafidh et al. \(2018\)](#), foi apresentado um estudo de caso que foi voltado ao monitoramento e controle entre a distribuição de água de uma prestadora de serviços até uma indústria química localizada a 50 km de distância. Nesse cenário, a pressão e vazão das tubulações, assim como o nível de água dos reservatórios dessa prestadora foram monitorados remotamente. O intuito do monitoramento é a detecção de vazamentos ao longo da distribuição e, a partir desses dados, controlar a abertura de válvulas e o bombeamento de água na tubulação, a fim de regular os níveis de pressão e vazão para evitar vazamentos.

É possível também aplicar sistemas sem fio no controle de pressão de bombeamento e vazão de água das EEAs a partir monitoramento de nível de reservatórios e das pressões nas adutoras. Dessa forma, é possível evitar o rompimento da tubulação por excesso de pressão ou a falta de água na rede durante a distribuição de água. É possível também fazer o controle da qualidade de água em estações de tratamento de água. A partir do monitoramento remoto da qualidade da água ao longo da rede de distribuição, aplica-se o controle de compostos químicos usados no tratamento de água.

Apesar de proporcionarem flexibilidade e redução de custos em algumas implementações de monitoramento e controle, nem todo dispositivo sem fio é adequado para SAAs. Analisando-se os elementos de um SAA de forma isolada, para ambientes como uma EEA ou uma Estação de Tratamento de Água (ETA), em que há a necessidade de um monitoramento e/ou controle local, tecnologias sem fio de curto alcance ou até mesmo cabeadas são mais adequadas. Já para estabelecer uma comunicação entre, por exemplo, uma EEA e uma adutora, ETA, reservatório ou ponto de captação, a tecnologia de longo alcance para monitoramento e/ou controle torna-se mais favorável.

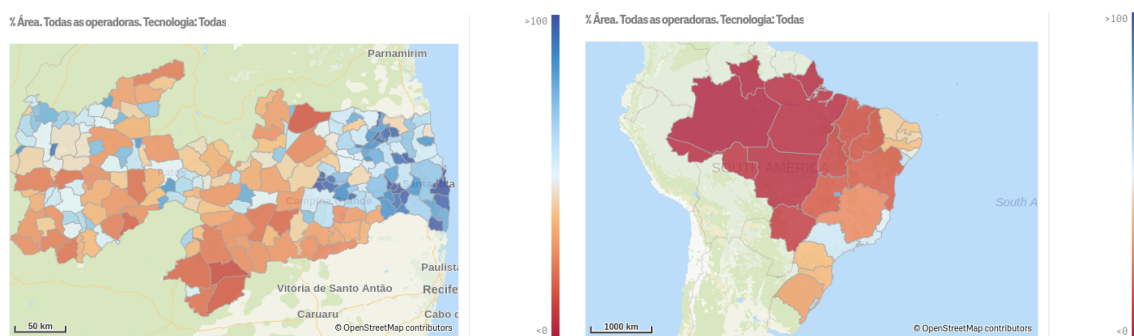
Entretanto, para utilizar tecnologias de longo alcance é necessário fazer algumas considerações. Na Figura 8, observa-se o panorama da situação da rede de dados móveis (2G, 3G e 4G) fornecidas por todas as operadoras que atuam na Paraíba (Figura 8a) e no Brasil (Figura 8b) de acordo com a ANATEL<sup>2</sup>.

A partir da Figura 8, percebe-se que muitas cidades e boa parte dos estados possuem área de cobertura de sinal inferior a 50%. Ou seja, mesmo sendo tecnologias de longo alcance, devido à baixa cobertura em inúmeras regiões, torna-se difícil o uso de 2G, 3G ou 4G para monitoramento e controle. Dessa forma, outras tecnologias de longo alcance,

---

<sup>2</sup> Agência Nacional de Telecomunicação





(a) Cobertura na Paraíba.

(b) Cobertura no Brasil.

Figura 8 – Mapa de cobertura de telefonia móvel. Fonte: ANATEL

como LoRa, passam a ser mais interessantes em determinadas aplicações.

Logo, dentro do contexto de SAAs, o trabalho proposto visa o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados com comunicação híbrida, tendo como destaque a comunicação por módulos LoRa. Com esse sistema, é possível aplicá-lo no monitoramento a longas distâncias de pontos de pressão ao longo da rede de abastecimento para controle de níveis de reservatórios de EEA. O intuito da aplicação é contribuir com a automação de redes de abastecimento de água, proporcionando uma otimização do monitoramento e controle de SAAs, o que poderia ter consequência a melhoria da gestão do abastecimento e dos recursos hídricos.

## 5 Descrição do Sistema

O sistema utilizado na implementação deste trabalho, denominado Sistema de Aquisição de Dados e Interface de Rede (SADIR), tem como finalidade suprir demandas de SAAs. Para atender as demandas de SAAs, o SADIR possui uma série de funcionalidades. Dentre elas, destaca-se a capacidade de monitorar pontos de pressão e vazão nas linhas de distribuição de água, assim como medir os níveis de reservatórios. As medições da pressão e vazão em diferentes localizações são úteis para determinar o consumo de água ao longo da rede de distribuição e identificar possíveis perdas nas linhas. A medição do nível pode ser usada no controle da pressão de bombeamento de água nas tubulações durante a distribuição. Com essas funcionalidades é possível minimizar o desperdício de água por vazamento.

A fim de proporcionar essas funcionalidades, neste trabalho foi desenvolvido um dispositivo IoT de baixo custo e versátil, capaz de transmitir dados a longas distâncias através de módulos LoRa, principalmente em pontos em que não há cobertura de sinal GSM ou GPRS. O sistema permite a comunicação entre sensores e atuadores comerciais por diferentes redes industriais. Além do mais, é possível fornecer as informações coletadas em um servidor na nuvem através do protocolo MQTT.

### Hardware

O projeto do hardware foi centrado em duas características principais: a primeira é desenvolver uma estrutura híbrida de comunicação, isto é, permitir uma comunicação entre dispositivos de redes cabeadas e sem fio. A segunda é garantir a coleta e envio de dados por transmissão sem fio de longo alcance. Para atender a segunda característica, foram utilizados os módulos baseados na tecnologia LoRa.

A adoção de um sistema com comunicação híbrida tem o intuito de reduzir o custo de implementação e proporcionar versatilidade à solução. Os sistemas cabeados têm custo elevado em aplicações de monitoramento ou controle a longas distâncias. Esse custo está associado tanto ao próprio uso de cabos, como também na utilização de repetidores para manter a confiabilidade da transmissão de dados. Para minimizar os custos com cabeamento, utilizaram-se módulos sem fio para proporcionar comunicação a longas distância.

Apesar da vantagem em comunicação de longas distâncias, o uso de dispositivos sem fio pode elevar o custo em aplicações de monitoramento ou controle em curtas distâncias. Para minimizar o custo com uso de módulos LoRa nessa situação e oferecer maior confiabilidade na transmissão de dados, foram adotados módulos de comunicação cabeados.

Percebe-se que um dispositivo com comunicação híbrida une as vantagens de sistemas cabeados e sem fio. Assim, pode-se aplicar a solução em diferentes cenários a fim de propiciar uma redução de custos nos projetos de automação.

O uso da comunicação híbrida torna a solução versátil, pois é possível adequá-la a diferentes aplicações, de tal forma que é possível fazer aquisições ou controle de elementos tanto de redes cabeada quanto de redes sem fio. Além disso, ela funciona como uma interface de troca de dados entre esses tipos de rede. Um modelo da estrutura de rede com o sistema proposto é apresentado na Figura 9.

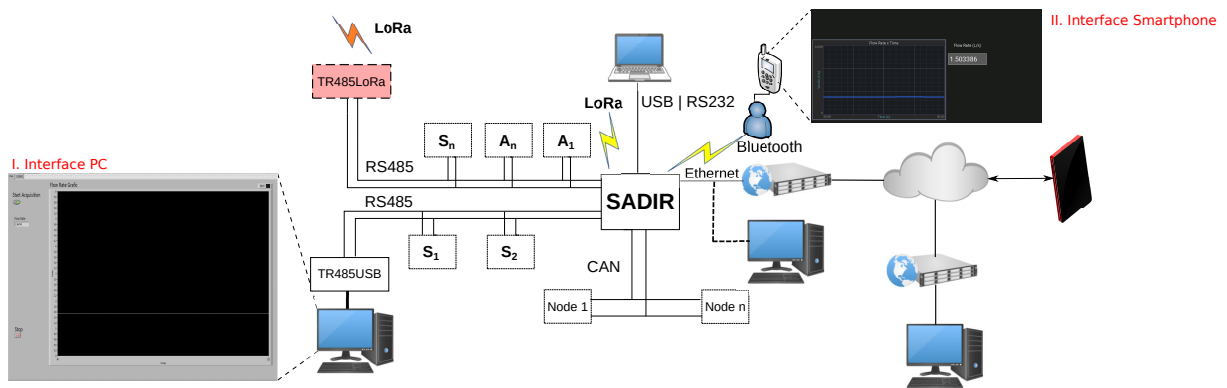


Figura 9 – Diagrama de Rede com o sistema proposto. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021)

Para o desenvolvimento do sistema, foram escolhidos componentes de baixo custo e com alta disponibilidade no mercado visando a redução do custo de desenvolvimento. Os módulos de comunicação escolhidos foram: RS232, RS485 e CAN como módulos de comunicação cabeados; Bluetooth e LoRa como módulos de comunicação sem fio. A arquitetura do sistema encontra-se na Figura 10.

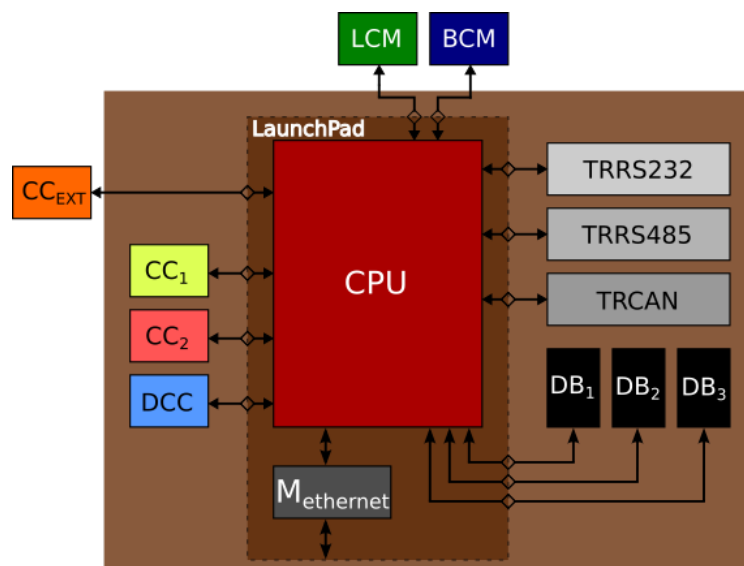


Figura 10 – Arquitetura do hardware. Fonte: Própria do autor

Na Figura 10, os módulos de comunicação são representados como: TRRS232 para o transceptor RS232; TRRS485 para transceptor RS485; TRCAN para o transceptor CAN; BCM para o módulo de comunicação *Bluetooth*; LCM para o módulo de comunicação LoRa.

Tradicionalmente, utilizam-se estruturas cabeadas em soluções industriais. O padrão RS232 foi escolhido para manter uma compatibilidade com soluções que usam esse tipo de interface, como observado na Figura 9. Esse padrão pode ser encontrado em alguns modelos de CLPs e em dispositivos que atuam como servidores locais, como computadores. Para esse padrão, escolheu-se o transceptor MAX232.

