

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RENAN PATRICK ANDREZ

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA TECNOLOGIA LORA COMO ALTERNATIVA
PARA TRANSMISSÃO DE DADOS EM SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

CAMPO MOURÃO

2023

RENAN PATRICK ANDREZ

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA TECNOLOGIA LORA COMO ALTERNATIVA
PARA TRANSMISSÃO DE DADOS EM SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

**Feasibility analysis of LoRa technology as an alternative for data
transmission in public lighting management systems**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Wilhelm Krauss
Martinez

CAMPO MOURÃO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RENAN PATRICK ANDREZ

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DA TECNOLOGIA LORA COMO ALTERNATIVA
PARA TRANSMISSÃO DE DADOS EM SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE
ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 27/11/2023

Roberto Wilhelm Krauss Martinez
Doutor em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eduardo Giometti Bertogna
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Rodrigues da Cunha
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a todos que estiveram presentes durante este ciclo que se encerra com a conclusão deste trabalho. É impossível citar cada pessoa que contribuiu, mas saibam que todos vocês estão em meus pensamentos.

Em primeiro lugar, quero expressar minha gratidão a Deus e à minha família por estarem ao meu lado em todos os momentos. Seu apoio constante foi uma âncora importante ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Roberto Krauss, quero estender meu sincero agradecimento. Sua orientação, conhecimento e incentivo foram fundamentais para a realização deste trabalho. Suas orientações moldaram meu caminho e me ajudaram a crescer como estudante e como pessoa.

Também desejo agradecer à instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a todos que a representam. Em especial, quero destacar o Campus Campo Mourão, que desempenhou um papel fundamental neste capítulo da minha jornada acadêmica. Foi aqui que encontrei as ferramentas, o ambiente e o apoio necessários para concluir este período de aprendizado de forma bem-sucedida.

A todos os colegas, amigos e professores que de alguma forma contribuíram para minha formação, meu sincero agradecimento. Este trabalho representa não apenas meu esforço, mas também o apoio e a colaboração de muitos. Sem a ajuda e o encorajamento de todos vocês, este marco não teria sido possível.

Por fim, agradeço a todos que acreditaram em mim e me motivaram ao longo desta jornada. Este trabalho é dedicado a todos vocês.

RESUMO

A ascensão da energia verde é uma resposta aos problemas climáticos e à crise hídrica crescentes. Otimizar e melhorar a utilização da energia, não apenas representa uma economia financeira, mas também reduz a dependência de recursos naturais. A iluminação pública é vital para a segurança dos pedestres, mas os sistemas municipais brasileiros muitas vezes não otimizam a potência demandada. A aplicação de tecnologias de Internet das Coisas para aprimorar a eficiência energética em sistemas urbanos, como a iluminação pública, pode tornar as operações mais autônomas e eficazes, convergindo para o conceito de Cidades Inteligentes. Este estudo apresenta a tecnologia LoRa, destacando sua transmissão sem fio de longo alcance, baixo consumo de energia e alta robustez, especialmente adequada para dados de sensores e sinais atuadores. O uso de faixas não licenciadas do espectro torna a tecnologia LoRa financeiramente acessível. Uma arquitetura simples foi desenvolvida para validar a transmissão em um ambiente urbano movimentado, usando um *gateway*, um *endpoint*, um servidor de rede e um servidor de aplicação. O módulo RHF0301 foi empregado como *gateway* e servidor de rede em uma Raspberry PI Model B, enquanto a placa Heltec LoRa 32 atuou como nó final de rede. A integração desses dispositivos foi realizada no servidor de aplicação The Things Network. A simulação de cobertura completa de *gateways* LoRaWAN em Campo Mourão foi realizada, indicando que 7 *gateways* em prédios públicos poderiam cobrir todo o município. Em campo, foram coletadas informações sobre consumo de energia e comportamento do canal. O teste de propagação mostrou que a transmissão de dados foi bem-sucedida a 949 metros, com o *gateway* recebendo 77,6% dos pacotes enviados pelo *endpoint*. Dados sobre o consumo de energia dos dispositivos usados no teste de propagação, mostram que uma rede que cobrisse todo o município representaria 0,19% do consumo energético do sistema de iluminação pública. A eficiência energética no sistema de iluminação pública é crucial para as cidades inteligentes, destacando a importância da substituição de tecnologias antigas por lâmpadas de LED e a implementação de sistemas de gerenciamento inteligente. O trabalho ressalta a oportunidade significativa para projetos voltados à eficiência energética, contribuindo para metas sustentáveis e eficientes em cidades inteligentes.

Palavras-chave: lorawan; internet das coisas; telecomunicação; eficiência energética; cidades inteligentes.

ABSTRACT

The rise of green energy is a response to climate and growing water crisis issues. Optimizing and improving energy utilization not only represents a financial saving but also reduces dependence on natural resources. Public lighting is vital for pedestrian safety, but Brazilian municipal systems often do not optimize the demanded power. The application of Internet of Things (IoT) technologies to enhance energy efficiency in urban systems, such as public lighting, can make operations more autonomous and effective, converging towards the concept of Smart Cities. This study presents the LoRa technology, highlighting its long-range wireless transmission, low power consumption, and high robustness, especially suitable for sensor data and actuator signals. The use of unlicensed spectrum bands makes LoRa technology financially accessible. A simple architecture was developed to validate transmission in a busy urban environment, using a *gateway*, an *endpoint*, a network server, and an application server. The RHF0301 module was employed as the *gateway* and network server on a Raspberry PI Model B, while the Heltec LoRa 32 board acted as the end-node in the network. The integration of these devices was carried out on The Things Network application server. Full coverage simulation of *gateways* LoRaWAN in Campo Mourão was conducted, indicating that 7 *gateways* in public buildings could cover the entire municipality. In the field, information on energy consumption and channel behavior was collected. The propagation test showed that data transmission was successful at 949 meters, with the *gateway* receiving 77.6% of the packets sent by the *endpoint*. Data on the energy consumption of devices used in the propagation test show that a network covering the entire municipality would represent 0.19% of the energy consumption of the public lighting system. Energy efficiency in public lighting systems is crucial for smart cities, emphasizing the importance of replacing old technologies with LED bulbs and implementing intelligent management systems. The work highlights a significant opportunity for projects focused on energy efficiency, contributing to sustainable and efficient goals in smart cities.

Keywords: lorawan; internet of things; telecommunication; energy efficiency; smart cities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação distância X taxa de dados de arquiteturas usadas na comunicação sem fio	20
Figura 2 – Variação do fator de espalhamento em relação ao plano Largura de Banda x Tempo	21
Figura 3 – Sequência de <i>Chirps</i> característicos da modulação Longo Alcance, do inglês <i>Long Range</i> (LoRa)	22
Figura 4 – Ganhos e atenuações do sinal transmitido até chegar ao receptor	22
Figura 5 – Janelas de comunicação entre dispositivos classe A	23
Figura 6 – Janelas de comunicação entre dispositivos classe B	23
Figura 7 – Janelas de comunicação entre dispositivos classe C	24
Figura 8 – A camada física de modulação LoRa, a camada Controle de Acesso Médio, do inglês <i>Medium Access Control</i> (MAC) da pilha de protocolos Rede de Área Ampla de Longo Alcance, do inglês, <i>Long Range Wide Area Network</i> (LoRaWAN), e a camada de aplicações.	24
Figura 9 – Arquitetura LoRaWAN com criptografia em dois níveis	25
Figura 10 – Esquema de integração do módulo RHF0M301 e Raspberry Pi 3	29
Figura 11 – RHF0M301 integrado a uma Raspberry Pi 3	29
Figura 12 – Fluxograma com a configuração da Raspberry PI como estação base de um <i>gateway</i> LoRaWAN	30
Figura 13 – Fluxograma representando o código embarcado no <i>endpoint</i>	31
Figura 14 – Fluxograma representando o código de filtragem do json	31
Figura 15 – Parâmetros de entrada no <i>software</i>	32
Figura 16 – Interfaceamento entre o modulo INA219 e o Arduino Uno (HARDWARE)	33
Figura 17 – Simulação usando parâmetros característicos da modulação LoRa com antena do <i>gateway</i> a 3 metros do solo	35
Figura 18 – Simulação usando parâmetros característicos da modulação LoRa com antena do <i>gateway</i> a 5 metros do solo	35
Figura 19 – Status da estação base confirmando a conexão do gateway com o servidor TTN	36

Figura 20 – Painel de detalhamento de informações no <i>gateway</i> - Plataforma <i>The Things Network</i> (TTN)	36
Figura 21 – Painel detalhado com informações do <i>gateway</i>	37
Figura 22 – Monitor Serial com informações sobre a execução do código	37
Figura 23 – Informações no TTN durante a transmissão de pacotes entre o <i>endpoint</i> e o <i>gateway</i>	38
Figura 24 – Trecho de arquivo json gerado pela plataforma TTN, destacando informações como Largura de Banda, do inglês <i>Bandwidth</i> (BW), Fator de Espalhamento, do inglês <i>Spreading Factor</i> (SF), Taxa de Código, do inglês <i>Code Rate</i> (CR), Indicação da Intensidade do Sinal Recebido , do inglês <i>Received Signal Strength Indication</i> (RSSI) e Relação Sinal Ruído, do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i> (SNR)	38
Figura 25 – <i>Gateway</i> em funcionamento na UTFPR	39
Figura 26 – Heltec LoRa 32 alimentado por uma bateria a 2,1 metros (m) do solo . .	39
Figura 27 – Visão a partir do poste onde foi fixado o <i>endpoint</i> em direção ao <i>gateway</i> localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) no dia da transmissão	40
Figura 28 – Raio de transmissão	40
Figura 29 – Análise dos pacotes transmitidos	41
Figura 30 – <i>Status</i> de cada pacote enviado durante a transmissão em relação ao tempo	41
Figura 31 – Indicador de intensidade do sinal recebido de cada pacote durante a transmissão	42
Figura 32 – Tensão média demandada pelos dispositivos durante a transmissão . .	42
Figura 33 – Consumo médio de corrente pelos dispositivos Raspberry PI 3, RHF0M301 e Heltec LoRa 32 em relação ao tempo	43
Figura 34 – Consumo de corrente do dispositivo <i>Heltec LoRa 32</i> evidenciando a implementação da função de hibernação, característico da Classe A . .	43
Figura 35 – Potência média consumida pelos dispositivos	44
Figura 36 – Dados sobre o Sistema de Iluminação Pública de Campo Mourão	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de tecnologias de comunicação sem fio	20
Tabela 2 – Tabela com informações sobre o consumo dos dispositivos usados na arquitetura da rede	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

dBm	Decibel miliwatt
kb/s	Quilobits por segundo
kHz	Quilohertz
km	Quilômetros
mA	miliamper
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Megahertz
mV	milivolt
mW	miliwatt
V	Volt
W	Watt

Siglas

AES	Padrão de Criptografia Avançada, do inglês <i>Advanced Encryption Standard</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
API	Interface de Programação de Aplicativo, do inglês <i>Application Programming Interface</i>
AppSKey	Chave de Sessão de Aplicativo, do inglês <i>Application Session Key</i>
BW	Largura de Banda, do inglês <i>Bandwidth</i>
CR	Taxa de Código, do inglês <i>Code Rate</i>
CRC	Verificação Cíclica de Redundância, do inglês <i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	Espectro Espalhado Chirp, do inglês <i>Chirp Spread Spectrum</i>
CSV	Valores Separados por Vírgula, do inglês <i>Comma-Separated Values</i>
GND	Terra, do inglês, <i>Ground</i>

GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis, do inglês <i>Global System for Mobile</i>
I2C	Circuito Interintegrado, do inglês <i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
IP	Internet Protocol
json	Notação para Objeto em JavaScript, do inglês <i>JavaScript Object Notation</i>
LED	Diodo Emissor de Luz, do inglês <i>Light-Emitting Diode</i>
LoRa	Longo Alcance, do inglês <i>Long Range</i>
LoRaWAN	Rede de Área Ampla de Longo Alcance, do inglês, <i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	Rede de Longa Distância de Baixa Potência, do inglês <i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE-M	Evolução a Longo Prazo para Máquinas, do inglês <i>Long Term Evolution for Machines</i>
m	metros
MAC	Controle de Acesso Médio, do inglês <i>Medium Access Control</i>
mAh	mili-Âmpere / hora
NB-IoT	Banda Estreita para Internet das Coisas do inglês, <i>Narrowband Internet of Things</i>
RFID	Identificação por Radio Frequência, do inglês <i>Radio Frequency Identification</i>
RSSI	Indicação da Intensidade do Sinal Recebido , do inglês <i>Received Signal Strength Indication</i>
SCL	Sinal de Clock, do inglês, <i>Serial Clock</i>
SDA	Sinal de Dados, do inglês, <i>Serial Data</i>
SF	Fator de Espalhamento, do inglês <i>Spreading Factor</i>
SIP	Sistema Iluminação Pública
SNR	Relação Sinal Ruído, do inglês <i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SPI	Interface Periférica Serial, do inglês <i>Serial Peripheral Interface</i>
SSH	<i>Secure Shell</i>
TCP	Protocolo de Controle de Transmissão, do inglês, <i>Transmission Control Protocol</i>

TTN	<i>The Things Network</i>
US\$	Dólar
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
W	Watt
Wi-Fi	Rede Sem Fio, do inglês, <i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	Justificativa	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Cidades inteligentes e internet das coisas	18
2.2	Tecnologias de infraestrutura de rede	18
2.3	LoRa / LoRaWAN	20
2.4	Trabalhos relacionados	25
2.5	Legislação	26
2.6	The Things Network	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	<i>Gateway e Endpoint: Uma Abordagem Prática</i>	28
3.1.1	<i>Gateway, Servidor de Rede e Servidor de Aplicação</i>	28
3.1.2	<i>Endpoint e filtro de dados</i>	30
3.2	Diagrama de irradiação, Dados sobre o Sistema Iluminação Pública (SIP) e consumo energético	32
4	RESULTADOS	34
4.1	Simulação de propagação de <i>gateways</i> LoRaWAN	34
4.2	Sistema de Comunicação	36
4.3	Validação em Campo e Cobertura do Sistema de Comunicação	39
4.4	Consumo energético dos dispositivos	42
4.5	Dados sobre o consumo energético SIP de Campo Mourão	44
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A CÓDIGO EMBARCADO NO HELTEC LORA 32	55

APÊNDICE B REPOSITÓRIO CONTENDO OS ARQUIVOS DE CON- FIGURAÇÃO E FILTRAGEM DE DADOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO	63
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

A crise energética desencadeada por fatores políticos, econômicos e ambientais pode ter consequências significativas para um país, como destacado por Campos (2021). No Brasil, que possui uma matriz energética dominada por hidroelétricas, a falta de diversificação é um fator influenciador importante. Cerca de 85% das fontes de energia são renováveis, com 65,2% provenientes de usinas hidrelétricas, em contraste com a média global de apenas 16,1%. Essa dependência nas hidroelétricas torna o país vulnerável a eventos climáticos adversos, como a escassez de chuvas, que tem afetado regiões como o estado do Paraná, onde 93% da energia provém dessa fonte (Energetica, 2021).

Diante desses desafios na produção de energia elétrica, a adoção de práticas eficientes no uso da energia surge como um conceito recente e promissor. Essas práticas eficientes não apenas reduzem custos de produção, mas também desempenham um papel crucial na diminuição da probabilidade de futuras crises energéticas. Governos em todo o mundo têm se atentado às recomendações de órgãos internacionais para o uso mais eficiente da energia elétrica, reconhecendo a necessidade de preservar os recursos naturais e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Junior, 2017).

A gestão da iluminação pública nas cidades representa um dos desafios mais significativos para as autoridades devido ao alto consumo de energia envolvido, encontrar o equilíbrio entre esse consumo e a garantia de uma iluminação eficiente e segura é de suma importância. Além de contribuir para o bem-estar e a segurança das pessoas, a iluminação pública desempenha um papel crucial na promoção do turismo, no estímulo ao comércio noturno e na melhoria da infraestrutura urbana, impulsionando o desenvolvimento social (Neto, 2016).

O Sistema Iluminação Pública é responsável por aproximadamente 4,5% da demanda nacional de energia elétrica no Brasil, e representa 3% do consumo total do país, com cerca de 14,8 milhões de pontos de luz em todo o território nacional (Pacheco, 2018). Contudo, é grande o espaço que o setor abre para propostas de eficiência energética. Como por exemplo, a troca da tecnologia empregada nas lâmpadas e a integração do sistema com tecnologias Internet das Coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), que podem contribuir significativamente para a redução do consumo de energia e para a melhoria da qualidade de vida das pessoas.

A utilização de tecnologias de iluminação inteligente, proporciona a otimização no consumo de energia elétrica. Isso ocorre através do ajuste da intensidade luminosa em conformidade com a demanda e a presença de pessoas, bem como da detecção de eventuais falhas no sistema, permitindo manutenções efetivas e assertivas dos equipamentos. Além disso, o uso de tecnologias contemporâneas e eficientes demanda menos potência, uma vez que elas utilizam a energia elétrica de maneira mais eficaz (Neto, 2016).

Um estudo sugere a substituição das lâmpadas de vapor de mercúrio e sódio por lâmpadas de Diodo Emissor de Luz, do inglês *Light-Emitting Diode* (LED), o que reduziria o consumo de energia em 53% na iluminação pública de Varginha - MG, com retorno do investimento em

cerca de 4 anos, equivalente ao consumo de 4.000 residências (Pereira, 2021). Jagadeesh *et al.* (2015) desenvolveu um sistema com sensores infravermelhos para controlar a iluminação, economizando energia em momentos de baixa movimentação, enquanto Salgado (2019) implementou uma central de comando remota com arquitetura Rede de Área Ampla de Longo Alcance, do inglês, *Long Range Wide Area Network*, substituindo a antiga arquitetura Sistema Global para Comunicações Móveis, do inglês *Global System for Mobile* (GSM) em um sistema de gerenciamento de iluminação pública, reduzindo custos operacionais e aumentando a competitividade. Além disso, Andrez, Hodgson e Krauss (2022) destacam a tecnologia LoRaWAN, enfatizando sua transmissão sem fio de longa distância, baixo consumo de energia e aplicações em IoT e cidades inteligentes, abordando questões de segurança e escalabilidade, e incluindo uma simulação do diagrama de irradiação de *gateways* LoRaWAN em Campo Mourão, PR.

Com isso, é notável que a tecnologia LoRaWAN apresenta-se como solução inovadora para o gerenciamento de iluminação pública. Os sensores nas luminárias ajustam a iluminação com base na presença de pessoas e veículos, economizando energia e reduzindo a poluição luminosa. O monitoramento contínuo das condições das luminárias possibilita a manutenção preventiva e reduz o tempo de inatividade (Jagadeesh *et al.*, 2015). Além do controle remoto das luzes de rua, sua rede pode transportar diversas informações, como monitoramento ambiental, gestão de tráfego e rastreamento de ativos urbanos (Semtech, 2019).

Este trabalho tem como objetivo simular um diagrama de irradiação que possibilite a cobertura total do município de Campo Mourão com o menor número de *gateways* possíveis, utilizando prédios públicos como pontos de acesso. A partir dessa simulação, será construída uma rede LoRaWAN, com *gateway* e *endpoint*, e validada com uma transmissão entre o *gateway*, localizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Campo Mourão e um poste localizado a cerca de 950 metros com a antena a 2,1 metros de altura.

Além disso, serão coletados dados sobre o canal, como Indicação da Intensidade do Sinal Recebido, do inglês *Received Signal Strength Indication* e perda de pacotes, para avaliar o desempenho da rede. Além do consumo energético dos dispositivos, para validar o baixo consumo característico da tecnologia. Com os resultados obtidos, será possível avaliar a viabilidade da utilização dessa tecnologia em ambientes reais, bem como identificar possíveis desafios e oportunidades para o seu aprimoramento, visando soluções mais eficientes e sustentáveis.

1.1 Objetivos

LoRa se destaca como uma das principais arquiteturas de redes IoT em todo o mundo. Por meio da construção deste trabalho, busca-se compreender o seu funcionamento e o processo de criação dos membros da rede, com vista a assimilar tanto a tecnologia em si quanto o assunto de redes de comunicação sem fio. Ademais, este trabalho tem como propósito abordar questões relacionadas à sustentabilidade, tais como o impacto ambiental e a eficiência energética associados ao uso da tecnologia LoRaWAN.

Por fim, objetiva-se apresentar dados sobre os gastos do SIP de Campo Mourão, uma vez que a tecnologia LoRaWAN pode ser aplicada em soluções que possam minimizar os impactos negativos ao meio ambiente e otimizar a utilização de energia. Espera-se assim, contribuir para o avanço da tecnologia LoRa no Brasil, por meio da oferta de informações relevantes que possam ser aplicadas na prática.

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo propor um estudo de viabilidade técnica de uma rede de modulação LoRa e a pilha de protocolos LoRaWAN para o município de Campo Mourão para o controle da iluminação pública focado na eficiência energética.

1.1.2 Objetivos específicos

A seguir, apresentam-se as metas definidas para desenvolvimento no escopo deste trabalho:

- Levantar dados sobre o SIP do município de Campo Mourão para compreender as demandas locais de comunicação de dados.
- Apresentar informações sobre a modulação LoRa e o protocolo LoRaWAN para fundamentar o estudo.
- Simular um diagrama de irradiação com parâmetros da tecnologia para encontrar a cobertura completa do município com o menor número de *gateways*, utilizando prédios públicos como suporte.
- Integrar um módulo RHF0M301 e uma placa de desenvolvimento Raspberry PI 3 para construir um servidor de rede que faça o controle de acesso ao meio, concentre os dados do *endpoint* e transmita via protocolo TCP/IP para o servidor de aplicação.
- Adaptar o protocolo LoRaWAN Classe A em uma placa de desenvolvimento HELTEC LoRa 32 V2 que se comunique com o *gateway* criado.
- Criar um servidor de aplicação no console *The Things Network* para integração dos dispositivos da arquitetura.
- Transmissão e obtenção de informações sobre a transmissão, tais como Indicação da Intensidade do Sinal Recebido , do inglês *Received Signal Strength Indication* e perda de pacotes.

- Estipular o consumo energético de uma rede que cobrisse o município, utilizando cada poste como um nó da rede e o número mínimo de *gateways* necessários para cobrir os nós, retornado pela simulação.

1.2 Justificativa

A urbanização crescente e a crescente demanda de energia nas cidades são um grande desafio para enfrentar o aumento do consumo de combustíveis fósseis e o desequilíbrio no consumo de energia causado pela sobrecarga das usinas locais. Um setor que merece maior atenção é o de iluminação pública, que representa 3% do consumo total de energia elétrica no Brasil e 4,5% da demanda nacional. Embora o setor seja responsável por uma quantidade significativa de energia consumida, muitas vezes não recebe a devida atenção (Neto, 2016).

No entanto, há empresas e pesquisas acadêmicas voltadas à gestão e implantação de tecnologias modernas no SIP, como a substituição de lâmpadas de vapor de sódio e vapor de mercúrio por lâmpadas de LED, que podem reduzir a potência gasta pelo sistema em até 53% (Pereira, 2021). Também há tecnologias como sensores infravermelhos para detectar o fluxo nas vias e controlar a iluminação (Jagadeesh *et al.*, 2015), e a troca da tecnologia GSM de comunicação de uma rede de controle de iluminação pública pela tecnologia LoRa, que reduz o valor gasto com a infraestrutura da rede (Salgado, 2019).

As cidades têm investido cada vez mais em tecnologias para se tornarem inteligentes e empregam tecnologias da informação e comunicação para melhorar vários aspectos de operação e gestão da cidade, como economia local, transporte, gestão do tráfego, meio ambiente e qualidade de vida para os cidadãos (Li; Zhu; Wang, 2017). Cidades inteligentes estão associadas com um sistema de dispositivos conectados a uma rede que compartilha informações independentemente da interação humana. A comunicação geralmente é realizada por tecnologias sem fio, como Rede Sem Fio, do inglês, *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), Bluetooth, ZigBee, LoRa, SigFox, GSM ou Identificação por Radio Frequência, do inglês *Radio Frequency Identification* (RFID) (Research, 2020).

Além disso, a implementação de sistemas de iluminação pública inteligente pode trazer benefícios significativos para as cidades. Com o uso de sensores e tecnologias de IoT, é possível monitorar o consumo de energia em tempo real e ajustar a iluminação de acordo com a demanda. Os sensores podem detectar a presença de pessoas e veículos nas ruas, permitindo que a iluminação seja ajustada de forma dinâmica para melhorar a segurança e economizar energia.

Portanto, o gerenciamento de consumo de energia por zonas supera o gerenciamento individual em diversos aspectos. Ao possibilitar o controle centralizado, a adaptação conforme as necessidades, a detecção de falhas, a economia de energia, e a integração com outros sistemas, essa abordagem não apenas otimiza a utilização de recursos e reduz custos, mas

também contribui para alcançar metas de sustentabilidade e melhorar a qualidade de vida nas cidades.

A adoção de tecnologias de iluminação pública inteligente pode ajudar a reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa nas cidades, contribuindo para a luta contra as mudanças climáticas. Por fim, essas tecnologias podem melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, tornando as ruas mais seguras e confortáveis durante a noite.