A comunicação por RS485 foi escolhida por possibilitar a conexão de sensores e atuadores locais ( $S_1-S_n$  e  $A_1-A_n$ ), conforme ilustrado na Figura 9. Além disso, diversos protocolos industriais, como PROFIBUS E MODBUS, utilizam esse padrão na camada física. Através desse padrão, é possível comunicar-se com sensores industriais para monitorar o nível de reservatórios ou inversores de frequência e *soft starters* para controlar a pressão de bombeamento de EEAs. O transceptor escolhido para este padrão foi o MAX485.

Além de também ser amplamente aplicado na indústria, o módulo CAN foi escolhido por permitir a conexão de redes de sensores e atuadores locais (*Node 1* à *Node N*), como observado na Figura 9. O transceptor utilizado foi o SN65HVD232 da *Texas Instruments*.

Dentre os módulos de comunicação sem fio, o *Bluetooth* foi adotado com o intuito de facilitar inspeções e manutenções nos locais em que o dispositivo SADIR estiver instalado, permitindo que o sistema se conecte a *smartphones* e *tablets*. O módulo BCM utilizado foi HC05.

Os módulos LoRa foram escolhidos por serem dispositivos de baixo custo e baixo consumo energético. Essas características estão em conformidade com o conceito de otimização de SAAs. Além disso, é possível estabelecer uma comunicação sem fio de longo alcance em comparação com tecnologias como Zigbee ou *Bluetooth*. Isso permite uma maior cobertura de monitoramento, principalmente em zonas sem sinais de telefonia móvel ou *Internet*. O uso desses módulos reduz o custo da estrutura de rede sem fio, visto que necessita-se de menos nós intermediários na implementação.

O módulo LoRa utilizado em boa parte das implementações do projeto foi o módulo E32-433T20D (Figura 11) da fabricante Ebyte. A frequência de operação desse módulo é de 433 MHz e, segundo o fabricante, possui alcance máximo de transmissão de 3,3 km. A série E32 possui módulos com diferentes potências de sinal, frequências de operação e alcances. Entretanto, a pinagem dos módulos e as características elétricas são as mesmas. No SADIR há um conector compatível com os módulos dessa série.

Na Figura 9, há dois elementos que foram desenvolvidos. O primeiro deles é o



Figura 11 – Módulo LoRa. Fonte: Ebyte

módulo TRRS485USB. Ele permite o monitoramento de sensores e atuadores em um PC dentro uma sala de controle. Esse módulo é composto por um transceptor RS485-UART (MAX485) e um transceptor UART-USB (FT232R). O segundo módulo é o TRRS485LoRa. O SADIR possui um conector para conexão direta com módulos LoRa. Entretanto, dependendo da implementação, o SADIR pode ser instalado em um local em que há obstáculos entre a linha de visada dos módulos LoRa. Como alternativa, esse segundo módulo foi desenvolvido para minimizar os obstáculos entre os módulos LoRa de transmissão e recepção. Sua estrutura é composta por um transceptor MAX485 e conector para módulos LoRa. Dessa forma, pode-se instalá-lo em locais mais altos, melhorando a linha de visada entre transmissor e receptor.

Além dos módulos de comunicação apresentados, a arquitetura do sistema proposto é composta pela CPU *TM4C1294NCPDT* da *Texas Instruments*, que está inserida em uma placa de desenvolvimento *LaunchPad TIVA1294* de mesmo fabricante. A CPU tem um processador de 120 MHz, 8 UARTs<sup>1</sup>, 2 controladores CAN, 2 módulos ADC<sup>2</sup> e módulo Ethernet ( $M_{ethernet}$ ). Esse módulo permite interligar o sistema à rede de *internet* local e, consequentemente, a um servidor na nuvem.

Para permitir a conexão dos diferentes sensores existentes no mercado, foram projetados circuitos de condicionamento de sinais analógicos ( $CC_1$ ,  $CC_2$ ,  $CC_{ext}$ ) e digitais ( $DCC$ ).

O módulo  $CC_1$  é referente ao condicionamento de sensores com saída em tensão. Ele é capaz de ser ajustado para diferentes valores de tensão, compensar valores de *offset* de sensores e filtrar ruído. Há ainda um circuito de proteção do *ADC* da CPU para evitar sinais de sobretensão.

O módulo  $CC_2$  foi desenvolvido para sensores cuja saída é dada em corrente e que seguem o padrão de 4 a 20 mA. Ele foi projetado para converter estes sinais de corrente para os valores de 0 a 3,3 V. Além disso, o circuito também compensa valores de *offset*,

<sup>1</sup> Universal Asynchronous Receiver Transmitter

<sup>2</sup> Analog-Digital Converter

filtra ruídos e protege a CPU dos sinais de sobretensão.

O circuito *DCC* foi projetado para sensores com saída digital. Diversos sensores industriais geram sinais de onda quadrada que variam a frequência ou o *duty cycle* proporcionalmente à variável medida. O DCC é constituído por um optoacoplador que isola a CPU do sensor e adapta o sinal proveniente do sensor para os valores de 0 a 3,3 V. Além disso, há também uma conexão para acrescentar outros circuitos de condicionamento externos ( $CC_{EXT}$ ).

Neste trabalho, o sistema foi utilizado também no controle de bombas para SAAs. Para isso, foram acrescentados *drivers* para controlar bombas de uma plataforma de tanques. Ao total são três *drivers* ( $DB_1$ ,  $DB_2$ ,  $DB_3$  da Figura 10). Cada circuito é composto por um filtro ativo. O filtro converte o sinais PWM da CPU em um sinal analógico. Após a conversão, o sinal recebe um ganho para adequar o sinal analógico aos níveis de tensão das bombas. O circuito do *driver* está ilustrado na Figura 12.

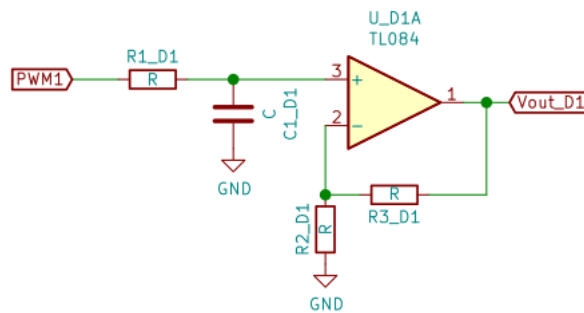


Figura 12 – Módulo LoRa. Fonte: Própria do Autor

Uma possível aplicação do SADIR encontra-se na Figura 13. Nessa figura, observa-se que há uma estrutura responsável por monitorar e controlar estações elevatórias de água, denominada de Central de Monitoramento e Controle. Essa central está inserida em uma região com cobertura de sinal de *internet*. Logo, a central conecta-se a um servidor na nuvem que permite o monitoramento, controle e armazenamento de dados de EEAs. A **EEA 1** está dentro de uma região com sinal de *internet*, possibilitando a troca de dados com a central remotamente pelo servidor na nuvem. Em contrapartida, a **EEA 2** está fora do alcance de cobertura de sinal, o que impede a comunicação entre esta EEA com o servidor.

Para compensar a ausência de cobertura de sinal, pode-se aplicar o SADIR para um monitoramento remoto, como ilustrado na Figura 13. Tendo em vista que o SADIR utiliza módulos LoRa, é possível enviar os dados da **EEA 2** via LoRa até outro módulo SADIR. Este, por sua vez, está dentro da região com sinal de *Internet*. Assim, ao final do recebimento, os dados são encaminhados ao servidor na nuvem e, consequentemente, à central de monitoramento.

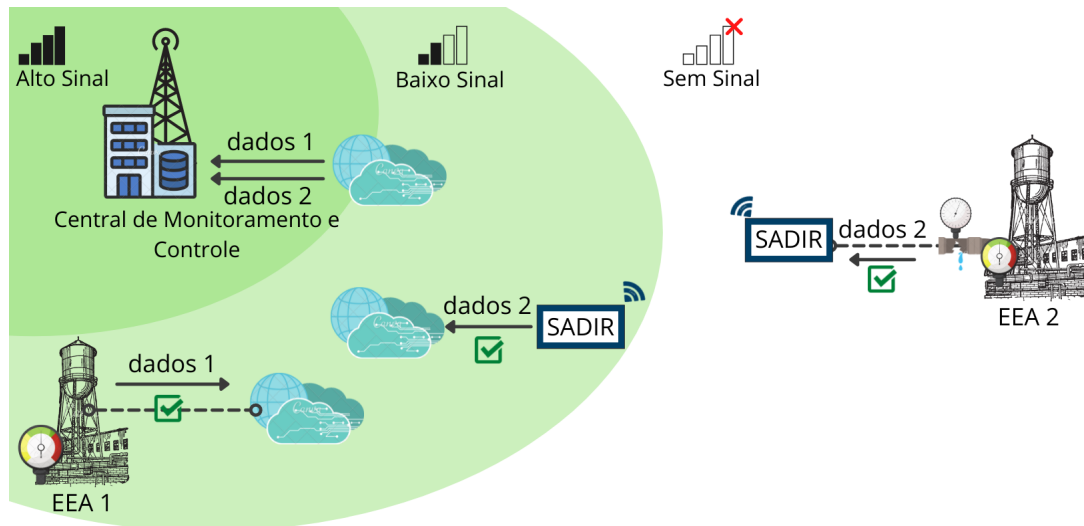


Figura 13 – Cenário com uso do SADIR. Fonte: Própria do autor

A partir do *hardware* desenvolvido, observa-se que o SADIR é flexível, visto que ele pode ser aplicado a diferentes redes industriais que já estejam em operação (MEDEIROS et al., 2021). Também é possível instalá-lo em estruturas de redes cabeadas e sem fio. Outra característica a ser destacada é a robustez. Os padrões RS485 e CAN são amplamente consolidados na indústria devido aos seus graus de confiabilidade e robustez. Ambos os padrões adotam comunicação por tensão diferencial com o intuito de minimizar o ruído durante a transmissão de dados.

## Software

O SADIR foi inicialmente projetado para o monitoramento e aquisição de dados de sensores de SAAs, como apresentado em (MEDEIROS et al., 2019). Nesses trabalhos, foram implementadas interfaces capazes de fazer o devido monitoramento dos dados adquiridos por esse sistema. Foram desenvolvidas para dois tipos de dispositivo. A primeira delas foi para computador, usando o software LABVIEW, para proporcionar acesso aos dados a uma sala de monitoramento. Caso a sala esteja localizada próximo ao sensor, o monitoramento pode ser feito através da rede RS232, RS485 ou USB que vem acoplada no *LaunchPad*. Se o sensor estiver longe da sala, o dado pode ser enviado via LoRa até outro SADIR que esteja conectado a um PC.

A segunda interface foi projetada usando o aplicativo Bluetooth Electronics para aparelhos que tenham a tecnologia *Bluetooth*, como *smartphones* e *tablets*. Essa interface serve para auxiliar a operação dos sistemas de abastecimento de água, permitindo realizar a inspeção local ou manutenção do sistema.

A grandeza monitorada pelo sistema foi a vazão da água em uma tubulação. O sistema convertia o valor de pressão em vazão e interfaces exibiam os dados da vazão ao longo do tempo. Essas interfaces estão ilustradas na Figura 9, destacado como *I* e *II*.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma nova interface para monitoramento de sensores conectados ao SADIR, assim como para o controle da plataforma de tanques. Como o *hardware* deste trabalho possui um módulo Ethernet, então o SADIR coleta os dados de sensores e os envia ao servidor via *Internet*. A interface implementada pode ser vista na Figura 14.

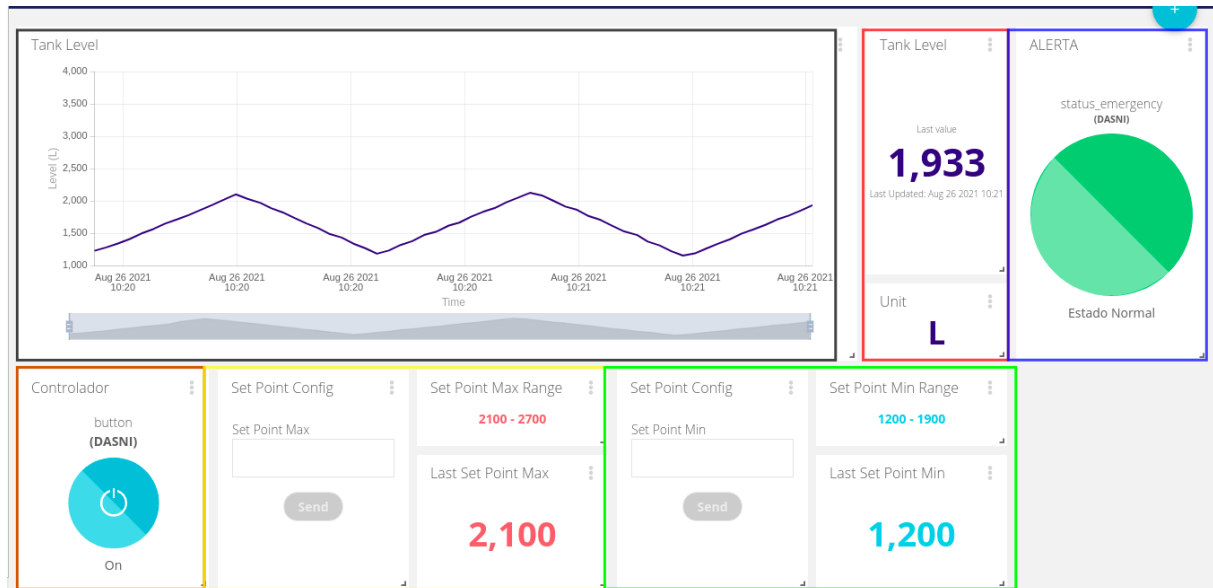


Figura 14 – Interface Web Implementada. Fonte: Própria do Autor.

O servidor web escolhido foi o Ubidots, pois é possível utilizar o protocolo MQTT para estabelecer uma comunicação entre o SADIR e o servidor. Esse servidor permite que a interface *web* seja acessada tanto por um navegador de *internet* quanto por aplicativo para *smartphones* e *tablets* da própria Ubidots.

Um dos objetivos do trabalho é a aplicação do SADIR no controle de plantas em SAAs, mais especificamente no processo de bombeamento através do monitoramento de nível de poços ou reservatórios. Como exposto no Capítulo 4, o controle de bombas acontece tanto de forma manual quanto automática. Sendo assim, a interface da Figura 14 foi implementada considerando-se as características e variáveis do processo de controle de bombas em SAAs.

Na Figura 14, observa-se que há um gráfico, destacado pelo quadro preto, responsável por exibir o comportamento do controle de nível de água em função do tempo. Apesar da interface do projeto exibir apenas os dados da plataforma de tanques, é possível acrescentar gráficos para monitoramento de poços ou reservatórios. Os indicadores destacados pelo quadro vermelho exibem o último valor adquirido pelo SADIR, bem como a unidade da variável.

Nessa mesma figura, nota-se que há um botão liga-desliga, destacado pelo quadro laranja. Ao ligar o botão, aciona-se remotamente o controle automático. Ao desligá-lo, o



controle é desativado, permitindo a realização de manutenções no sistema.

Nos quadros amarelo e verde destacam-se campos para configuração e ajustes de parâmetros do controlador, além dos valores configurados. Por fim, no quadro destacado em azul está contido um indicador que emite um alerta de acordo com o *status* de funcionamento do sistema.

Para contemplar as funcionalidades propostas neste trabalho, um *firmware* foi desenvolvido, que pode ser representado pelo diagrama de estados ilustrado na Figura 15.

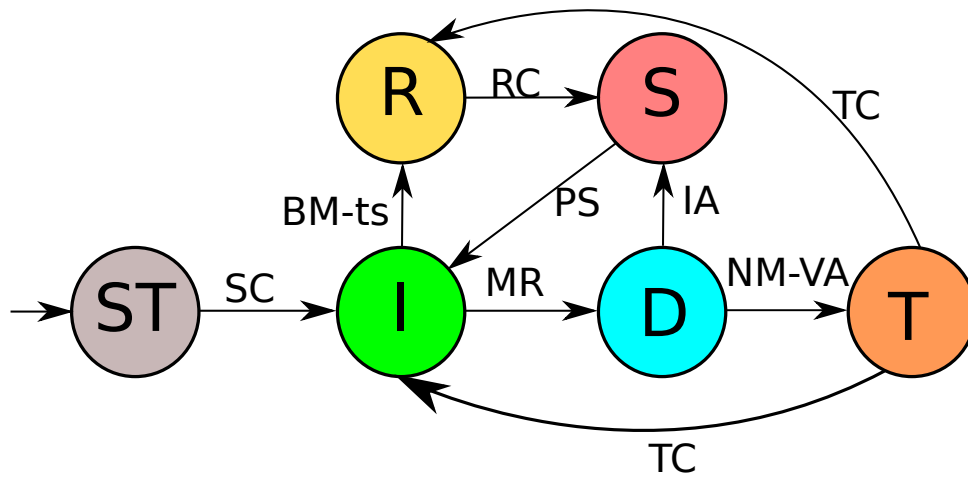


Figura 15 – Diagrama de Estados do Firmware. Fonte: (MEDEIROS et al., 2021).

Ao ligar o sistema, inicia-se a etapa de configuração (ST), em que serão reconhecidos e configurados os dispositivos ou redes conectadas ao SADIR. Quando o processo de auto-configuração termina (SC), o sistema entra em um estado ocioso (I) à espera de um comando ou mensagem.

O sistema pode ser configurado em dois modos. O primeiro é o modo de publicação automática ou *burst mode*. Ao ativar este modo, o sistema inicia a etapa de leitura (R). Nessa etapa uma amostra de dados é adquirida após  $ts$  segundos. Este tempo é pré-configurado na etapa ST. Quando a leitura está finalizada (RC), o sistema entra na etapa de envio (S) de dados para os servidores locais e remotos. Ao final do processo de envio (PS), o sistema retorna ao modo I e inicia novamente o ciclo de leitura e envio de dados.

A segunda configuração está relacionada ao recebimento de comandos. Neste modo, o SADIR recebe uma mensagem (MR) de um dispositivo conectado diretamente a ele ou por meio de alguma rede. Ao receber uma mensagem, inicia-se a etapa de decodificação da mensagem, em que será determinado se a mensagem deveria ser recebida ou não pelo sistema. Por exemplo, suponha que haja uma rede compostos por  $SADIR_A$ ,  $SADIR_B$  e  $SADIR_C$ . O  $SADIR_A$  precisa enviar um dado até o  $SADIR_C$ ; contudo, devido à distância, o dado passa antes no  $SADIR_B$  e só então a mensagem chega no destino final. Quando a etapa de decodificação iniciar no  $SADIR_B$ , ele analisará se ele é o destino final da mensagem. Na situação apresentada, este módulo não é o destino final, tendo assim

um endereço inválido (IA). Assim, o  $SADIR_B$  entra na etapa de envio (S) e retransmite a mensagem para o próximo módulo. Ao fim do envio, ele retorna ao modo I. Quando o módulo C receber a mensagem e entrar na etapa de codificação, ele identificará que é o destino final, tendo assim um endereço válido (VA). Dessa forma, ele interpreta a mensagem e entra no modo de execução da tarefa (T). Dentre as tarefas, pode-se exemplificar a leitura de dados (R), acionamento de bombas ou troca de mensagens entre redes. Ao finalizar a tarefa atribuída na mensagem, o módulo retorna ao modo I.

Para controlar o fluxo de informação entre os diferentes módulos de comunicação utilizado pelo SADIR, foi desenvolvido um protocolo de comunicação baseado em caracteres ASCII, como ilustrado na Figura 16.

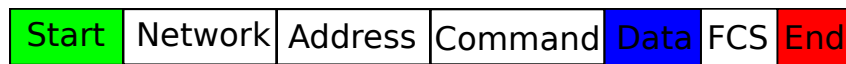


Figura 16 – Protocolo de Comunicação do SADIR. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021).

O campo *Start* indica tanto o início do protocolo como também de qual módulo de comunicação a mensagem é recebida. Esse campo é representado por um caracter, em que **B** refere-se à comunicação *Bluetooth*, **C** refere-se à CAN, **E** representa a Ethernet, **L** é referente à LoRa, **P** à RS485 e **R** à RS232.

O campo *Network* indica para qual rede de comunicação a mensagem deve ser enviada. Esse campo é representado igualmente por um caracter seguindo a mesma lógica do campo *Start*.

O campo *Address* indica o caminho percorrido pela mensagem. Este campo foi dividido em dois bytes, sendo o primeiro referente ao endereço do nó de partida, ou seja, de qual nó veio a mensagem. O segundo é referente ao endereço do nó de destino, ou seja, para qual nó a mensagem deve ser encaminhada. Apesar da utilização de um byte para endereçamento limitar a capacidade de nós de cada rede em 256, esse valor foi suficiente para as aplicações iniciais dos projetos já desenvolvidos .

O campo *Command* indica qual operação o nó deve executar. O campo *Data* tem como principal finalidade armazenar a informação a ser transmitida. Além disso, este campo pode indicar especificamente como uma operação deve ser executada. O campo *Data* é dividido em: *PN*, que indica o tamanho da informação a ser enviada; *Inf*, que contém o dado. Este campo é formado por 4 *Bytes*.

O campo *FCS* é o acrônimo de *Frame Check Sequence* e é uma sequência de bits usada para identificação de erro da mensagem enviada. A técnica CRC<sup>3</sup> foi adotada para gerar essa sequência. Por fim, o campo *END* contém o caracter **V** de finalização do protocolo.

<sup>3</sup> Cyclic Redundancy Check

## 6 Resultados

Nesta seção, são apresentados as implementações e resultados dos testes obtidos como parte da pesquisa desta Dissertação de Mestrado. Nos testes, foram abordados o comportamento da transmissão de dados usando os módulos LoRa em determinados cenários; foi avaliado o desempenho da aquisição de dados com o SADIR perante à sensores industriais consolidados; analisou-se a influência da transmissão via LoRa em sensores, assim como o comportamento da transmissão mediante ruídos externos; foi desenvolvido o controle remoto aplicado ao bombeamento de água na plataforma de tanques; realizou-se uma comparação do custo de desenvolvimento em relação a soluções tradicionais no mercado; avaliou-se o consumo energético do SADIR.

### 6.1 Análise da Comunicação sem fio

Uma das finalidades do sistema proposto neste trabalho é a transmissão de dados a longas distâncias em SAAs, principalmente em áreas sem sinal de telefonia ou dados móveis. Para a realização dessa transmissão sem fio, o sistema foi projetado para ser compatível com módulos LoRa da série E32 da Ebyte. A fim de verificar se o uso desses módulos poderiam suprir a lacuna na cobertura de telefonia ou dados móveis, realizou-se uma análise a respeito da qualidade e robustez do sinal de módulos LoRa.

O módulo utilizado nos testes foi o E32-433T20D, com frequência de operação de 433 MHz, que foi configurado com taxa de comunicação com a CPU de 9600 bits por segundo (bps), taxa de transferência sem fio de 300 bps e potência de transmissão de 20 dBm. Segundo manual, essa configuração fornece o maior alcance de transmissão suportada pelo módulo. A antena para transmissão é omnidirecional com ganho de 2.5 dBi.

Como os cenários de um SAA são diversos, foi necessário escolher tipos de ambiente em que o sistema poderia ser instalado. Um dos ambientes escolhidos para a avaliação é apresentado na Figura 17. Esse cenário está localizado no campus I da Universidade Federal da Paraíba. O percurso utilizado na avaliação inicia-se no ponto *begin* até o ponto *end*, tendo uma extensão total de 1,1 km. Observa-se que o ambiente é circundado por construções, edifícios, linhas de transmissão de alta tensão, veículos e uma área de vegetação ambiental. Os sistemas de abastecimento podem ter partes inseridos em ambientes mais urbanos, por isso este cenário é relevante para avaliar o comportamento da comunicação LoRa.