No entanto, é importante destacar que a implantação de sistemas de iluminação pública inteligente deve ser realizada de forma cuidadosa e planejada, considerando aspectos como a privacidade dos dados e a segurança das redes. A coleta de dados de sensores deve ser realizada de forma responsável e de acordo com as leis e regulamentações de privacidade de dados e uso do espectro de frequência em vigor. Em resumo, a adoção de tecnologias de iluminação pública inteligente pode trazer benefícios significativos para as cidades, permitindo a redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa, além de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa estão aumentando anualmente, principalmente devido ao consumo excessivo de energia proveniente de combustíveis fósseis (Agency, 2019) (Bernades; Celeste; Chaves, 2020). O uso de tecnologias de eficiência energética na gestão da iluminação pública pode ser uma solução eficaz para reduzir o consumo de energia e minimizar os impactos das mudanças climáticas globais.

2.1 Cidades inteligentes e internet das coisas

É esperado para a próxima década que a IoT movimente US\$ 19 trilhões no mundo, sendo a América Latina responsável por US\$ 860 bilhões e o Brasil responsável por US\$ 352 bilhões (Lino, 2019). A IoT é vista como uma evolução da internet, permitindo que tudo o que possa ser controlado remotamente seja integrado à rede das coisas, geralmente usando sensores para reconhecer eventos e realizar tarefas cotidianas sem intervenção humana (Oliveira; Conceição; Neto, 2018).

Até 2050, espera-se que 66% da população global resida em regiões urbanas. Para lidar eficientemente com o crescimento da urbanização, muitos países propuseram o conceito de cidades inteligentes para gerenciar efetivamente os recursos e otimizar o consumo de energia (Ullah *et al.*, 2020). O desafio será fornecer a essas populações recursos como energia suficiente, água limpa e alimentos seguros, ao mesmo tempo em que garantem total sustentabilidade econômica, social e ambiental (Lai *et al.*, 2020)

As cidades sempre serviram como *hubs* que possibilitam processos de comunicação e intercâmbio entre os diversos membros da sociedade. O desenvolvimento de processos autônomos usando microcontroladores e arquiteturas de comunicação sem fio torna esses processos mais inteligentes (Zhuhadar *et al.*, 2017).

2.2 Tecnologias de infraestrutura de rede

Conforme estima-se que até meados de 2023 o número de dispositivos conectados a uma rede IoT ultrapasse os 15 bilhões, vários tipos de tecnologias se propõe a serem usadas na infraestrutura da rede, geralmente tecnologias sem fio (Ratliff, 2019). Para redes que necessitam de curtas distâncias de transmissão, são utilizadas tecnologias como Bluetooth, RFID e Wi-Fi, enquanto em redes com maior distância de transmissão, tais como uma cidade ou parte dela, foram desenvolvidas as tecnologias Rede de Longa Distância de Baixa Potência, do inglês *Low Power Wide Area Network* (LPWAN).

Exemplos dessas tecnologias são o Banda Estreita para Internet das Coisas do inglês, *Narrowband Internet of Things* (NB-IoT), Sigfox e LoRa, que buscam conectar bilhões de dis-

positivos e possuem regulamentação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). A tecnologia LPWAN é caracterizada por um custo menor em comparação com aplicações de redes móveis que utilizam o espectro licenciado. Essa tecnologia tem grande potencial para expandir a IoT, especialmente em locais remotos e com recursos limitados (Ratliff, 2019), (Ayoub *et al.*, 2019).

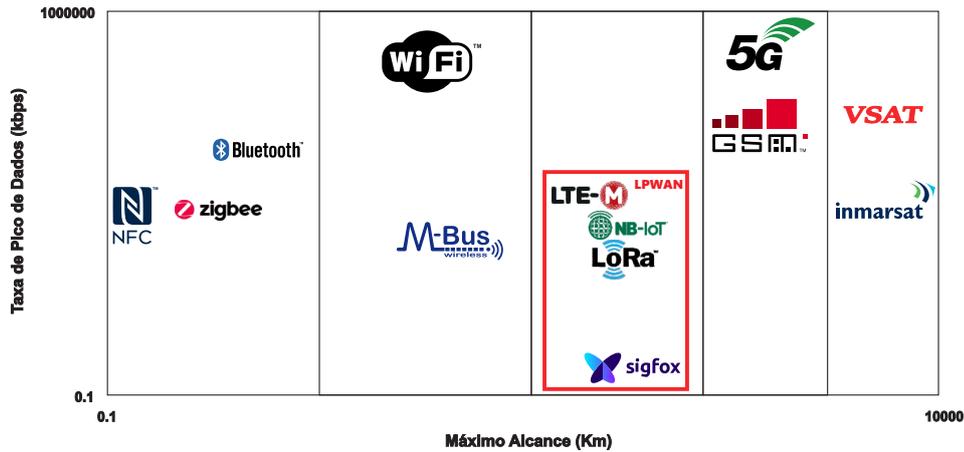
NB-IoT é uma LPWAN e foi desenvolvida para viabilizar a aplicação da IoT em modelos de larga escala, onde tecnologias como Wi-Fi ou GSM não funcionam de uma forma satisfatória, como espaços muito fechados e na área rural. Outra vantagem da rede NB-IoT é a duração da bateria, onde os dispositivos embarcados com a rede podem ter uma vida útil de 10 anos. No Brasil, a NB-IoT e a Evolução a Longo Prazo para Máquinas, do inglês *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) são redes que estão se popularizando entre empresas de vários setores, em especial o agronegócio (Embratel, 2019).

A tecnologia LTE-M é uma solução de rede LPWAN projetada especificamente para atender às demandas da IoT. Ela é ideal para conectar dispositivos com recursos limitados à internet e para transmitir pequenas quantidades de dados por longos períodos de tempo (AVSystem, 2020). O uso de faixas de frequências licenciadas implica em custos operacionais a serem pagos às operadoras de telefonia. No entanto, a transmissão de longo alcance e baixa potência, que alcança distâncias de até 100 km, aliada à longa vida útil da bateria e uma taxa de transmissão de até 1 Mbps, tornam essa tecnologia viável para diversas aplicações (Ayoub *et al.*, 2019).

Sigfox é uma operadora de rede LPWAN, criada em 2010 na França. A empresa oferece soluções tecnológicas para IoT de ponta a ponta. A Sigfox oferece uma solução de comunicação baseada em *software*, onde toda a complexidade da rede e de computação é gerenciada em nuvem, reduzindo o consumo de energia e os custos associados (SIGFOX, 2022). É caracterizado por usar de maneira ótima a potência disponível para transmissão, a comunicação é confiável para longas distâncias, independente de interferências ou ruídos no canal (SIGFOX, 2022). Porém pela estreita Largura de Banda, do inglês *Bandwidth*, o tamanho da mensagem a ser enviada se limita a 12 *bytes uplink* por mensagem, e devido aos regulamentos de ocupação da banda pública, o número de mensagens por dispositivo é limitado em 140 mensagens *uplink* e 4 mensagens *downlink* de 8 *bytes* por dia (SIGFOX, 2017).

A Figura 1 mostra de forma gráfica as características de algumas tecnologias utilizadas na comunicação sem fio, onde o eixo x está representado pelo máximo alcance da transmissão e o eixo y pela taxa de pico de dados, divididos em 5 setores, sendo da esquerda para direita, sem fio de curto alcance, sem fio de médio alcance, LPWAN, celular e satélite. A Tabela 1 apresenta informações como a distancia de transmissão, taxa de dados e consumo energético das tecnologias de comunicação sem fio ilustradas na Figura 1, obtido a partir de (Alecrim, 2012), (Teleco, 2012), (Alecrim, 2023), (Freitas, 2014), (Braga, 2023), (Teleco, 2018).

Figura 1 – Relação distância X taxa de dados de arquiteturas usadas na comunicação sem fio



Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

Tabela 1 – Características de tecnologias de comunicação sem fio

Tecnologia	Distância transmissão (m)	Taxa de dados (Mbps)	Consumo energético
NFC	0,1	0,106 - 0,424	Baixo
ZigBee	10 - 100	0,02 - 0,250	Muito baixo
Bluetooth	100	2,1 - 50	Baixo a Médio
WiFi	100 - 300	11	Médio - Alto
M-Bus	30 - 100	0,115 - 100	Baixo - Médio
GSM	10000	0.096 - 1000	Médio - Alto
VSAT	50 - 100	0,04 - 4	Alto
Inmarsat	Global	0,2 - 464	Alto

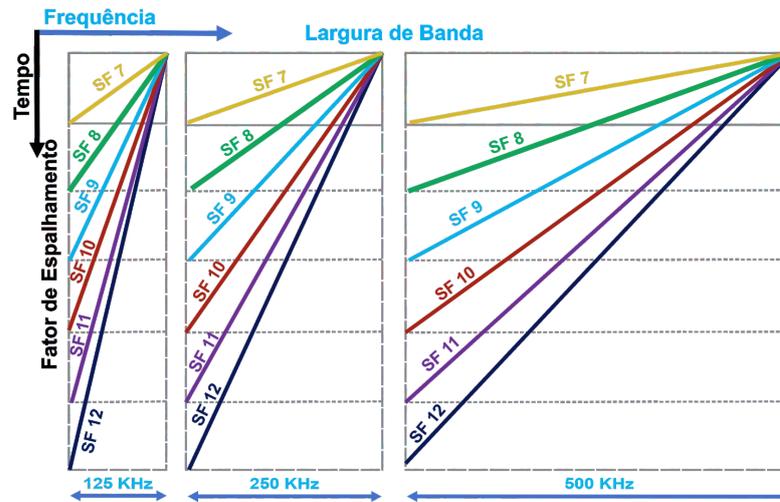
Fonte: Autoria Própria (2023).

2.3 LoRa / LoRaWAN

A tecnologia LoRa, desenvolvida pela Semtech, é uma camada puramente física que usa a modulação por espalhamento espectral Espectro Espalhado Chirp, do inglês *Chirp Spread Spectrum* (CSS) para transmitir dados com longo alcance entre sensores e *gateways*. Essa técnica permite uma comunicação robusta a interferências em longas distâncias e com diferentes taxas de dados, e com isso tem aplicações em setores como a comunicação militar (Alliance, 2017).

Uma das características da modulação LoRa, é ter a possibilidade de variar o Fator de Espalhamento, do inglês *Spreading Factor* de 7 a 12, onde o SF12 é usado para maiores distâncias, pois fica mais tempo no ar durante a transmissão. Em contraste, SF7, valor padrão, fica menos tempo no ar e pode transmitir uma maior taxa de dados. A Figura 2 ilustra como se comporta o sinal no tempo com diferentes SF, em diferentes BW. Quanto maior o valor do SF, mais larga é a BW do sinal LoRa. Isso significa que ele se espalha por uma faixa de frequência maior, tornando-o menos suscetível a interferências, mas também reduzindo a taxa de dados (Semtech, 2019).

Figura 2 – Variação do fator de espalhamento em relação ao plano Largura de Banda x Tempo



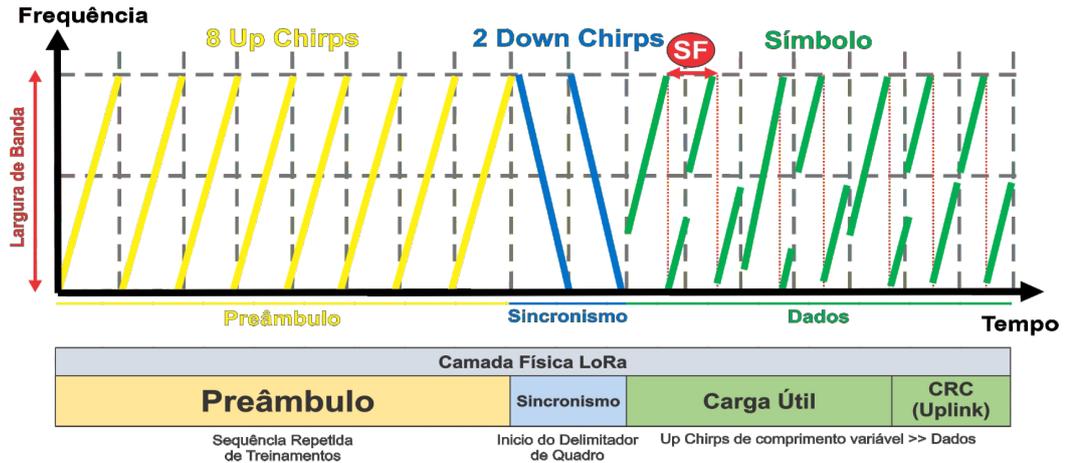
Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio que oferece uma conexão confiável através da codificação com *bits* de paridade, o que permite que o receptor detecte e corrija erros durante a transmissão. Essa codificação é realizada ao variar o Taxa de Código, do inglês *Code Rate*, que pode ser escolhido entre 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8. Taxas de código mais altas como 4/8, significam uma maior quantidade de bits redundantes e, portanto, uma maior capacidade de correção de erros, mas também resultam em uma taxa de transmissão de dados mais lenta. Além disso, é possível variar atributos como o SF, BW (125 Quilohertz (kHz), 250 kHz e 500 kHz), frequência e comprimento do preâmbulo, tornando o LoRa adequado para diversas aplicações, desde a IoT até sistemas de comunicação de longa distância (Alliance, 2017).

A sequência do quadro de mensagens LoRa, mostrados Figura 3, consiste em preâmbulo, *bits* de sincronização e *payload*. O preâmbulo é composto por oito *chirps* para cima e é seguido por dois *chirps* para baixo, chamados símbolos de sincronização. Qualquer *gateway* LoRa pode reconhecer esse preâmbulo como o início da transmissão do pacote. A transmissão de dados real começa após o símbolo de sincronização e finaliza com a Verificação Cíclica de Redundância, do inglês *Cyclic Redundancy Check* (CRC), que é responsável por verificar a integridade dos dados (Alliance, 2017).

A função dos *bits* de sincronismo é indicar ao receptor que uma transmissão LoRa está prestes a ocorrer, assim permite que o receptor sincronize seus circuitos de recepção para começar a capturar a mensagem principal. A eficiência de *link* é praticamente a mesma da SigFox, com quantidade ilimitada de mensagens, velocidade de até 50 kb/s, grande cobertura, baixo consumo de energia e frequência não licenciada. É uma opção para transmissão de dados de sensores em ambientes industriais e monitoramento de tráfego em áreas urbanas. LoRa é uma tecnologia sem fio eficiente e versátil que atende às necessidades de diversos setores e indústrias (Alliance, 2017).

Figura 3 – Sequência de Chirps característicos da modulação LoRa

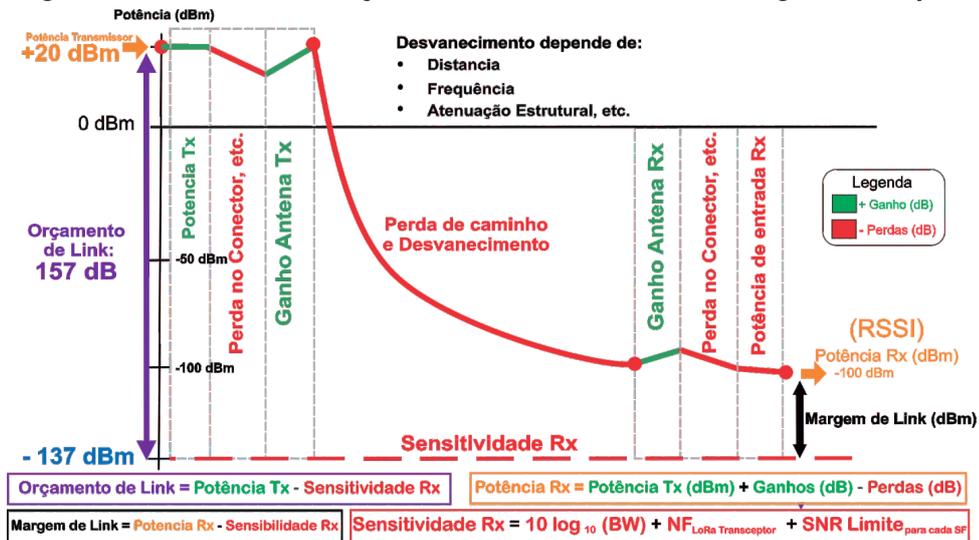


Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

A faixa de cobertura LoRa depende de diversos fatores, incluindo a presença de obstruções e a densidade urbana, que podem afetar a perda de percurso e a Relação Sinal Ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*. O cálculo do *Link Budget* visa garantir que o sinal recebido pelo gateway seja forte o suficiente para que os dados sejam decodificados com precisão, mesmo em ambientes com interferência ou obstáculos. Se a margem de sinal for insuficiente, a comunicação pode ser afetada e os dados podem ser perdidos. (Semtech, 2019).

A Figura 4 ilustra como um sinal se comporta do transmissor ao receptor, com os ganhos e atenuações variando de acordo com diferentes configurações de transmissão e o local da transmissão. LoRa é uma tecnologia eficiente para diversas aplicações, mas a cobertura pode ser afetada por diferentes fatores, como distância, vegetação, multi-percursos, entre outros.

Figura 4 – Ganhos e atenuações do sinal transmitido até chegar ao receptor

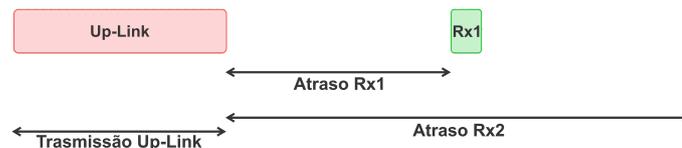


Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

Conseqüentemente, LoRaWAN é a camada MAC do LoRa, um padrão de código aberto tipo estrela especificado pela LoRa Alliance, uma associação aberta e sem fins lucrativos. LoRaWAN opera em bandas de frequência não licenciada, o que significa que o cliente não paga nenhuma taxa pela utilização da rede. O protocolo LoRaWAN prevê três classes de implementação para atender a diferentes aplicações de dispositivos finais, sendo a Classe A a implementação abordada neste trabalho (Alliance, 2017).

- Classe A é um padrão LoRaWAN que permite comunicação assíncrona bidirecional, suportado por todos os dispositivos finais LoRaWAN. O dispositivo final sempre inicia a comunicação e pode enviar transmissões *uplink* a qualquer momento, com duas janelas de *downlink* abertas para uma resposta do servidor. O servidor pode responder durante a primeira ou segunda janela de recebimento, mas não ambas. O dispositivo entra em modo de baixa potência quando não está transmitindo, tornando a Classe A o modo de operação mais eficiente em termos de energia. Este padrão é amplamente utilizado devido à sua flexibilidade e suporte universal (Alliance, 2017). O funcionamento de dispositivos Classe A pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Janelas de comunicação entre dispositivos classe A



Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

- Classe B é um modo de operação em que os dispositivos LoRaWAN são sincronizados com a rede usando sinalizadores periódicos, permitindo comunicações *downlink* em horários agendados. Além das janelas de recebimento da Classe A, a Classe B fornece uma latência determinística para as comunicações *downlink*, mas com um consumo adicional de energia no dispositivo final. A latência é programável e pode chegar a 128 segundos para atender a diferentes aplicações, e o consumo adicional de energia é baixo o suficiente para ser válido em aplicações alimentadas por bateria (Alliance, 2017). O funcionamento de dispositivos Classe B pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Janelas de comunicação entre dispositivos classe B



Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

- Classe C reduz ainda mais a latência no *downlink*, mantendo o canal de comunicação do dispositivo final com o *gateway* aberto em todos os momentos em que o dispositivo

não está transmitindo. Com base nisso, o servidor de rede pode iniciar uma transmissão de *downlink* a qualquer momento, supondo que o receptor do dispositivo final esteja aberto, portanto, sem latência. A Classe C é adequada para aplicações onde a energia fornecida é constante (Alliance, 2017). O funcionamento de dispositivos Classe C pode ser visto na Figura 7.

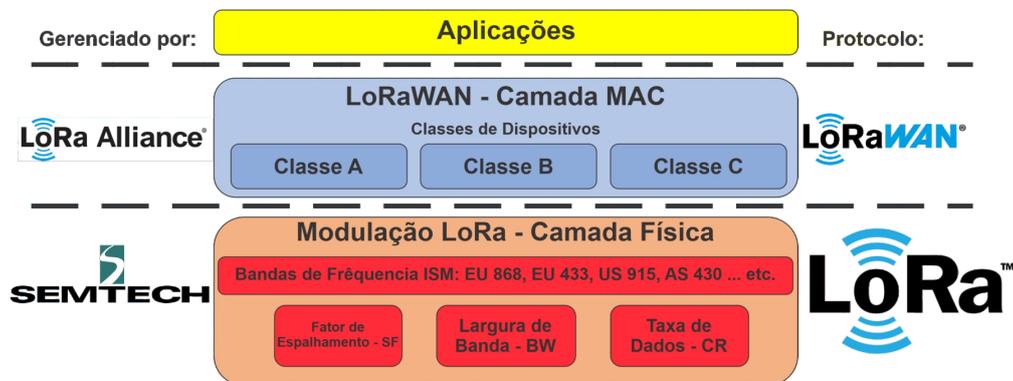
Figura 7 – Janelas de comunicação entre dispositivos classe C



Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

A Figura 8 mostra as camadas que englobam a tecnologia LoRa. A Camada Física é responsável pela transmissão e recepção de sinais de rádio entre os dispositivos IoT e a rede LoRaWAN, além de definir a forma como os dados são modulados e transmitidos no ar. A camada MAC gerencia o acesso ao canal de rádio compartilhado e garante que os dispositivos IoT possam enviar e receber dados de forma confiável. Por conseguinte, a camada MAC define as regras para o controle de acesso ao meio, a estrutura da mensagem, o processo de envio e recebimento de dados, além de mecanismos para garantir a segurança dos dados. A Camada de Aplicação é a camada mais alta do protocolo LoRaWAN e fornece uma interface padronizada para as aplicações que desejam enviar e receber dados através da rede LoRaWAN. A camada de aplicação define os formatos de mensagem, as regras de segurança e os métodos de autenticação para garantir a confidencialidade, integridade e autenticidade dos dados transmitidos (Semtech, 2019).

Figura 8 – A camada física de modulação LoRa, a camada MAC da pilha de protocolos LoRaWAN, e a camada de aplicações.

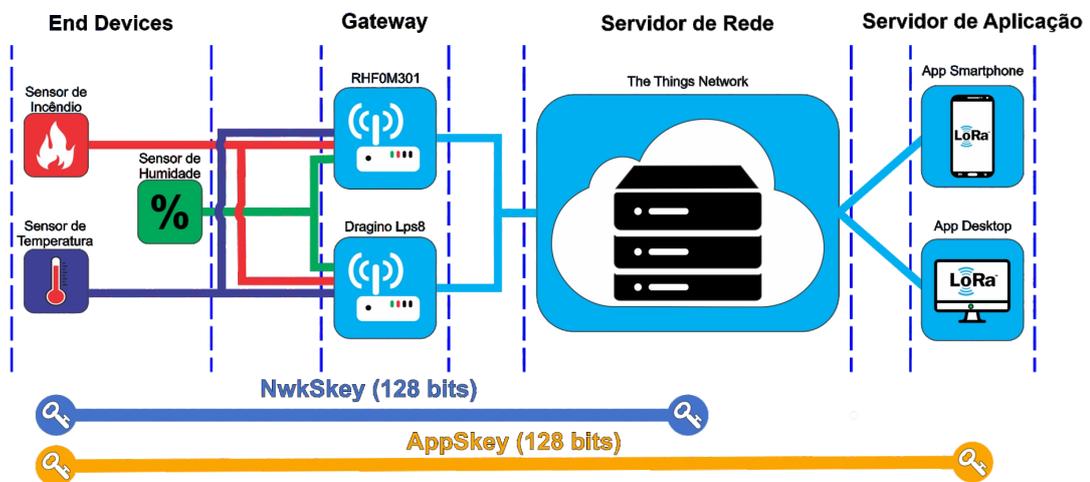


Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

A Figura 9 ilustra a arquitetura LoRaWAN e seus níveis criptográficos. A criptografia é feita com o código Padrão de Criptografia Avançada, do inglês *Advanced Encryption Standard*

(AES) de 128 *bits*, e os dados são criptografados com uma chave conhecida como Chave de Sessão de Aplicativo, do inglês *Application Session Key* (AppSKey). Somente o servidor de aplicação possui essa chave, o que garante que apenas ele seja capaz de decifrar e extrair os dados transmitidos. O servidor de rede faz uma nova verificação para certificar se o pacote recebido não foi alterado durante a transmissão. É importante destacar que o servidor de rede não tem acesso à AppSKey, e portanto, não é capaz de abrir os dados transmitidos. Ele pode apenas conferir a integridade do pacote recebido para garantir que ele não foi corrompido. Esse processo é importante para garantir a segurança e a privacidade dos dados transmitidos dentro da rede LoRaWAN (Chalacan, 2020).

Figura 9 – Arquitetura LoRaWAN com criptografia em dois níveis



Fonte: Adaptado de Chalacan (2020).

2.4 Trabalhos relacionados

Cruz e Ramos (2021) investigam o desempenho da tecnologia LoRa aplicada à robótica móvel. Como mostrado anteriormente, LoRa apresenta parâmetros alteráveis, que impactam em seu desempenho, e estes foram inicialmente avaliados para uma resposta prática e satisfatória, em termos de atrasos, distâncias e falhas nas mensagens. Após as avaliações adotou-se uma configuração para controle do robô que se mostrou satisfatória para a tarefa de tele operação. A configuração que atingiu o melhor resultado foi com $SF = 7$, $BW = 250$ kHz e $CR = 4/8$, principalmente pela baixa quantidade de erros retornados com a configuração.