Para avaliar a qualidade, robustez e cobertura de sinal dos módulos LoRa, foram necessários dois módulos conectados em SADIRs diferentes. Um dos sistemas opera

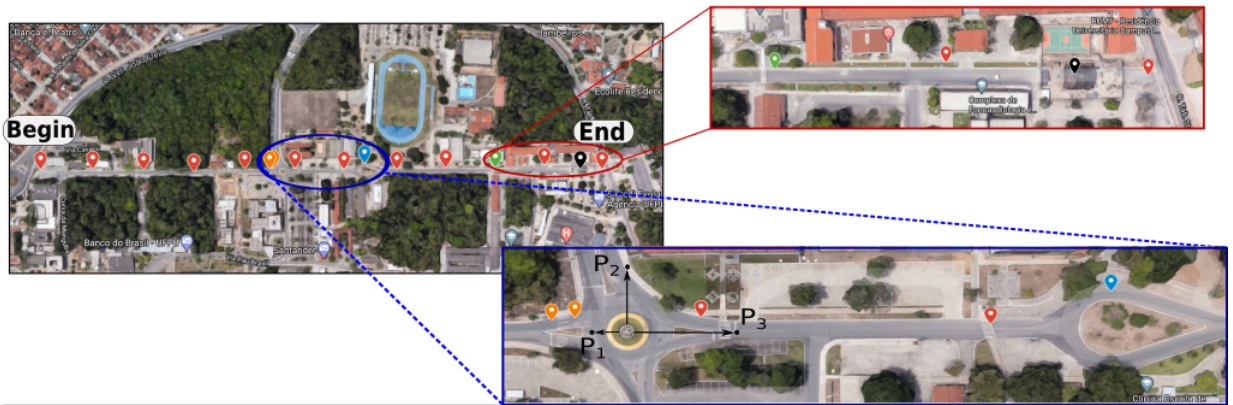


Figura 17 – Cenário utilizado na análise de transmissão. Fonte: (MEDEIROS et al., 2021)

como transmissor e o outro como receptor. Com esses sistemas, testes avaliativos foram executados no cenário da Figura 17.

O primeiro teste tinha como objetivo identificar o alcance máximo e área de cobertura ótima que poderia ser proporcionada pelos módulos LoRa. Assim, pode-se determinar se os módulos ofereceriam um alcance satisfatório capaz de reduzir custos de implementação de redes sem fio em comparação a outras tecnologias. O transmissor foi fixado em uma posição (ponto *Begin*), enquanto deslocava-se continuamente o receptor ao longo do percurso. Os módulos LoRa estavam cerca de 1,50 m acima do solo. O transmissor foi configurado para enviar automaticamente dados formados por um número inteiro, que era incrementado a cada segundo. O receptor foi configurado para coletar os dados, cuja informação era monitorada por um PC conectado via USB e por um *smartphone* via *Bluetooth*. O monitoramento de dados permite identificar as perdas de dados durante o deslocamento, que são divididas em: parcial, que é observada quando há descontinuidade da sequência incremental; total, que é acontece quando nenhum dado é recebido. Em caso de perda total marcava-se um ponto ( $d_n$ ). Em caso de perdas parciais, um ponto era marcado e em seguida realizava-se uma busca em torno dele a fim de encontrar um ponto de perda total de dados.

O segundo teste serviu para quantificar as perdas de informação observadas no primeiro teste. O transmissor estava fixado em torno do ponto *Begin*, enquanto deslocava-se o receptor ao longo do percurso. Os módulos LoRa estavam cerca de 1,50m acima do solo. Nesse teste, o pacote de dados do transmissor era formado por 372 caracteres representados pela letra A. Esse formato preenche completamente o *buffer* dos módulos LoRa. Além disso, o transmissor foi configurado para enviar dados apenas quando o receptor fizesse uma requisição. Com a aplicação do primeiro teste, é possível observar em que pontos ao longo do trajeto houve perdas. Portanto, não era necessário enviar dados de forma contínua. Para fazer uma requisição, foi necessário conectar um aparelho *smartphone* via *Bluetooth* ao SADIR. Nesse aparelho, havia uma interface com um visor para monitorar

os dados e um comando para acionar o processo de requisição. Após uma requisição, o receptor fica a espera do pacote de dados durante 30 segundos. Esse é um valor de tempo suficiente para finalização da requisição e recepção de dados. Caso o tempo exceda esse limite, o receptor retorna à interface uma mensagem de perda total de pacotes. Para fazer as marcações foi utilizado um GPS Etrex 10 da fabricante Garmin que apresenta erros de medição de 3,6 m.

Os testes propostos foram executados inicialmente por (MEDEIROS et al., 2019). De acordo com o primeiro teste, as perdas de dados surgiram na marca de 900 m, destacado pela marcação verde da Figura 17. Foi feita uma busca ao redor desta marca, entretanto deste ponto até o fim do cenário, observou-se apenas perdas parciais.

No segundo teste aplicado a requisição de dados ocorreu a cada 100 m. Isso é devido ao fato das perdas vistas no primeiro testes surgirem na marca de 900 m. Dessa forma, as requisições anteriores a esse ponto foram feitas apenas para corroborar que não havia perdas de pacotes. Após esse ponto, foram feitas 10 requisições a um passo de aproximadamente 10 m. Esse valor de passo foi escolhido para ter uma distância segura, considerando o erro de medição do GPS. Notou-se que a perda mais expressiva foi no ponto de 1075 m, destacado pela marcação preta na Figura 17, em que 11% de dados foram perdidos. Essa perda podem ser justificada pelo fato de haver uma estrutura de concreto fechada ao redor desse ponto, destacado pelo quadro vermelho da Figura 17.

Entretanto, há um detalhe com relação aos testes realizados. No primeiro teste observou-se perdas parciais no ponto destacado pelo marcador laranja da Figura 17 (aproximadamente 460 m). Dessa forma, um conjunto de requisições (10 ao total) foi realizado nesse ponto durante o segundo teste, resultando em cerca de 6% de perdas. Essa perda foi associada inicialmente a linha de transmissão que estava perpendicular à trajetória do teste.

Devido a influência de elementos externos na transmissão de pacotes, neste trabalho uma nova investigação mais aprofundada no cenário da Figura 17 foi realizada. Nessa investigação, determinou-se o comportamento das perdas e quais elementos influenciam de maneira expressiva a transmissão de dados via LoRa.

Os teste foram aplicados novamente nesse cenário, mas em dias diferentes. Com a aplicação do primeiro teste, observou-se novamente perdas no ponto marcado em laranja. Novas perdas surgiram no ponto de marcação em azul da Figura 17. Desse ponto em diante, a perda de dados era total. No segundo teste, pôde-se quantificar as perdas, resultando em 70% no ponto laranja e 40% no ponto azul.

Apesar do cenário ser o mesmo, há variações no ambiente, como uma maior presença de veículos transitando na segunda aplicação. Como a quantidade de carros na segunda vez era maior, espera-se uma maior quantidade de obstáculos entre transmissor e receptor.

No ponto laranja, além de haver uma linha de alta tensão, há também um fluxo intenso de carros. Nesse mesmo dia, a partir do marcador azul até o fim do trajeto, havia uma quantidade expressiva de veículos circulando e estacionados, aumentando a quantidade de obstáculos entre a visada dos módulos LoRa. Portanto, a possível causa da influência na transmissão com módulos LoRa está associado a presença de veículos no ambiente.

## Influência de fontes externas

Com os resultados da perda de pacotes, observa-se que a transmissão está intrinsecamente ligada ao tipo de obstáculo presente no ambiente. Diversos elementos possivelmente contribuíram para o resultado da avaliação da qualidade da transmissão de módulos LoRa. Dentre eles, as linhas de alta tensão, os transformadores, as câmeras de segurança instalados nos postes, os equipamentos presentes nos edifícios e veículos. Para identificar melhor as fontes de ruídos durante esse aprofundamento, utilizou-se o analisador de espectro N9340B da fabricante Keysight Technologies. Este usava a antena Diamond RH799 que possui 2,15 dBi de ganho, potência máxima de 10 W e faixa de operação de 70 Hz a 1 GHz.

Para a análise do ruído, configurou-se a faixa de captura de dados do analisador em torno da frequência de operação do módulo LoRa (433 MHz) conectado ao SADIR. Considerando-se os pontos em que houve perdas de dados, foi realizado uma busca com o analisador ao redor desses pontos, a fim de procurar as possíveis fontes de ruído que influenciaram a perda de pacotes. O analisador foi aproximado de diversas possíveis fontes: transformadores; linha de alta tensão; câmeras de monitoramento; e veículos. Foi observado que os ruídos externos tinham uma potência inferior a -80 dBm, de acordo com a Figura 18a, exceto quando alguns veículos passavam nas proximidades.

Tendo em vista o aumento dos níveis do ruído na banda de análise devido à presença de veículos, assim como o aumento da perda de pacotes de dados no ponto laranja, deu-se início à investigação.

Primeiramente, o transmissor e receptor foram configurados conforme ao apresentado no teste de avaliação de alcance máximo e operação ótima dos módulos LoRa (primeiro teste). O transmissor foi posicionado novamente no ponto *begin*, enquanto o receptor e analisador foram posicionados no giradouro próximo ao ponto laranja, que pode ser observado na Figura 17 destacado pelo quadro azul. Além disso, para monitorar os dados, utilizou-se um *smartphone* conectado por Bluetooth no SADIR. O giradouro foi escolhido por ser seguro e haver um intenso fluxo de veículos. Quando os carros passavam perto dos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  indicados na figura, percebeu-se que o receptor não recebia dados e o analisador captava ruídos na faixa de frequência de operação do módulo LoRa. Esse pontos estão distantes do receptor e analisador a 8, 20 e 27 m respectivamente. Os veículos que causaram essa interferência inicialmente foram o Spin da Chevrolet e o Fusca



da Volkswagen.

A fim de confirmar que os carros são fontes de ruído externa que bloqueiam a recepção de dados via LoRa, foram escolhidos os veículos para uma nova análise: Chevrolet Prisma (ano 2008/2009), Chevrolet Classic (2012/2013) e Honda Civic (ano 2015/2016). Cada veículo foi posicionado nos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ . O ruído pôde ser confirmado através do Prisma. Quando o carro estava desligado, observou-se apenas o ruído interno analisador e os dados eram recebidos corretamente via LoRa. Quando o carro era ligado, o nível de ruído detectado pelo analisador aumentava e os dados deixavam de ser recebidos.

As componentes de frequência do ruído captadas eram variáveis. Portanto, foi realizado um procedimento para capturar apropriadamente o comportamento deste ruído. Para isso, o carro foi estacionado em um local seguro e aberto, sem obstáculos, enquanto o analisador foi posicionado a 1 m à frente do carro.

Quando o carro estava desligado, o analisador indicava apenas o ruído interno do instrumento, conforme a Figura 18a. Entretanto, no momento em que o carro foi ligado, o ruído aparecia de maneira variável em diversas componentes de frequência entre as faixas de 383 MHz e 483 MHz, como ilustrado na Figura 18b.