Frederico *et al.* (2022) monitora a umidade do solo e transmite as informações obtidas usando protocolos LoRaWAN. O protótipo conta com sensores capacitivos para umidade do solo, sensores de umidade do ar e pressão atmosférica, e envia os dados a um servidor de rede, que encaminha as informações a uma plataforma de aplicação em nuvem para leitura do usuário.

Salgado (2019) substitui a tecnologia GSM de um sistema de comunicação e gestão de iluminação pública, pela pilha de protocolos LoRaWAN. Para isso, desenvolve uma interface de comunicação LoRa, considerando a limitação do tamanho das mensagens, a comunicação bidirecional, o número de transmissões e o número de dispositivos de iluminação presentes no SIP. Segundo o próprio autor, é um dos primeiros sistemas utilizando comunicação LoRaWAN Classe C.

Rossato e Camargo (2019) instalam e configuram uma rede LoRaWAN na UTFPR - Câmpus Toledo, integrando o *gateway* LoRaWAN a um servidor de rede e a um servidor de aplicação. Avaliam a rede utilizando dois dispositivos finais. Em suma, ao final do trabalho verificam que é possível cobrir grande parte da área urbana da cidade, além de obter um excelente desempenho na área rural do município, com a obtenção de comunicação em distâncias maiores que 30 km.

2.5 Legislação

A ANATEL é o órgão responsável pela regulamentação e fiscalização das emissões de radiofrequência no Brasil. Em 2017, a ANATEL publicou o Ato número 14.448, aprovando requisitos para avaliação da conformidade de equipamentos de comunicação que fazem uso da radiação restrita. Para a tecnologia LoRa considera-se a tecnologia de sequência direta, com uso das faixas de 902-907,5 Megahertz (MHz) e 915-928 MHz do espectro e potência máxima de 1 Watt (W) (Anatel, 2017b).

A Resolução 680 da ANATEL regulamenta as condições de uso de radiofrequências para sistemas de comunicação de radiação restrita no Brasil. A resolução define as faixas de frequência e estabelece parâmetros técnicos para comunicações de rádio. Fica a cargo do usuário respeitar esses parâmetros estabelecidos e operar em conformidade com as normas e regulamentações aplicáveis. A resolução é importante para garantir a operação segura e eficiente de sistemas de IoT, sem interferência prejudicial a outros sistemas de comunicação de rádio (Anatel, 2017a).

2.6 The Things Network

TTN é uma plataforma aberta de rede IoT que permite a comunicação entre dispositivos e aplicativos na nuvem. É uma parte fundamental da arquitetura, permitindo que os usuários recebam e processem dados de seus dispositivos IoT. A plataforma também fornece ferramentas para análise e visualização de dados, permitindo que os usuários monitorem e controlem seus dispositivos remotamente. O servidor de aplicação do TTN é altamente escalável e flexível, permitindo que os usuários se adaptem rapidamente às mudanças nas necessidades de sua aplicação IoT. A plataforma é totalmente *open source*, o que significa que os usuários têm

total liberdade para personalizar e modificar o servidor de aplicação de acordo com suas necessidades específicas (THE THINGS NETWORK, 2022).

3 METODOLOGIA

Este capítulo trata sobre a construção de dispositivos de comunicação LoRa para validar a conexão entre *gateway* e *endpoint*, além de apresentar a integração desses dispositivos no servidor de aplicação TTN. A aplicação gera um arquivo *log* Notação para Objeto em JavaScript, do inglês *JavaScript Object Notation* com informações sobre a transmissão, as quais são coletadas, tratadas e apresentadas de forma gráfica ao final do trabalho.

Além disso, é feito uma estimativa do consumo de energia do SIP de Campo Mourão, levando em consideração informações sobre as tecnologias utilizadas, a quantidade de pontos de iluminação e a potência consumida. Paralelamente, também é feito uma estimativa do consumo energético de um sistema que conectaria todos os postes a um número mínimo de *gateways* capazes de abranger todos os pontos de iluminação. O número mínimo de *gateways* resulta de uma simulação da propagação da cobertura dos *gateways* LoRaWAN.

3.1 *Gateway* e *Endpoint*: Uma Abordagem Prática

A arquitetura ilustrada na Figura 9, e descrita na seção 2.3, foi construída com o objetivo de validar uma transmissão entre dispositivos LoRaWAN. Esta arquitetura consiste em três componentes principais: um *gateway*, um servidor de rede e um *endpoint*.

3.1.1 *Gateway*, Servidor de Rede e Servidor de Aplicação

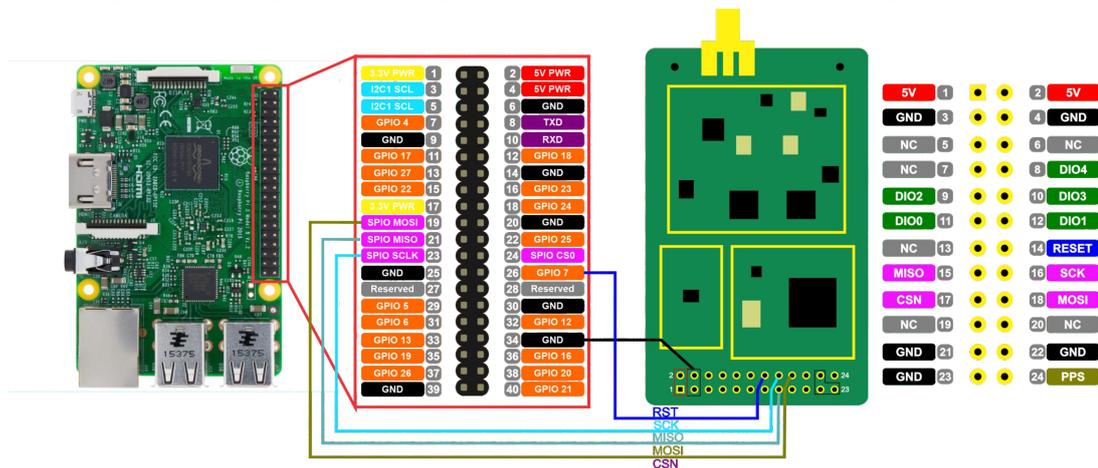
O *gateway* representado pelo módulo RHF0M301, é responsável por receber as transmissões dos *endpoints* pela modulação LoRa e encaminhá-las para o servidor de rede, neste trabalho, pela comunicação Interface Periférica Serial, do inglês *Serial Peripheral Interface* (SPI). O servidor de rede é representado por uma placa de desenvolvimento Raspberry Pi 3 Model B, que é responsável por gerenciar as comunicações entre o *gateway* e o *endpoint*, além de executar serviços de rede e fornecer as informações ao servidor de aplicação (Alliance, 2017).

O *gateway* LoRa é um dispositivo que atua como intermediário entre os *endpoints* e a infraestrutura de rede LoRaWAN. O *gateway* recebe as transmissões dos *endpoints* e as encaminha para a rede, e vice-versa, permitindo a comunicação bidirecional entre os dispositivos e a nuvem (Alliance, 2017). O *gateway* RHF0M301 da Semtech possui 8 canais LoRaWAN incorporados com o chip da Semtech SX1301. Conta com diferentes bandas de operação, com as versões 434 MHz, 510 MHz, 780 MHz, 868 MHz e 915 MHz, sendo o de 915 MHz usado no projeto, respeitando as normas de legislação impostas pela ANATEL (THE THINGS NETWORK, 2022).

O módulo está integrado a uma Raspberry Pi 3, que funciona como servidor de rede e é responsável pela comunicação com o servidor de aplicação através do protocolo

de Controle de Transmissão, do inglês, *Transmission Control Protocol* (TCP)/Internet Protocol (IP). Com base no tutorial elaborado por Mutalib (2021), foi possível desenvolver uma estação base que se comunica com o servidor de aplicação. O acesso à Raspberry é realizado de forma remota com o Putty, utilizando o protocolo *Secure Shell* (SSH). A Figura 10 ilustra o esquema de conexão entre a Raspberry Pi e o módulo RHF0M301.

Figura 10 – Esquema de integração do módulo RHF0M301 e Raspberry Pi 3



Fonte: Autoria Própria (2023).

Para facilitar a integração e reduzir o risco de erros na comunicação SPI dos dispositivos, é utilizado uma placa adaptadora que faz a interface entre os pinos dos dois dispositivos. O resultado pode ser visto na Figura 11.

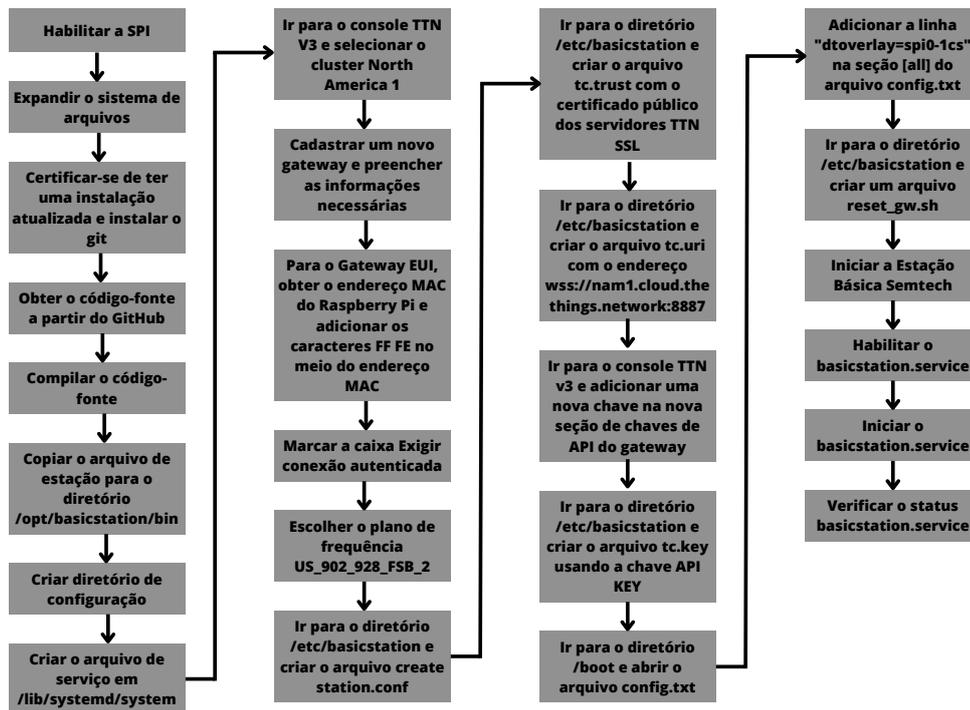
Todo o processo de configuração e integração na plataforma TTN é descrito no fluxograma ilustrado na Figura 12. Os arquivos de configuração encontram-se no repositório contido no ?? deste documento.

Figura 11 – RHF0M301 integrado a uma Raspberry Pi 3



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 12 – Fluxograma com a configuração da Raspberry PI como estação base de um gateway LoRaWAN



Fonte: Autoria Própria (2023).

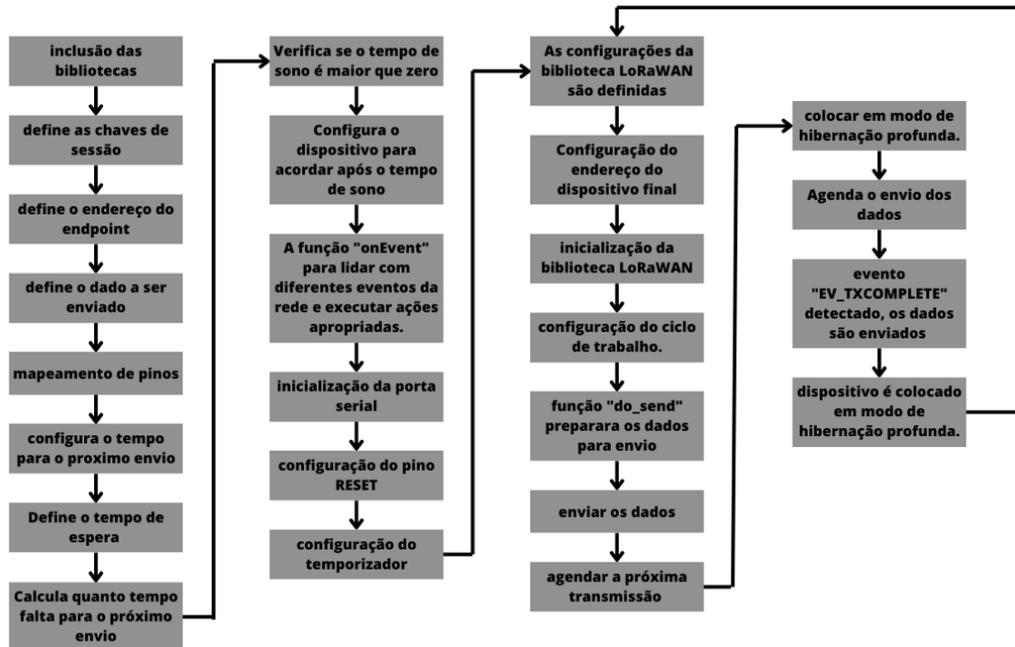
3.1.2 Endpoint e filtro de dados

O Heltec LoRa 32 V2 é um módulo de desenvolvimento compacto baseado no microcontrolador ESP32 da Espressif e no chip LoRa SX1276 da Semtech. Ele oferece conectividade sem fio de longo alcance com baixo consumo de energia, permitindo que dispositivos IoT se comuniquem em distâncias de até vários quilômetros em ambientes externos (Ginanjari *et al.*, 2023).