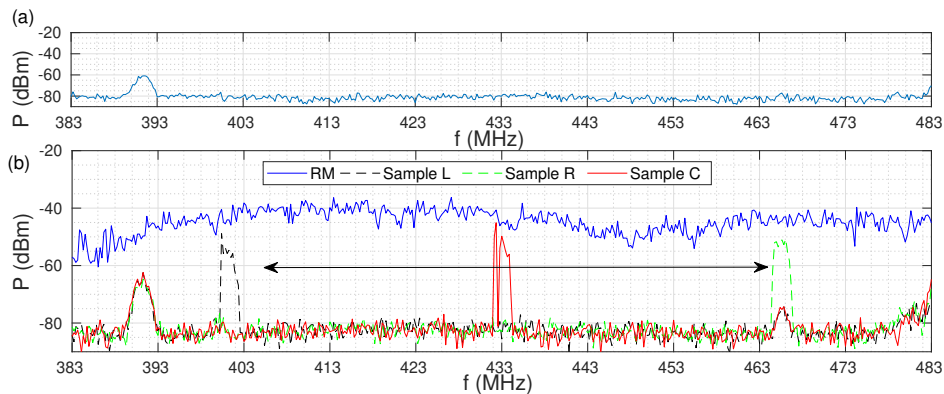


Figura 18 – Ruído do Chevrolet Prisma captado pelo Analisador de Espectro. Fonte: (MEDEIROS et al., 2021)

Na Figura 18-b, as componentes vermelha, verde e preta representam amostras detectadas, em que cada uma delas apareceram em tempos diferentes. No analisador de espectro, há um modo de configuração que permite reter o sinal e a frequência amostra obtida, e disponibilizá-los no visor do analisador. Como resultado, obteve-se o comportamento destacado em azul escuro (Figura 18-b). Esse mesmo comportamento se repetiu para outras frequências, como 868 e 915 MHz, cujas faixas também são utilizadas por módulos LoRa (MEDEIROS et al., 2021).

Portanto, observa-se que os veículos são uma fonte de ruído em ambientes urbanos e influenciam a transmissão de módulos LoRa. Os resultados da análise de ruído podem auxiliar a determinação dos pontos ótimos de instalação dos módulos LoRa nesses ambientes.

Além disso, com o módulo TRRS485LoRa apresentado no Capítulo 5, é possível melhorar a linha de visa entre os módulos LoRa, assim como distanciar os módulos da fonte de ruído.

## 6.2 Análise da aquisição de variáveis hidráulicas

Como o SADIR foi projetado para SAAs, foram realizados testes de medição e aquisição da dados de variáveis hidráulicas. Avaliou-se a exatidão do sistema frente a sensores industriais e o comportamento de módulos LoRa no ambiente de SAAs.

Para realizar desses testes, escolheu-se o Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) localizado no campus I da UPFB. Nesse laboratório, há uma planta hidráulica que simula etapas de um sistema de abastecimento de água. Os testes aconteceram em um trecho dessa planta, que consistia em uma tubulação como 100 mm de diâmetro que tem dois medidores de fluxo por pressão diferencial: uma placa de orifício (OP) de 50 mm de diâmetro, que foi utilizado nos testes; e um tubo de Venturi de 70 mm de diâmetro. A estrutura usada nos testes é apresentada na Figura 19.

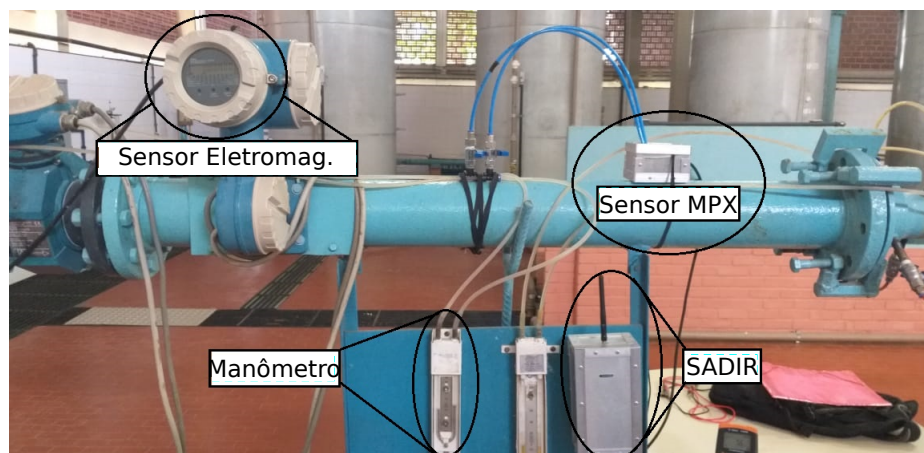


Figura 19 – Cenário para análise da aquisição. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021)

Para a medição do fluxo de água, utilizou-se o sensor MPX5010 da fabricante NPX. Este é um sensor de pressão diferencial, que pode receber entradas entre 0 a 10kPa e gera um saída proporcional de 0 a 5 V. O sensor foi conectado a um  $CC_{ext}$  para adequar os níveis de tensão suportados pelo SADIR. O SADIR faz a conversão dos dados de pressão adquiridos em vazão.

O sensor MPX5010 está conectado à placa de orifício por meio de mangueiras, conforme ilustrado na Figura 19. Dessa forma, realizou-se a calibração do sistema instalado. Nessa etapa, ajustou-se o valor de *offset* quando não havia fluxo de água na tubulação. Na sequência, ajustou-se o nível de saída do circuito de condicionamento para 3,3 V para a vazão máxima na tubulação.



O processo de calibração aconteceu duas vezes: a primeira teve como referência o manômetro de mercúrio do tipo tubo em U e o segundo com relação ao sensor de fluxo eletromagnético PROMAG 30 F da fabricante Endress-Hauser (MEDEIROS et al., 2021). Os sensores utilizados encontram-se na Figura 19.

Após a calibração, deu-se início a aquisição de dados. Este processo consistia em modificar o valor da vazão de água na tubulação e, para cada valor de vazão, obter o valor na saída de cada sensor utilizado. Durante este processo, anotou-se o valor da coluna de mercúrio do manômetro e do fluxo de água registrado pelo sensor PROMAG 30F. Para cada amostra, a aquisição de dados foi realizada 10 vezes. O dado capturado pelo SADIR foi monitorado de duas formas: localmente por um PC conectado via USB; e remotamente, por um PC presente em outro laboratório, que estava conectado a outro SADIR e recebia os dados via LoRa. As interfaces para monitorá-los são apresentadas na Figura 9. O laboratório usado no monitoramento remoto é denominado de Laboratório de Automação e Controle (LAC), que está localizado a 200 m do LENHS.

Uma análise inicial já foi abordada no trabalho de (MEDEIROS et al., 2019), em que foi realizada uma comparação entre o aquisição de dados feito pelo SADIR e o manômetro de mercúrio. Entretanto, a medição pelo manômetro tem limitações quanto à precisão. Dessa forma, neste trabalho realizou-se uma nova comparação entre o manômetro, um sensor industrial (PROMAG 30F) e o SADIR. Para isso, o SADIR foi calibrado em relação ao manômetro e depois ao sensor eletromagnético.

Na Tabela 2 são apresentados os valores adquiridos pelos sensores eletromagnético (*Elemag*) e no manômetro de mercúrio (*Manom.U*), assim como o erro entre os valores lidos pelos sensores e conjunto MPX510-SADIR.

Tabela 2 – Comparação do Erro de Aquisição do Sensor MPX com relação ao Manômetro e PROMAG 30F. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021)

Elemag		Manom. U	
Vazão (L/s)	Erro Calibração (%)	Vazão (L/s)	Erro Calibração (%)
0.00	0.00	0.00	0.00
1.57	4.18	1.28	16.96
2.64	0.00	1.81	15.91
3.10	0.00	2.57	5.51
3.37	0.00	2.94	2.72
3.68	1.14	3.27	1.81
4.17	1.00	3.69	2.39
4.64	0.69	4.11	1.10
5.25	0.85	4.72	3.17
5.56	0.00	5.34	0.00

Na tabela, observa-se que o maior erro de medição usando como referência o sensor eletromagnético é de 4,18%, com erro médio de 0,78%. Já com relação ao manômetro, o

erro máximo foi de 16,96% e erro médio de 4,95%. Assim, observa-se que com ajustes simples na calibração, é possível obter com o SADIR e o sensor MPX5010, resultados próximos a sensores industriais (MEDEIROS et al., 2021). Esse resultado ainda pode ser melhorado caso sejam utilizados sensores com maior precisão que o MPX5010.

## Influência do LoRa em sensores

Em testes realizados por (MEDEIROS et al., 2019) a respeito da transmissão via LoRa e aquisição de dados, o SADIR foi configurado para adquirir dados do sensor MPX5010 e transmiti-los via LoRa. Foram configurados diferentes períodos de transmissão. Em determinados períodos, observou-se que os dados no transmitidos divergiam dos valores adquiridos. Essa divergência foi observada usando a interface de PC apresentada na Figura 9. Dessa forma, a depender do período de transmissão, há interferência na transmissão de dados, o que compromete a funcionalidade do sistema proposto. Portanto, neste trabalho buscou-se investigar a causa desse ruído.

Com o auxílio do osciloscópio, os sinais de saída do sensor MPX5010, do  $CC_{ext}$  e dos pinos dos módulos LoRa foram monitorados. Um ruído foi detectado de maneira mais expressiva na saída do circuito de condicionamento e teve um comportamento similar ao apresentado na Figura 20(a). Quando o tempo entre as transmissões é suficientemente grande, o ruído aparece, porém não afeta a transmissão pois ele desvanece antes de uma nova aquisição. Contudo, caso o tempo seja pequeno, o ruído ainda está presente antes de uma nova aquisição. Por isso que há divergência entre o sinal esperado e o transmitido. Diante disso, deu-se início a uma série de testes para analisar o ocorrido.

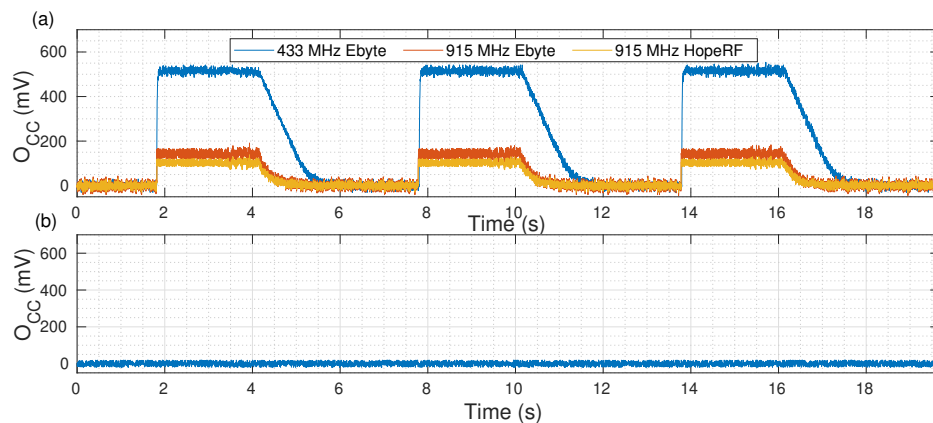


Figura 20 – Ruído na saída do circuito de condicionamento: a) Sem blindagem. b) Com blindagem Fonte: (MEDEIROS et al., 2021)

Para realizar os testes, foram utilizados módulos LoRa de diferentes fabricantes e faixas de operação para cada teste e hipótese. Foram utilizados os módulos: E32-433T20D da Ebyte, que opera em 433 MHz; E32-915T20D da Ebyte, que opera em 915MHz; e RFM95 da empresa HopeRF, que também opera em 915 MHz. Ao todo foram aplicados

três módulos E32-433T20D, dois E32-915T20D e dois RFM95. Dessa forma, é possível descartar, ao longo das análises, se o problema está associado ao módulo, a fabricante ou a faixa de operação. Os módulos foram configurados para transmitir dados com duração de 2 segundos a cada 5 segundos. O sistema analisado era composto pelo sensor MPX5010, o  $CC_{ext}$ , módulos LoRa conectados ao SADIR e fonte de alimentação. Nessa investigação, considerou-se três hipóteses a fim de identificar a causa efetiva do ruído e a forma de atenuá-lo.

A primeira hipótese parte da premissa de que o ruído era do tipo condutivo. Esse tipo de ruído poderia surgir com o retorno da corrente no circuito ou pelo afundamento da tensão de alimentação no instante em que o módulo LoRa transmite dados. Sendo assim, com um osciloscópio, buscou-se identificar quais os principais pontos do sistema em que a transmissão dos módulos LoRa interferiu. Os pontos analisados foram: o pino do sinal de saída do sensor MPX5010; o pino de entrada de sinal do  $CC_{ext}$ ; o pino de saída do  $CC_{ext}$ ; o pino de entrada do SADIR que recebe o sinal do  $CC_{ext}$ ; os pinos de comunicação serial dos módulos LoRa; e os conectores da fonte de tensão. Os pontos que sofreram influência foram a fonte de tensão e o circuito de condicionamento.

Após a identificação, o módulo LoRa foi removido do SADIR e foi alimentado por uma fonte externa em separado do resto do circuito, isolando o módulo LoRa do sistema desenvolvido. Assim, seria possível determinar se o ruído ainda permaneceria.

Após a remoção, a saída do circuito de condicionamento ( $O_{cc}$ ) foi monitorada pelo osciloscópio. O sistema estava conectado à placa de orifício. Durante este teste, não havia fluxo de água na tubulação, então, era esperado que a saída do circuito de condicionamento fosse 0 V. Contudo, o ruído permanecia durante as transmissões do módulo LoRa mesmo isolado do resto do circuito. O comportamento desse ruído pode ser visto na Figura 20a, sendo o módulo E32-433T20D destacado em azul, o E32-915T20D em laranja e o RFM95 em amarelo.

A segunda hipótese considerava que o ruído era indutivo. Esse tipo de ruído pode acontecer pela influência do campo magnético durante as transmissões dos módulos LoRa. Ainda com o osciloscópio conectado a saída do  $CC_{ext}$ , a orientação da antena do módulo foi modificada e os cabos de sinal e alimentação foram trançados para ver se influência seria minimizada. Entretanto, o ruído na saída do  $CC_{ext}$  permaneceu da mesma forma conforme a Figura 20a.

Na última hipótese, considerou-se a influência de ruídos capacitivos. Nesse teste, os cabos que conectam o SADIR ao  $CC_{ext}$  foram trançados e blindados. Ambos foram blindados por uma caixa formada por chapas de alumínio com espessura de 1 mm e interconectadas por conectores em L de 1/2"x 1/2"x 1/16". Após essa blindagem, o ruído foi minimizado, cujo resultado é apresentado na Figura 20b. Logo, a blindagem validou a hipótese e foi a solução para o problema.

Assim como os módulos LoRa podem influenciar os elementos do sistema proposto, é possível que eles influenciem outros componentes industriais, como sensores. Para verificar essa possibilidade, um teste foi executado no LENHS em dois sensores comerciais: um sensor eletromagnético VMS038 da fabricante InControl e o sensor de pressão PTX7217 da fabricante Druck. Ambos estavam próximos um do outro e conectados em outra planta hidráulica.

Para esta nova análise, os módulos LoRa foram configurados para transmitir dados com período de 10 s a cada 20 s. Os sensores foram monitorados por um supervisor feito pelo software LabVIEW. Durante a transmissão de dados, não havia fluxo de água a fim de evitar ruídos causados pelas vibrações na tubulação. O comportamento da influência pode ser observado na Figura 21. Para obter esse resultado, os módulos LoRa foram posicionados a 1 cm de distância de cada um dos sensores. Vale salientar que o ruído acontecia em outros valores de distância (MEDEIROS et al., 2021). O sinal em laranja representa o módulo de 433 MHz, o amarelo é referente ao módulo E32-915T20D e o roxo representa o módulo RFM95. O sinal em azul é a resposta obtida quanto não havia transmissão de dados.

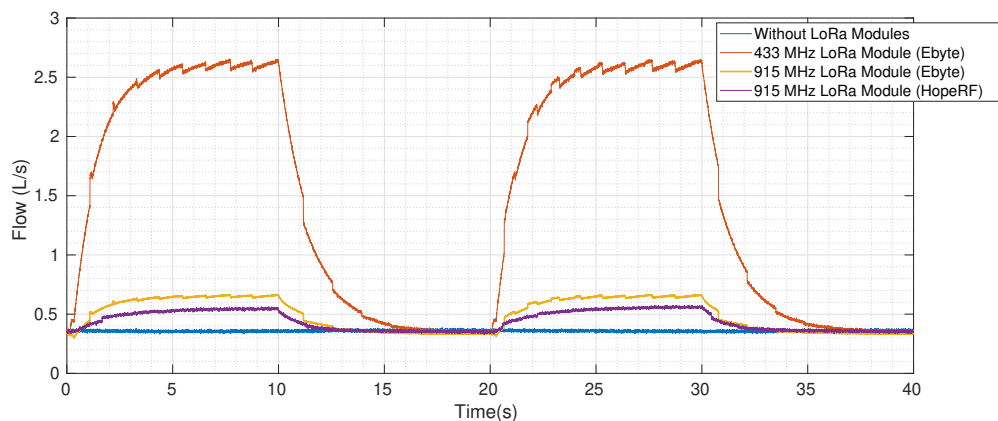


Figura 21 – Ruído coletado pelo supervisor Fonte: (MEDEIROS, 2018)

Ao observar a Figura 21, o comportamento é similar ao apresentado na Figura 20a. Observa-se que, quando os módulos LoRa transmitem informação, um ruído DC surge no sinal adquirido pelos sensores. Ao final, da transmissão, esse ruído desvanece.

Ao aplicar o teste sobre os sensores, observou-se que o ruído surgiu apenas no sensor VMS038. A carcaça deste sensor é feita de PVC, enquanto o sensor Druck é revestido por uma carcaça de aço. Dessa forma, observa-se que a blindagem minimiza a influência do sinal dos módulos LoRa em sensores industriais.

Com os resultados da análise do ruído, observa-se que o ruído provocado nos sensores é capacitivo e independe da faixa de operação e fabricante. Como solução, é necessária a blindagem do sistema.

### 6.3 Análise do controle de nível

Para validar a aplicação de controle de nível com o sistema desenvolvido, escolheu-se uma plataforma de tanques de água presente no LAC. Essa plataforma é composta por sensores para a medição de nível e um conjunto de bombas. Por meio dessa estrutura é possível simular, de forma reduzida, o controle de tanques de uma estação elevatória. A plataforma pode ser visualizada nas Figuras 22 e 23.

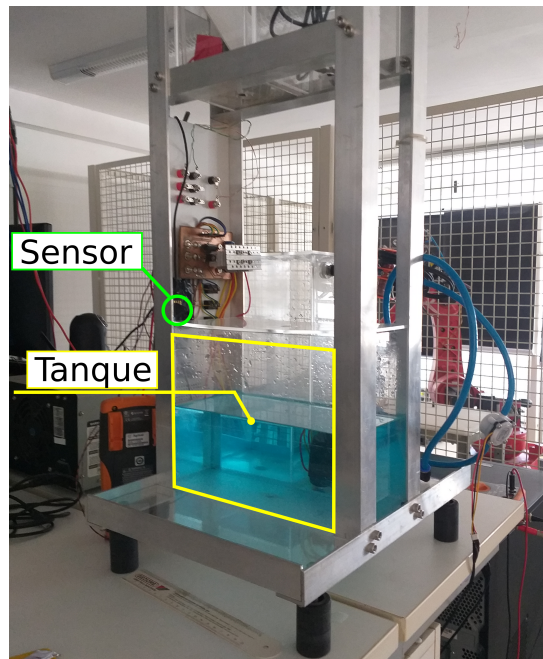


Figura 22 – Vista de Frente. Fonte: Própria do Autor

A estrutura da plataforma é formada por um tanque, cujo nível de água é medido e controlado, e um reservatório, que serve para armazenar a água utilizada no processo de bombeamento. As dimensões aproximadas do tanque são 30 cm de comprimento, 13 cm de largura e 20 cm de altura. Já as dimensões do reservatório são de 15 cm de comprimento, 15 cm de largura e 29,5 cm de altura.

Para a medição de nível, foi utilizado o sensor de pressão diferencial MPX5010. Esse sensor encontra-se no topo do tanque (Figura 22). Nele foi colocada uma pequena mangueira, que conecta o fundo do tanque a uma das entradas diferenciais do sensor, como ilustrado na Figura 24a. A segunda entrada diferencial está em contato direto com a atmosfera. Dessa forma, a pressão diferencial é proporcional à pressão exercida no fundo do tanque. Consequentemente, de acordo com a Equação 4.3, o nível de água presente no tanque será proporcional à pressão exercida no fundo do tanque.

Como o sensor MPX5010 gera uma saída em tensão acima do que é suportado pelo sistema, ele foi conectado ao circuito de condicionamento  $CC_1$  do SADIR apresentado na Figura 23. Na plataforma, há três bombas de 12 V DC, como ilustrado na Figura 24b. A primeira é responsável por bombear água do reservatório ao tanque, ou seja, encher o



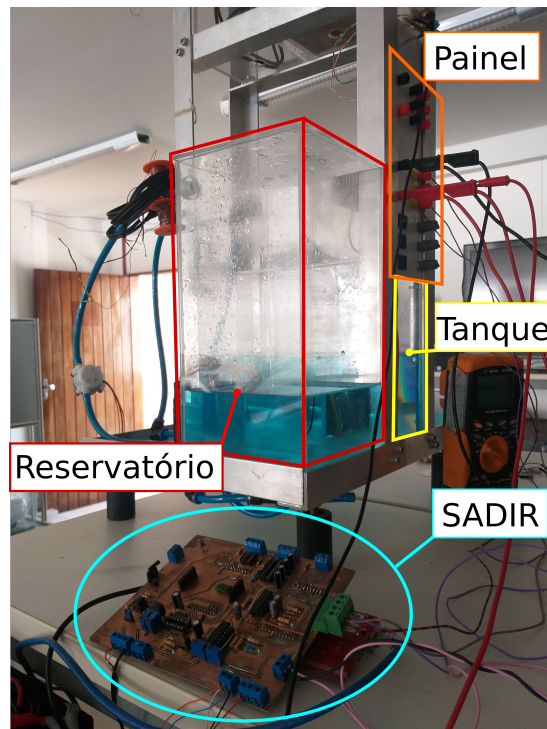


Figura 23 – Vista de Trás. Fonte: Própria do Autor

tanque. A segunda retira água do tanque até o reservatório. A terceira bomba circula a água do próprio reservatório. O controle foi aplicado apenas na primeira e segunda bomba.



(a) Sensor MPX5010 na plataforma de tanques.



(b) Conjunto de bombas

Figura 24 – Sensor MPX5010 e Conjunto de bombas. Fonte: Própria do Autor.

Para a realização do controle automático, é necessário conectar as bombas aos módulos  $DB_1$  e  $DB_2$  do SADIR. Na plataforma, há um painel de comandos (Figura 23), que serve para ligar ou desligar a alimentação das bombas e fazer o controle manual localmente em casos de manutenção.

O controle de nível desenvolvido acontece localmente, mas seu acionamento é através do servidor Ubidots. Uma vez que o controle é acionado, o SADIR faz a aquisição de dados do sensor MPX5010. Em seguida, o sistema converte os dados de tensão para nível. Ao final da conversão, os dados são enviados remotamente ao Ubidots.

A visualização do funcionamento da plataforma de tanques foi remota, sendo através de uma câmera conectada à *internet*. A imagem capturada pela câmera é ilustrada na Figura 25. A câmera estava conectada a um PC, que capturava as imagens e as exibia em um navegador *web*.