O código implementado no dispositivo configura a chave de sessão de rede, a chave de sessão do aplicativo e o endereço do dispositivo final. Em seguida, define o intervalo de transmissão, o mapeamento dos pinos, a *payload* a ser transmitido e a função de *callback*. A função de *callback* lida com diferentes eventos da rede LoRaWAN, agendando transmissões e processando dados recebidos. A função *dosleep()* configura o tempo para o próximo envio e coloca o dispositivo em modo de hibernação profunda. O código pode ser visto no Apêndice A, além de estar de forma detalhada no repositório que pode ser acessado pelo link contido no Apêndice B. O fluxograma ilustrado na Figura 13 mostra os processos do código que é embarcado no dispositivo.

A plataforma TTN gera um arquivo *log* Notação para Objeto em JavaScript, do inglês *JavaScript Object Notation* (json) com as informações sobre a comunicação entre os dispositivos. Para uma melhor análise é usado um código em linguagem Python, que percorre esse json e retorna as informações de forma organizada, separando cada informação em uma co-

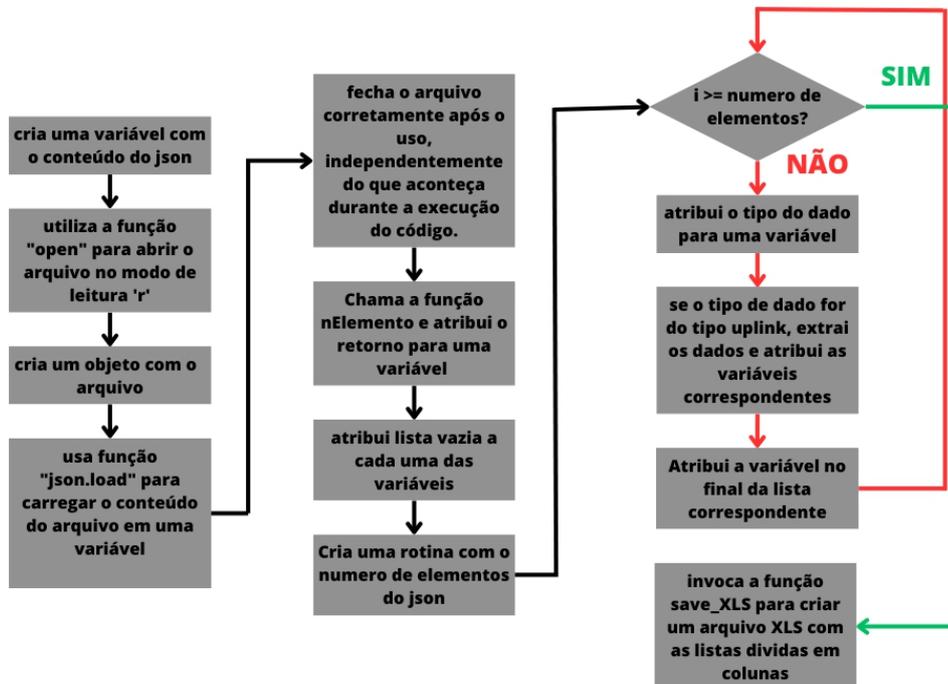
Figura 13 – Fluxograma representando o código embarcado no *endpoint*



Fonte: Autoria Própria (2023).

luna correspondente. O código também está contido no repositório e é detalhado no fluxograma ilustrado pela Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma representando o código de filtragem do json



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.2 Diagrama de irradiação, Dados sobre o SIP e consumo energético

O uso adequado de parâmetros de transmissão é crucial para o sucesso de uma rede LoRa, incluindo a escolha da frequência dentro da faixa regulamentada pela ANATEL e a potência de transmissão ideal para a aplicação em questão. Além disso, outros parâmetros físicos dos dispositivos, como o ganho e altura da antena, devem ser considerados para garantir um desempenho ideal da rede.

Nesse aspecto, o Radio Mobile é um *software* livre dedicado ao rádio amadorismo que utiliza o modelo de propagação Longley-Rice para cálculos de campo em sistemas móveis. Ele permite a obtenção de mapas e a integração de estações de transmissão em uma ou mais redes. Embora o Radio Mobile não seja utilizado comercialmente devido à falta de dados precisos sobre o terreno e contar com apenas um modelo de propagação, ele ainda assim pode dar uma visão aproximada do diagrama de propagação a partir dos parâmetros atribuídos. Os parâmetros utilizados na simulação foram obtidos a partir dos *datasheets* dos dispositivos. A Figura 15 mostra duas telas de configuração, com os parâmetros utilizados na simulação.

Figura 15 – Parâmetros de entrada no *software*

The figure displays two screenshots of the Radio Mobile software configuration interface. The left screenshot shows the following parameters: 'Nome do sistema' (GW LoRaWAN), 'Potência de transmissão (Watt)' (0,5011872) and '(dBm)' (27), 'Limiar do receptor (µV)' (0,1) and '(dBm)' (-127), 'Perda de linha (dB)' (0,5) with a note '(Cabo+cavidades+conectores)', 'Tipo de antena' (omni.ant) with a 'Visualizar' button, 'Ganho da antena (dBi)' (2,15) and '(dBd)' (0), 'Altura da antena (m)' (3) with a note '(Acima do solo)', and 'Perda de cabo adicional (dB/m)' (0) with a note '(se a altura da antena difere)'. The right screenshot shows: 'Nome da rede' (Gateway LoRa), 'Refratividade da superfície (N-Units)' (301), 'Condutividade do solo (S/m)' (0,005), 'Permissividade média do solo' (15), 'Frequência mínima (MHz)' (915), 'Máxima frequência (MHz)' (928), 'Polarização' (Vertical selected, Horizontal unselected), 'Modo estatístico' (Radiodifusão selected, with 50% time, 50% locations, and 70% situations), and 'Clima' (Temperado continental selected, with other options like Equatorial, Sub-tropical continental, Sub-tropical marítimo, Deserto, Temperado marítimo sobre a terra, and Temperado marítimo sobre o mar).

Fonte: Autoria Própria (2023).

Para avaliar a atenuação do sinal LoRa em diferentes alturas de antena, foram realizadas duas simulações utilizando o *software*. A primeira simulação utilizou a altura da antena de 3 metros e a segunda simulação utilizou a altura da antena de 5 metros. Na teoria eletromagnética, a atenuação do sinal aumenta com a distância entre a antena transmissora e a antena receptora. Quando a altura da antena é menor, a zona de Fresnel também é menor, e pode sofrer obstrução devido a obstáculos no ambiente (Pérez-Trujillo *et al.*, 2022).

Para obter informações sobre o número de pontos de iluminação pública no município de Campo Mourão, foi utilizado a plataforma IP Prefeituras da Copel. Essa plataforma é uma base de dados que fornece informações detalhadas sobre o SIP de municípios do Paraná. Com essa plataforma, é possível visualizar a geolocalização de todos os postes de iluminação pública, bem como informações sobre o tipo de tecnologia utilizada e a potência da lâmpada. Além disso, é

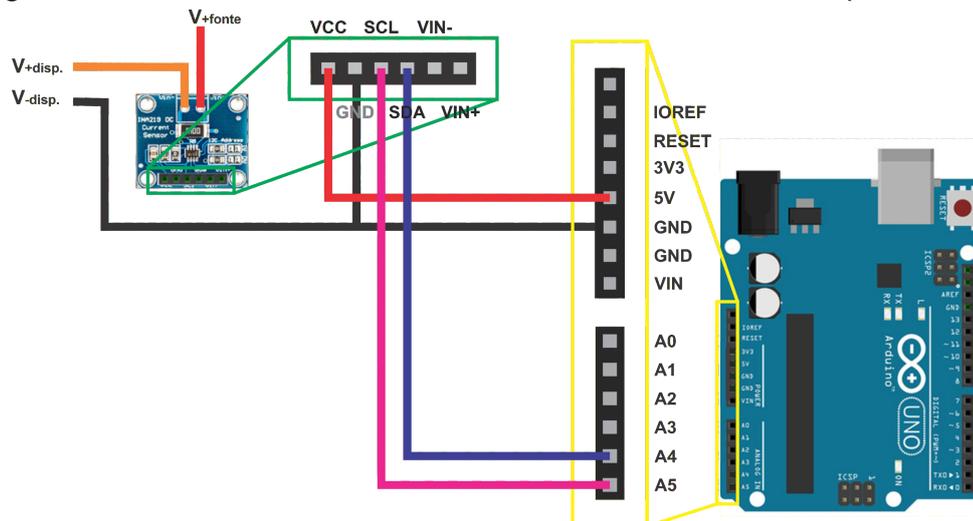
possível obter gráficos e tabelas com informações relevantes, que podem ser exportadas em formato Valores Separados por Vírgula, do inglês *Comma-Separated Values* (CSV).

Para obter o consumo energético dos dispositivos, é utilizado o INA219, que é um circuito integrado de medição de corrente e tensão que pode ser utilizado em conjunto com o Arduino Uno, para obter informações precisas sobre o consumo de energia em um circuito. Para obter o consumo energético com o INA219 e o Arduino Uno, é necessário conectar o circuito integrado ao Arduino e ler as informações de tensão e corrente através do protocolo de comunicação Circuito Interintegrado, do inglês *Inter-Integrated Circuit* (I2C).

O INA219 possui uma alta resolução de até 0,1 miliamper (mA) para corrente e 4 milivolt (mV) para tensão, o que permite a realização de medições precisas de pequenas variações no consumo de energia e na potência associada a essas variações (Qahtan; Mohammed; Ali, 2022). Para a coleta de dados, foi utilizado o *software* de código aberto RealTerm, que lê os dados via porta serial e os armazena em um arquivo no formato *txt*. Posteriormente, esse arquivo é processado para separar os dados em colunas, tornando-os prontos para análise.

A Figura 16 ilustra o esquema de conexão entre o módulo INA219 e o Arduino. A entrada V+fonte representa a fonte de alimentação que fornece energia ao dispositivo cujo consumo está sendo medido, enquanto V+disp corresponde ao polo positivo da alimentação desse dispositivo. O Terra, do inglês, *Ground* (GND) é o terminal comum utilizado em todo o sistema. A alimentação do módulo INA219 é fornecida a partir do pino de 5 Volt (V) do Arduino, e os pinos Sinal de Dados, do inglês, *Serial Data* (SDA) e Sinal de Clock, do inglês, *Serial Clock* (SCL) são os canais de comunicação de dados e *clock*, respectivamente, empregados na comunicação I2C.

Figura 16 – Interfaceamento entre o módulo INA219 e o Arduino Uno (HARDWARE)



Fonte: Autoria Própria (2023).

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa realizada no âmbito deste trabalho, que teve como objetivo fazer um estudo aplicado da tecnologia LoRa/LoRaWAN, como alternativa de arquitetura de rede de um sistema de controle de iluminação pública. Os dados e análises apresentados aqui são o resultado de processos de pesquisa, desenvolvimento e coleta, que buscou responder às questões de aplicabilidade de tal tecnologia. Neste capítulo, serão examinadas questões como consumo energético, diagrama de irradiação e uma transmissão prática usando um *gateway* e um *endpoint*.

4.1 Simulação de propagação de *gateways* LoRaWAN

Utilizando o *software* de simulação Radio Mobile com os parâmetros detalhados na seção 3.2, será conduzida duas simulações para determinar o número mínimo de *gateways* necessários para alcançar uma cobertura completa do município, utilizando edifícios públicos como pontos de referência.

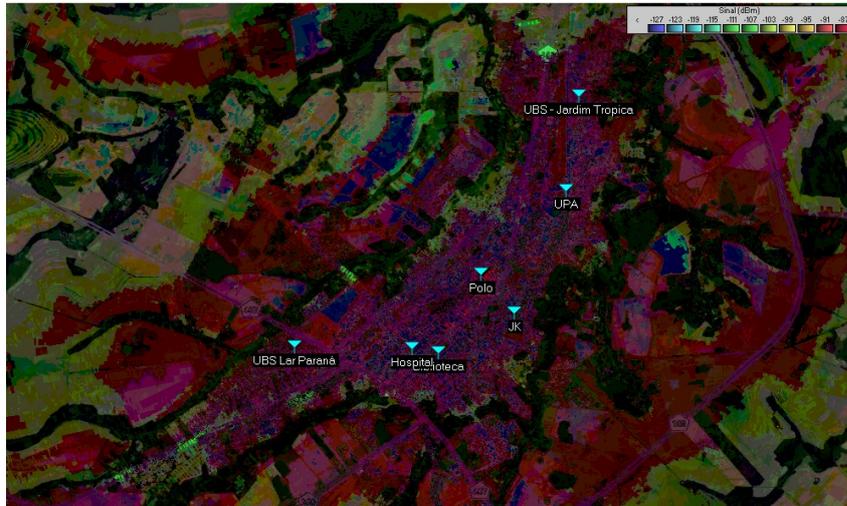
Embora LoRa tenha uma boa sensibilidade e é caracterizado para transmissões de longo alcance, é essencial destacar que a cidade de Campo Mourão está construída em um terreno acidentado, com alturas que podem variar entre 614 m na Catedral São José, até 512 m no Jardim Aeroporto. Por conseguinte, o resultado obtido revelou que independentemente da altura das antenas (sejam elas de 5 ou 3 metros), a alocação de 7 *gateways* é suficiente para garantir uma cobertura integral de Campo Mourão.

A escolha estratégica de posicionar as antenas em locais elevados, como telhados ou postes, desempenha um papel crucial na expansão do alcance e da cobertura, minimizando as interferências provocadas por obstáculos, como paredes e árvores. Por outro lado, em alturas mais baixas, a cobertura e o alcance diminuem, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. A altura das antenas deve ser ajustada para estabelecer uma linha de visão direta entre o *gateway* e o ponto final nas comunicações ponto a ponto, um fator crítico que tem um impacto direto na qualidade e no alcance do sinal. Essa adaptação deve ser feita considerando as necessidades e o contexto da aplicação. No contexto deste trabalho, o ponto final da rede estabeleceu conexão com o *gateway* a 2,1 m do solo.

Os resultados das simulações podem ser visualizados nas Figuras 17 e 18, que representam antenas com alturas de 3 e 5 metros, respectivamente. As cores utilizadas nas figuras indicam a intensidade do sinal, indo do mais forte (vermelho) ao mais fraco (azul). As áreas em vermelho correspondem a uma intensidade de -87 Decibel miliwatt (dBm), enquanto o azul marinho indica uma intensidade de -127 dBm.

Observa-se uma ligeira variação na intensidade do sinal conforme as alturas das antenas dos *gateways* são ajustadas. Aos 5 metros, a coloração vermelha se torna mais homogênea. No entanto, se considerado a sensibilidade de recepção na modulação LoRa (-137 dBm),

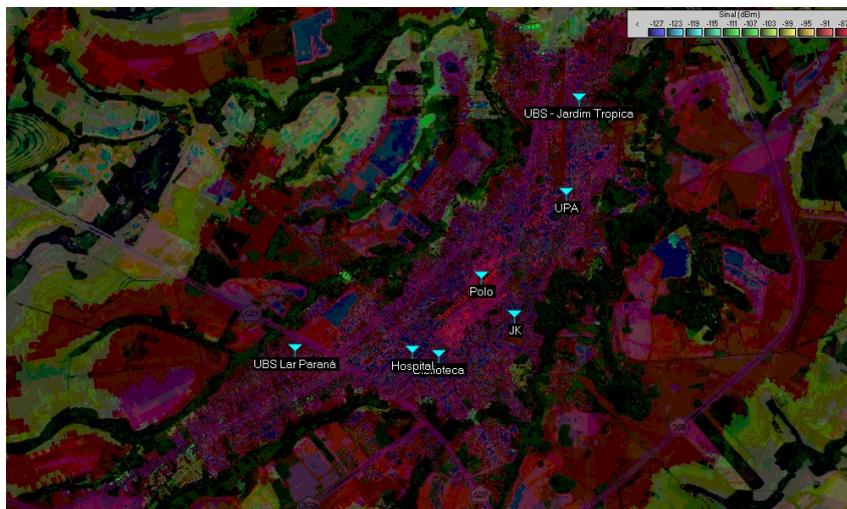
Figura 17 – Simulação usando parâmetros característicos da modulação LoRa com antena do gateway a 3 metros do solo



Fonte: Autoria Própria (2023).

concluí-se que essas diferenças são insignificantes no que diz respeito ao alcance eficaz da cobertura.

Figura 18 – Simulação usando parâmetros característicos da modulação LoRa com antena do gateway a 5 metros do solo



Fonte: Autoria Própria (2023).

É fundamental destacar que o Radio Mobile foi originalmente desenvolvido para uso em rádio amador, e seu autor não assume responsabilidade pelo seu uso em aplicações comerciais. Isso ocorre porque o *software* não considera diversos fatores, como a presença de estruturas acima do solo e o número de dispositivos conectados a cada *gateway*. Além disso, é importante notar que essa simulação não aborda o desvanecimento por múltiplos percursos, como o causado por veículos em movimento. Portanto, para garantir uma cobertura robusta e livre de falhas, é provável que o número de *gateways* determinado pela simulação não seja suficiente.

4.2 Sistema de Comunicação

Como descrito na subseção 3.1.1, o servidor de rede foi construído a partir de uma placa de desenvolvimento Raspberry PI 3 integrada a um *gateway* RHF0M301 da Semtech. Ao final de todo processo descrito pelo fluxograma da Figura 12, ao dar o comando para verificar o *status* da estação base, observa-se como retorno uma tela semelhante a mostrada na Figura 19. Esse é o primeiro sinal que nossa estação base, ou seja, o *gateway* LoRaWAN, está se comunicando com o servidor de aplicação TTN.

Figura 19 – Status da estação base confirmando a conexão do gateway com o servidor TTN

```

randrez@raspberrypi:~
Arquivo Editar Abas Ajuda
● basicstation.service - Basic Station TTN V3 service
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/basicstation.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Tue 2023-05-09 13:03:26 -03; 3 months 10 days ago
     Main PID: 404 (station)
       Tasks: 2 (limit: 1595)
          CPU: 1.851s
    Cgroup: /system.slice/basicstation.service
            └─404 /opt/basicstation/bin/station -h /etc/basicstation --radio-init/etc/basicstation/reset_gw.sh

mai 09 13:03:26 raspberrypi system[1]: Started Basic Station TTN V3 service.
~
~
~
lines 1-10/10 (END)

```

Fonte: Aatoria Própria (2023).

Outra forma de validar a conformidade da conexão é o próprio servidor de aplicação TTN, conforme observa-se na Figura 20. Em todos os momentos o servidor de aplicação TTN indica por meio de uma página WEB, o *status* da estação base em um painel com informações resumidas, como nome, ID e *status*. As informações resumidas são apresentadas no painel, permitindo que o usuário, caso tenha múltiplos *gateways* operando na mesma aplicação, possa facilmente monitorar o *status* de cada um deles e tomar medidas rápidas caso ocorra alguma falha.

Figura 20 – Painel de detalhamento de informações no gateway - Plataforma TTN

ID	Name	Gateway EUI	Status	Created at
gateway-utfpr	utfpr_bloc0B	B8 27 EB FF FE 50 B8 8C	Connected	May 6, 2023

Fonte: Aatoria Própria (2023).

Além do painel que fornece informações resumidas, é possível acessar detalhes mais abrangentes sobre o *gateway* por meio do terminal *Live Data*, que também pode ser acessado de forma remota por meio de uma página WEB, conforme observado na Figura 21. Todas as informações que trafegam pelo *gateway* são registradas no terminal que permite a exportação completa do arquivo de *log*, ou seja, o registro detalhado das informações de transmissão, em formato json. Além disso, o servidor de aplicação da TTN possibilita a conexão por meio de Interface de Programação de Aplicativo, do inglês *Application Programming Interface* (API) com

diversas aplicações e bancos de dados, simplificando o desenvolvimento de aplicações que utilizam LoRaWAN como arquitetura de rede.

Figura 21 – Painel detalhado com informações do gateway

Time	Type	Data preview
17:49:09	Receive gateway status	Versions: { platform: "rpi - Firmware - Protocol 2", station: "2.0.6(rpi/std)", firmware: "", package: "" }
17:49:09	Connect gateway	
17:48:55	Disconnect gateway	
17:48:51	Receive gateway status	Versions: { platform: "rpi - Firmware - Protocol 2", station: "2.0.6(rpi/std)", firmware: "", package: "" }
17:48:51	Connect gateway	
17:48:37	Disconnect gateway	
17:48:34	Receive gateway status	Versions: { firmware: "", package: "", platform: "rpi - Firmware - Protocol 2", station: "2.0.6(rpi/std)" }
17:48:34	Connect gateway	

Fonte: Autoria Própria (2023).

Como *endpoint* da arquitetura LoRaWAN construída neste trabalho, foi usado o Heltec LoRa 32 V2, uma placa de desenvolvimento baseada no microcontrolador ESP32 integrado com um *chip* LoRa. O fluxograma ilustrado pela Figura 13 lista as funções que compõe o código embarcado na placa durante a transmissão. Logo, durante o desenvolvimento do código se mostrou necessário a impressão de mensagens na porta serial para verificar a conformidade da execução das funções. A Figura 22 traz um exemplo de como essas mensagens foram usadas, mostrando informações sobre o momento de início, enfileiramento e envio, além do número do pacote, momento de envio e transmissão concluída.

Figura 22 – Monitor Serial com informações sobre a execução do código

```

18:35:28.551 -> 1524466: EV_TXSTART
18:35:28.551 -> Packet queued
18:35:28.551 -> Pacote: 2
18:35:28.551 -> Momento do envio 18:35:28
18:35:30.628 -> 1657030: EV_TXCOMPLETE (Incluindo janelas de espera RX)
18:35:40.613 -> 2282057: EV_TXSTART
18:35:40.613 -> Packet queued
18:35:40.613 -> Pacote: 3
18:35:40.613 -> Momento do envio 18:35:40
18:35:42.744 -> 2414625: EV_TXCOMPLETE (Incluindo janelas de espera RX)
18:35:52.705 -> 3039652: EV_TXSTART
18:35:52.748 -> Packet queued
18:35:52.748 -> Pacote: 4
18:35:52.748 -> Momento do envio 18:35:52
18:35:54.852 -> 3172217: EV_TXCOMPLETE (Incluindo janelas de espera RX)
18:36:04.852 -> 3797245: EV_TXSTART
18:36:04.852 -> Packet queued
18:36:04.852 -> Pacote: 5
18:36:04.852 -> Momento do envio 18:36:04
18:36:06.984 -> 3929809: EV_TXCOMPLETE (Incluindo janelas de espera RX)
18:36:16.947 -> 4554836: EV_TXSTART
18:36:16.992 -> Packet queued
18:36:16.992 -> Pacote: 6
18:36:16.992 -> Momento do envio 18:36:16
18:36:19.068 -> 4687399: EV_TXCOMPLETE (Incluindo janelas de espera RX)
18:36:29.113 -> 5312427: EV_TXSTART
18:36:29.113 -> Packet queued
18:36:29.113 -> Pacote: 7

```

Fonte: Autoria Própria (2023).

Conforme mencionado anteriormente, o painel *Live Data* fornece informações em tempo real sobre os dados que trafegam pelo *gateway*. Na Figura 23, é possível visualizar o terminal

do servidor de aplicação TTN durante a transmissão de pacotes entre o *endpoint* e o *gateway*. Junto com cada pacote, o servidor de aplicação também disponibiliza dados de configuração do canal de transmissão, incluindo o momento de recebimento, o número do pacote, Relação Sinal Ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*, frequência e RSSI.

Figura 23 – Informações no TTN durante a transmissão de pacotes entre o *endpoint* e o *gateway*

Time	Type	Data preview
18:37:06	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 10 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 9 RSSI: -35
18:36:53	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 9 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 11 RSSI: -34
18:36:41	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 8 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 10.5 RSSI: -33
18:36:29	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 7 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 9.5 RSSI: -34
18:36:17	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 6 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 10.5 RSSI: -34
18:36:05	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 5 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 7.5 RSSI: -34
18:35:53	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 4 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 9.75 RSSI: -35
18:35:41	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 3 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 8.25 RSSI: -35
18:35:29	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 2 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 8.25 RSSI: -35
18:35:16	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 1 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 10 RSSI: -35
18:35:04	Receive uplink message	DevAddr: 26 0C B2 60 FCnt: 1 FPort: 1 Data rate: SF7Bw125 SNR: 9.25 RSSI: -34

Fonte: Autoria Própria (2023).