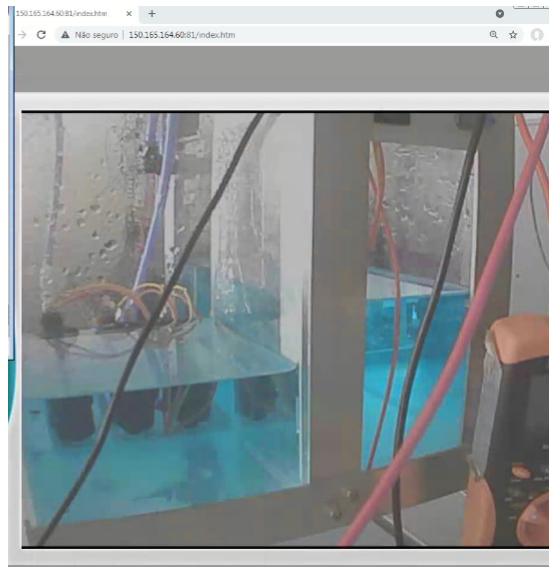


Figura 25 – Imagem visualizada pela câmera de monitoramento. Fonte: Própria do Autor

Tendo em vista que a plataforma foi monitorada completamente de forma remota, foram implementados procedimentos de segurança no firmware do SADIR para evitar quaisquer danos ao sistema. Além disso, foram acrescentados alertas na interface para indicar a condição de funcionamento do sistema. Antes de cada envio ao servidor, o sistema compara o valor de tensão lido a um valor de segurança configurado na etapa ST (Capítulo 5). Caso o valor lido ultrapasse o valor de segurança, as bombas são desligadas e o controle desativado. Um alerta é emitido no servidor, que indica a necessidade de inspeção e verificação do problema. Ao solucionar o problema, envia-se um comando ao SADIR que reinicia o sistema, liga as bombas e ativa novamente o controlador.

De acordo com Silva (2020), o controle de bombeamento em EEA reais é através do monitoramento de nível de reservatórios. O controlador aplicado é do tipo *on-off* com intervalo diferencial. Esse tipo de controlador é utilizado pois não é necessário manter o mesmo nível água dentro do tanque constantemente. Em casos reais, é necessário apenas encher o reservatório para ser consumida pela população. Quando o reservatório atinge um valor mínimo, aciona-se as bombas para encher novamente o tanque.

Portanto, o controlador implementado para a plataforma de tanques foi do tipo

*on-off* com intervalo diferencial. O SADIR captura os dados do sensor MPX5010 e, a partir deles, faz o controle da tensão aplicada nas bombas. A partir do controle de tensão, regula-se o nível de água no tanque. A malha de controle utilizada na implementação encontra-se na Figura 26.

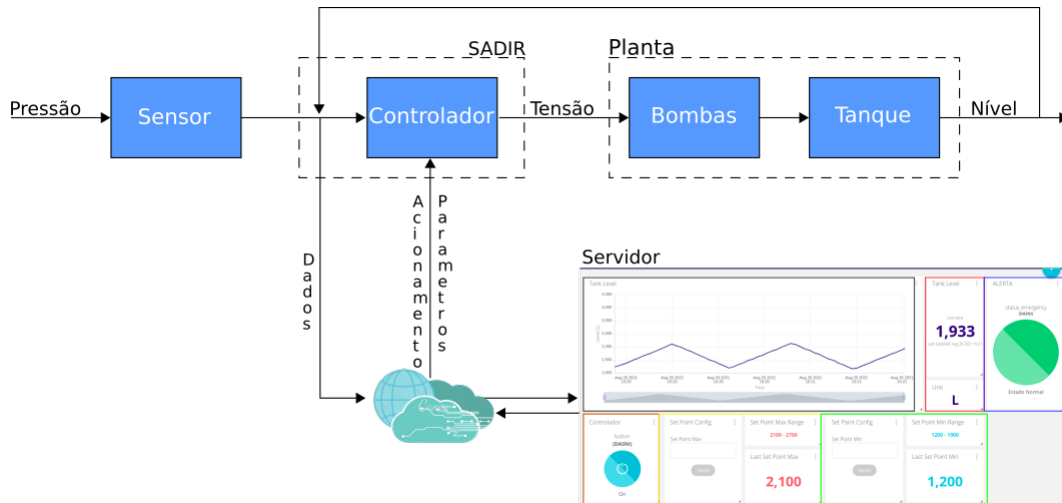


Figura 26 – Malha de Controle da Plataforma de Tanques. Fonte: Própria do Autor

O controlador *on-off* aplicado possui dois parâmetros a serem considerados: os limite mínimos e máximo do nível do tanque. Quando o nível do tanque atinge o valor mínimo, o SADIR aciona a bomba que enche o tanque e desliga a bomba que enche o reservatório. Ou seja, é iniciado o processo de enchimento do tanque. Quando o nível de tanque chega ao máximo, a bomba para encher o reservatório é acionada e desliga-se a bomba que enche o tanque. Ou seja, inicia-se a etapa de esvaziamento do tanque. Os dados do nível da água do tanque são enviados ao servidor Ubidots através da *Internet* a cada segundo.

Em casos reais e de acordo com a Equação 4.3, o nível de um reservatório determina a pressão na linha, pois a distribuição de água geralmente é por gravidade. O limite máximo do controlador implica na pressão máxima aplicada na linha de distribuição. Enquanto que o limite mínimo determina o menor valor de pressão que deve ser fornecido pela empresa responsável pelo abastecimento de água de uma cidade. Sendo assim, a configuração desses parâmetros com a interface desenvolvida permite estabelecer limites ótimos de operação para que a pressão na linha não exceda, assim como determinar o valor mínimo exigido às distribuidoras. Ao determinar os vazamentos, é possível reduzir os vazamentos nas linhas de distribuição. As vantagens de utilizar um servidor *Web* para configuração estão na possibilidade de determinar os parâmetros de reservatórios em lugares remotos, além de reduzir custos de implementação com cabos para transmissão de dados a longas distâncias.

Para verificar o comportamento do controlador e comunicação do servidor com o sistema proposto, foram determinados diferentes valores máximo e mínimo, como ilustrado na Figura 27.



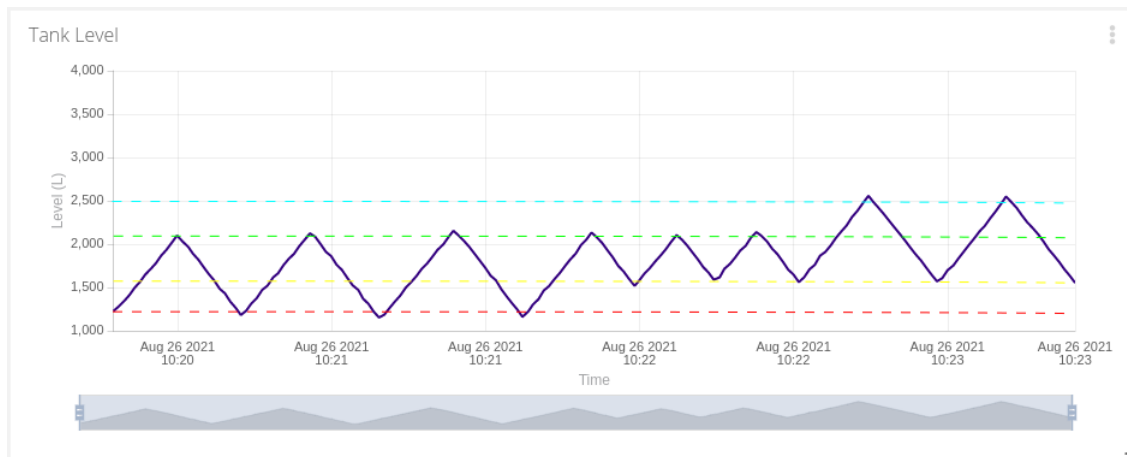


Figura 27 – Resposta do Controlador. Fonte: Própria do Autor

Os pontilhados vermelho e amarelo determinam diferentes limites mínimos configurados via servidor, enquanto que os pontilhados verde e azul são os limites máximos. Essa variação de limites foi uma forma de simular um consumo de uma cidade, observar o comportamento do controlador e da comunicação entre servidor e SADIR.

## 6.4 Outras Análises

Em sistemas de abastecimento de água costuma-se utilizar CLPs para controlar uma rede de sensores e atuadores que estão interconectados por cabos. A partir desses sensores e atuadores definem-se parâmetros do CLP, como tipo e quantidade de entrada e saída da rede.

Para o comparativo do preço, foram feitas cotações de CLPs com configurações mínimas que atendessem os requisitos dos sistemas de abastecimento de água e que fossem similares às características do SADIR. Sendo assim, dois CLPs foram cotados: O CLP01 é formado pela CPU TM200CE24T juntamente com o cartucho de expansão TM3AI8, ambos da fabricante Schneider Electric. Dessa forma, o CLP01 tem compatibilidade com redes que usem RS485 como camada física e com Ethernet, 24 entradas e saídas digitais e 8 analógicas. O CLP02 é formado pela CPU S7-1200 mais o módulo de expansão CM1241, ambos da Siemens. Esse conjunto contém 8 entradas e 6 saídas digitais, 2 entradas analógicas, conexão com Ethernet e RS485. Os preços desses CLPs podem ser vistos na Tabela 3.

A cotação do SADIR foi feita em duas distribuidoras de componentes eletrônicos mundialmente conhecidas (Farnell e Digikey). Os valores apresentados na tabela são referentes aos componentes utilizados para a confecção do sistema proposto, desconsiderando-se o tempo de engenharia e outros fatores. De toda forma, comparando-se os CLPs com as configurações apresentadas com o dispositivo proposto neste trabalho, percebe-se que o

Tabela 3 – Comparativo de custos entre SADIR e CLPs. Fonte: Adaptado de (MEDEIROS et al., 2021)

Sistema para Implementação do Projeto		
Componente <sup>c</sup>	Farnel <sup>a</sup> (\$)	Digikey <sup>b</sup> (\$)
SADIR	39.90	35.70
Circuito de Condicionamento Externo	4.13	7.44
Nó adicional para rede RS485	7.11	12.94
metro do cabo para RS485	2.03	2.24
Solução Tradicional		
		Preço <sup>d</sup> (\$)
PLC01 (Schneider)		468.43
PLC02 (Siemens)		936.80

<sup>a</sup> <https://www.newark.com/>

<sup>b</sup> <https://www.digikey.com/>

<sup>c</sup> Cotação em FEB/21

<sup>d</sup> Cotação de Distribuidor no Brasil

SADIR tem um custo reduzido. Com as características e implementações apresentadas neste trabalho, o módulo SADIR pode ser uma alternativa de baixo custo frente as soluções utilizadas no mercado.

Com relação ao consumo de energia do sistema proposto, foram realizado testes de medição da saída de tensão e corrente do sistema desenvolvido por meio de multímetros U1242B da fabricante Agilent.

Dos testes realizados, descobriu-se que o maior valor de consumo atingiu 1024,8 mW. Esse consumo foi devido principalmente ao uso de transmissão sem fio tanto pelo LoRa quanto para o *Bluetooth*. Quando estes módulos não foram utilizados, o consumo caiu para 446,4 mW. Os valores de consumo são aceitáveis, uma vez que o projeto inicial do SADIR desconsiderou restrições de energia elétrica para alimentação do sistema (MEDEIROS et al., 2021).

Os valores de consumo apresentados podem ser reduzidos caso a CPU seja configurada em modos de hibernação. Nesses modos, partes do sistema são desativados momentaneamente para diminuir o consumo total, sendo possível atingir valores de até 20 mA quando configurado. Além disso, o sistema é um protótipo que utiliza uma CPU inserida em uma placa de desenvolvimento (*LaunchPad1294*). Esta placa possui elementos que permanecem em funcionamento mesmo em modos de hibernação, como LEDs. Dessa forma, caso sejam utilizados os modos de hibernação e uma CPU fora de uma placa de desenvolvimento, é possível diminuir ainda mais o consumo do sistema (MEDEIROS et al., 2021).

## 7 Considerações Finais

O trabalho apresentado visou mostrar um sistema voltado para SAAs capaz de realizar aquisição de dados e controle de variáveis hidráulicas, que pode monitorar diferentes redes de comunicação, que propicia comunicação a longas distâncias e permite realizar o acionamento e configuração de controladores.

A utilização de uma comunicação híbrida fornece ao sistema características como flexibilidade, versatilidade e robustez. A flexibilidade está relacionada à capacidade de se adaptar a diferentes tipos de ambientes e situações. O fato do sistema utilizar padrões de comunicação industriais e consolidados permite que o sistema seja inserido em diferentes redes industriais. O uso de LoRa também contribui para aumentar a flexibilidade, uma vez que concede ao sistema uma maior cobertura de comunicação e permite que seja instalado em áreas próximas, como também em locais distantes, principalmente sem sinal de *internet* ou telefonia móvel.

Além disso, o microcontrolador utilizado possui um módulo Ethernet embarcado. Assim, o sistema pode ser inserido em ambientes com ou sem acesso à *internet*. Portanto, a comunicação híbrida aumenta a flexibilidade do sistema uma vez que o sistema pode se adequar a redes cabeadas ou sem fio. O uso de diferentes circuitos de condicionamento também fornece flexibilidade ao SADIR, pois dessa forma é possível aplicá-lo a sensores com diferentes tipos de saída.

A versatilidade é associada à habilidade de se adaptar a diferentes funções ou atividades. O SADIR pode atuar como um sistema de aquisição, de controle ou interface de comunicação. A versatilidade pode ser vista também em relação ao software. Há interfaces implementadas para computador e *smartphones*, seja para monitorar ou acionar o controlador do sistema localmente ou remotamente. Além disso, o *Bluetooth* foi escolhido como forma de facilitar o monitoramento durante inspeções ou manutenções local porém ele também foi utilizado durante os testes de análise de transmissão.

A robustez está ligada à capacidade do sistema em resistir a interferências e manter o desempenho e funcionamento. Os padrões industriais como RS485 e CAN possuem alto grau de confiança e robustez, devido a mecanismos inseridos neles como o CRC para detecção de erro. A escolha de LoRa também foi uma forma de aumentar a robustez do sistema, uma vez que é uma tecnologia recente e mais robusta frente a outras como Zigbee e *Bluetooth*. Para provar essa robustez, foram realizados os testes de análise de transmissão. Outra forma de aumentar a robustez foi a blindagem do sistema, que resolveu problemas de interferência causadas pelos módulos LoRa em sensores comerciais.

Um dos problemas de SAAs era a ausência de soluções versáteis e robustas. Com

as características apresentadas, nota-se que o sistema proposto supre essa lacuna das soluções. Outra problema é a dificuldade de estabelecer um monitoramento e controle de regiões que não há sinais de dados ou telefonia móvel. Com o SADIR é possível realizar essas atividades em locais remotos, principalmente em áreas sem acesso a internet. Os problemas relacionados ao custo de implementação são reduzidos pelo fato de o sistema utilizar comunicação híbrida, que permite a implementação de uma rede local cabeada, como também uma rede sem fio e remota. O uso de LoRa também é um fator que contribui para a redução do custo de implementação pois diminui o uso de nós intermediários em redes sem fio.

Os resultados da análise de transmissão de módulos LoRa têm relevância na contribuição deste trabalho. Os SAAs podem estar em ambientes urbanos, com a presença de elementos como linhas de alta tensão e veículos. Durante a análise, pôde-se observar que a transmissão via LoRa nesses ambientes pode ser afetada por obstáculos como os veículos. Portanto, ao aplicar o SADIR em SAAs, deve-se levar em consideração se o ponto de instalação é próximo da passagem de veículos. Com essa análise percebe-se que o sistema proposto pode fazer aquisição de dados e controle de variáveis de forma remota, com alcance superiores a tecnologias como Bluetooth e Zigbee.

Na análise da aquisição pôde-se observar que o sistema é robusto e preciso, tendo em vista os erros apresentados em comparação a sensores industriais. O estudo do ruído dos módulos LoRa também é de extrema relevância. Saber que os módulos LoRa podem interferir em componentes de um SAA é importante, pois assim é possível determinar os locais mais apropriados para a instalação do sistema proposto. com presença de sensores, atuadores e motores. Além disso, identificar o tipo de ruído é crucial para estabelecer meios de minimizar a interferência em sensores. Portanto, com a análise de ruído, uma maneira de minimizar a influência dos módulos LoRa em sensores é por meio de blindagem com estruturas de aço.

Por fim, na análise de controle percebe-se que o uso de IoT é interessante para SAAS. Com dispositivos IoT é possível monitorar remotamente de variáveis hidráulicas, acionar o controle de bombas e determinação dos parâmetros de forma remota para o controle de bombeamento. Logo, com o sistema proposto, é possível estabelecer uma comunicação entre elementos de um SAA em locais distantes por meio da internet.

# Referências

- ABDELHAFIDH, M. et al. Cognitive internet of things for smart water pipeline monitoring system. IEEE, 2018. Citado na página 21.
- ADNAN et al. Forest fire detection using lora wireless mesh topology. IEEE, 2018. Citado na página 9.
- Agência Nacional de Águas (ANA). *Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de água*. 2019. Disponível em: <<https://www.fundaj.gov.br/index.php/tecnologias-de-convivencia-com-as-secas/11447-atlas-brasil-de-abastecimento-urbano-de-agua>>. Citado na página 21.
- ARAÚJO, J. J. et al. System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems. IEEE, 2013. Citado na página 3.
- AUGUSTIN, A. et al. A study of lora - long range and low power networks for the internet of things. Sensors, 2016. Citado na página 10.
- BAILLIEUL, J.; ANTSAKLIS, P. J. Control and communication challenges in networked real-time systems. IEEE, 2007. Citado na página 6.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e Fundamentos de Medida - Vol. 2*. 3. ed. [S.l.]: Grupo Editorial Nacional, 2019. Citado na página 17.
- BHAWIYUGA, A. et al. Lora-mqtt gateway device for supporting sensor-to-cloud data transmission in smart aquaculture iot application. IEEE, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 12.
- CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. IEEE, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.
- FLORES, T. K. S. et al. Indirect feedback measurement of flow in a water pumping network employing artificial intelligence. Sensors, 2021. Citado na página 19.
- GOMES, R. D. et al. Desafio das redes de sensores sem fio industriais. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, 2014. Citado na página 2.
- GUIBENE, W. et al. Evaluation of lpwan technologies for smart cities: River monitoring use-case. IEEE, 2017. Citado na página 8.
- GUTIÉRREZ, J. et al. Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. IEEE, 2013. Citado na página 6.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. *Sistemas Modernos de Comunicações Wireless*. [S.l.]: Bookman, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 11.
- HERNANDEZ-AMBATO, J. et al. Classic controllers design applied to temperature control for a plastic thermoforming machine. IEEE, 2018. Citado na página 1.
- HOFFMANN, M. *Smart Agents for the industry 4.0*. [S.l.]: Springer, 2019. Citado na página 2.

- HUH, H.; KIM, J. Y. Lora-based mesh network for iot applications. IEEE, 2019. Citado na página 9.
- IBM Developers. *Conhecendo o MQTT*. 2021. Disponível em: <<https://developer.ibm.com/br/technologies/iot/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>>. Acesso em: 16 fevereiro 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 14.
- JR, A. H. et al. Analysis and performance optimization of lora networks with time and antenna diversity. IEEE, 2018. Citado na página 8.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W. Recommendations for implementing the strategic initiative industry 4.0. Final Report of the Industry 4.0 Working Group, 2013. Citado na página 10.
- KASHID, S. G.; PARDESHI, S. A. A survey of water distribution system and a new approach to intelligent water distribution system. IEEE, 2014. Citado na página 1.
- KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. IEEE, 2008. Citado na página 6.
- KUNKUN, P.; XIANGONG, L. Reliability evaluation of coal mine internet of things. IEEE, 2014. Citado na página 1.
- LAVRIC, A.; POPA, V. A lorawan: Long range wide area networks study. IEEE, 2017. Citado na página 10.
- LI, X.-l. et al. The application research of internet of things to oil pipeline leak detection. IEEE, 2018. Citado na página 1.
- LÓPEZ, J. et al. Comparison between a fuzzy controller and classic controller applied to stabilize a humanoid robotic platform. IEEE, 2013. Citado na página 1.
- MANN, S.; HAYKIN, S. The chirplet transform:. IEEE, 1995. Citado na página 11.
- MEDEIROS, E. L. et al. Data acquisition system development for a hydraulic plant using hybrid communication network based on lora. IEEE, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 8, 28, 34, 38 e 39.
- MEDEIROS, E. L. d. Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em rede híbrida de comunicação de uma planta hidráulica focado em lora. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 41.
- MEDEIROS, E. L. d. et al. Data acquisition system using hybrid network based on lora for hydraulic plants. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 70, p. 1–12, 2021. Citado 15 vezes nas páginas 8, 10, 3, 5, 24, 28, 30, 31, 33, 36, 37, 38, 39, 41 e 47.
- MIRABELLA, O.; BRISCHETTO, M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management. IEEE, 2011. Citado na página 6.
- MOREIRA et al., H. A. M. Real-time neuro-fuzzy controller for pressure adjustment in water distribution systems. Water Supply, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. [S.l.]: GEN - Grupo Editorial Nacional, 2017. Citado na página 1.

- OCHOA, M. N. et al. Evaluating lora energy efficiency for adaptive networks: From star to mesh topologies. IEEE, 2017. Citado na página 8.
- PARK, P. et al. Wireless network design for control systems: A survey. IEEE, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 7.
- RAHMAN, N. H. A. et al. Analysis of propagation link for remote weather monitoring system through lora gateway. IEEE, 2018. Citado na página 8.
- RAHMATI, M.; YAZDIZADEH, H.; YAZDIZADEH, A. Leakage detection in a gas pipeline using artificial neural networks based on wireless sensor network and internet of thing. IEEE, 2017. Citado na página 7.
- RAM, V. h. et al. Regulation of water in agriculture field using internet of things. IEEE, 2015. Citado na página 6.
- RIGHETTO, A. M. *Optimal Operation of an Urban Water Distribution System*. [S.l.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- RIZZI, M. et al. Evaluation of the iot lorawan solution for distributed measurement applications. IEEE, 2017. Citado na página 8.
- SARAVANAN, M.; DAS, A.; IYER, V. Smart water grid management using lpwan iot technology. IEEE, 2017. Citado na página 8.
- SEMTECH. Sx1276/77/78/79 - 137 mhz to 1020 mhz low power long range transceiver. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 12.
- SHAMMAS, N. K.; WANG, L. K. *Abastecimento de Água e Remoção de Resíduos*. 3. ed. [S.l.]: Grupo GEN., 2013. Citado na página 17.
- SHERKSI et. al., N. I. Leakage effects on the variables of water distribution system. In: *2013 IEEE Conf. on Syst. Process Control*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 42–45. Citado na página 2.
- SIDDESH, G. M. et al. *Cyber Physical Systems - A Computational Perspective*. [S.l.]: CRC Press, 2016. Citado na página 2.
- SILVA, E. D. C. d. *EFICIENTIZAÇÃO ENERGÉTICA PARA UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2020. Citado na página 44.
- Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS). *Diagnóstico do Serviços de Água e Esgoto*. 2019. Disponível em: <[http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico\\\_AE2018.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico\_AE2018.pdf)>. Citado na página 2.
- TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de Água*. 3. ed. [S.l.]: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., 2006. Citado 4 vezes nas páginas 8, 15, 16 e 17.
- WANG, X. Z. et al. The research on electric power control center credit monitoring and management using cloud computing and smart workflow. IEEE, 2018. Citado na página 1.
- ZHAO, W. et al. Design and implementation of smart irrigation system based on lora. IEEE, 2017. Citado na página 9.

---

ZHU, F. et al. Parallel transportation systems: Toward iot-enabled smart urban traffic control and management. IEEE, 2019. Citado na página [1](#).