Como dito, o servidor de aplicação TTN oferece a capacidade de gerar um arquivo json contendo todas as informações apresentadas no painel. Isso torna útil, ao extrair registros que fornecem detalhes importantes sobre a transmissão, e poder fazer uma análise mais aprofundada sobre os dados. A Figura 24 mostra um trecho do json gerado pelo servidor de aplicação, e destaca informações como BW, SNR, Taxa de Código, do inglês *Code Rate*, RSSI e SNR.

Figura 24 – Trecho de arquivo json gerado pela plataforma TTN, destacando informações como BW, SF, CR, RSSI e SNR

```

},
"time": "2023-05-08T16:29:31.415457963Z",
"timestamp": 2367994156,
"rssi": -105,
"channel_rssi": -105,
"snr": -5.25,
"uplink_token": "-----",
"received_at": "2023-05-08T16:29:31.515878303Z"
}
"lora": {
"bandwidth": 125000,
"spreading_factor": 7,
"coding_rate": "4/5"
}

```

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.3 Validação em Campo e Cobertura do Sistema de Comunicação

Para a transmissão dos dados, foi escolhido instalar o *gateway* no térreo do Bloco B da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Campo Mourão. A escolha se deu pois a sala oferece conexão *ethernet*, fonte de energia e segurança ao dispositivo. A Figura 25 mostra o *gateway* em funcionamento no local da instalação (Lat: -24.06035; Lon: -52.386153) com uma altura de 589,2 metros acima do nível do mar.

Figura 25 – Gateway em funcionamento na UTFPR



Fonte: Aatoria Própria (2023).

Com o *endpoint* configurado e integrado a aplicação do servidor TTN, foi escolhido como ponto de transmissão um poste localizado a 949,5 m do local onde o *gateway* foi posicionado (Lat: -24.051689; Lon: -52.385794), a 573,1 metros acima do nível do mar, conforme mostra a Figura 26. O local foi escolhido por se mostrar consistente durante as transmissões dos pacotes e por ficar em um local com alto fluxo de trânsito, pois fica do lado do semáforo de uma região movimentada da cidade. O *endpoint* foi alimentado por uma bateria de 5 V e conectado com o auxílio de uma *proto board*.

Figura 26 – Heltec LoRa 32 alimentado por uma bateria a 2,1 m do solo



Fonte: Aatoria Própria (2023).

No dia da transmissão, as condições climáticas estavam marcadas por um céu nublado e chuva, fatores que, juntamente com a elevada umidade relativa do ar, podem ter contribuído para a perda de pacotes. A Figura 27 disponibiliza uma imagem que captura exatamente como estava o céu no dia da transmissão.

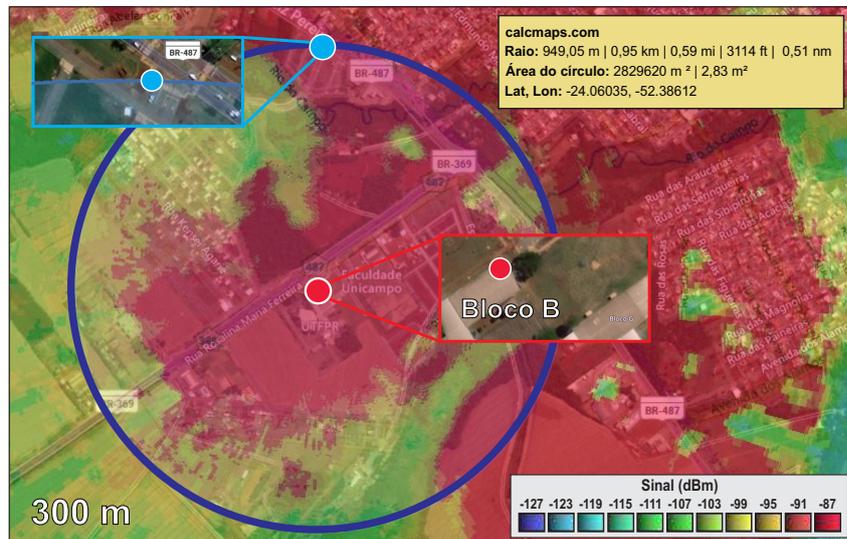
Figura 27 – Visão a partir do poste onde foi fixado o *endpoint* em direção ao *gateway* localizado na UTFPR no dia da transmissão



Fonte: Autoria Própria (2023).

A distância física entre os dois dispositivos foi determinada com base nas coordenadas dos pontos de transmissão. Com o auxílio da ferramenta online *Calcmeps.com*, foi gerado um círculo que fornece o raio, permitindo assim obter a distância desejada. A distância entre os dois pontos totaliza 949,5 metros, como ilustrado pela Figura 28. Novamente utilizando o Radio Mobile, foi simulado a cobertura da área em questão, é possível perceber que o *endpoint*, representado pelo círculo azul claro na Figura 28, está em um ponto onde a intensidade do sinal é máxima.

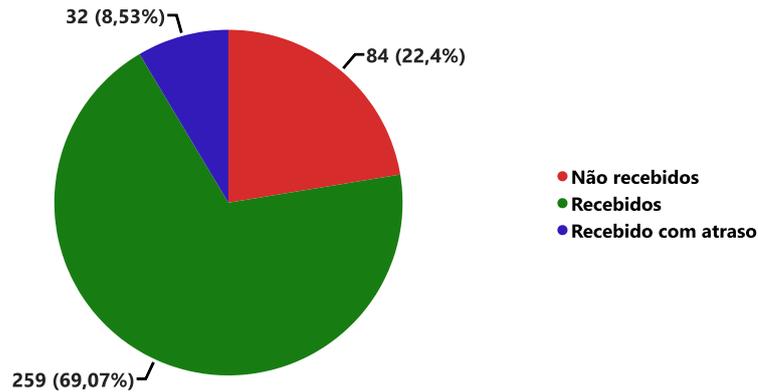
Figura 28 – Raio de transmissão



Fonte: Adaptado de Calcmeps (2023).

Através do código descrito no fluxograma apresentado na Figura 14, foi possível extrair as informações do arquivo json e criar uma planilha na qual os dados foram organizados em colunas, facilitando assim a análise da camada de enlace da rede. A partir da ferramenta Power BI da Microsoft, foi possível realizar uma análise gráfica da transmissão. O gráfico mostrado na Figura 29 mostra uma visão geral sobre a quantidade de pacotes que alcançaram o *gateway*, quantos não foram recebidos e quantos tiveram atrasos na entrega.

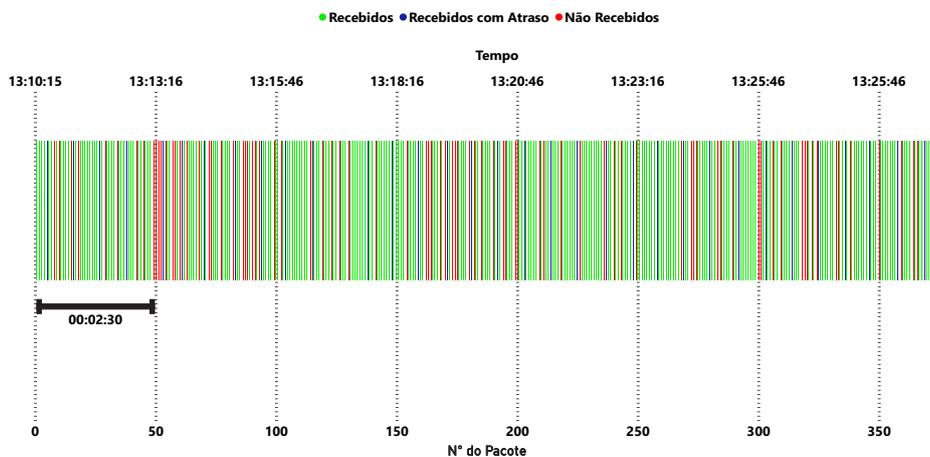
Figura 29 – Análise dos pacotes transmitidos



Fonte: Autoria Própria (2023).

Dos 375 pacotes enviados pelo dispositivo final, 22% deles não chegaram até o *gateway*. Durante a transmissão em tempo real através do console da TTN, foi possível notar que a maior incidência de perda de pacotes ocorria nos momentos de tráfego mais intenso nas vias, coincidindo com a abertura do semáforo na BR-487. Também é possível visualizar por meio da Figura 30, que a incidência na perda pacotes aumenta em intervalos regulares de tempo, convergindo com o ciclo de funcionamento do semáforo.

Figura 30 – Status de cada pacote enviado durante a transmissão em relação ao tempo

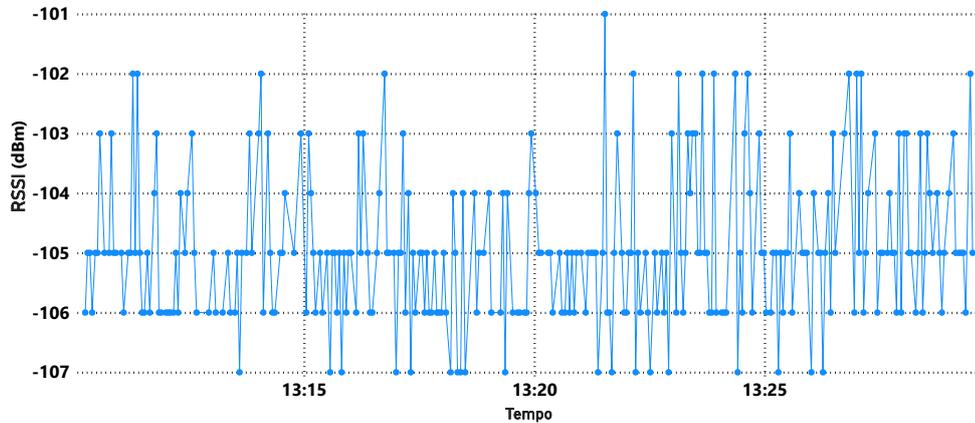


Fonte: Autoria Própria (2023).

No contexto da modulação LoRa, ou seja camada 1, o RSSI é crucial, pois ajuda a avaliar a intensidade do sinal recebido pelo *gateway*, o que é essencial para determinar o com-

portamento do canal. A Figura 31 mostra como se comportou o RSSI dos pacotes enviados nesta transmissão. Observa-se pela Figura 31 que o RSSI varia entre -101 a -107 dBm nesta transmissão, isso é devido preferencialmente ao desvanecimento por múltiplos percursos.

Figura 31 – Indicador de intensidade do sinal recebido de cada pacote durante a transmissão

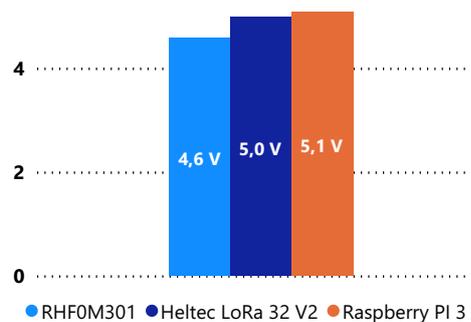


Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4 Consumo energético dos dispositivos

Conforme detalhado na seção 3.2, as informações sobre o consumo de cada um dos dispositivos foram obtidas utilizando o módulo INA219 integrado a um Arduino UNO. O processo foi semelhante ao realizado para coletar informações da transmissão de dados. Um arquivo de texto é gerado a partir da leitura da porta serial, e esse arquivo é posteriormente analisado para organizar as informações em colunas. Com o auxílio da versão gratuita da ferramenta Power BI, foram criados gráficos para uma análise mais aprofundada das leituras do consumo. A Figura 32 mostra o consumo médio de tensão durante a transmissão, dos três dispositivos ao longo de um período um pouco superior a três horas. A tensão demandada pelos dispositivos permanece praticamente constante, com pequenas variações na casa dos mV.

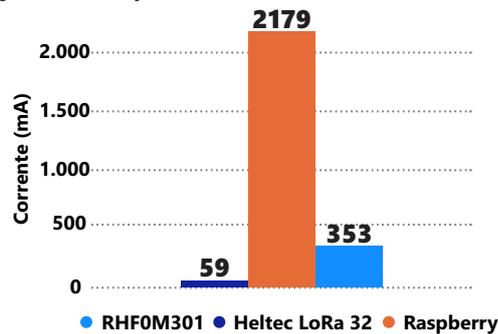
Figura 32 – Tensão média demandada pelos dispositivos durante a transmissão



Fonte: Autoria Própria (2023).

Seguidamente, na Figura 33, pode ser visto o perfil do consumo médio de corrente da Raspberry PI, do Heltec LoRa e do módulo RHF0M301 no mesmo intervalo de tempo. Destaca-se que a Raspberry PI é a principal responsável pelo consumo de corrente no sistema, graças ao seu alto poder de processamento e aos recursos do sistema embarcado, portanto, fica demonstrado que a Raspberry PI não é uma boa opção para eficiência energética. Durante a coleta de dados, a Raspberry PI estava conectada exclusivamente ao *gateway* RHF0M301, sem outros periféricos envolvidos.

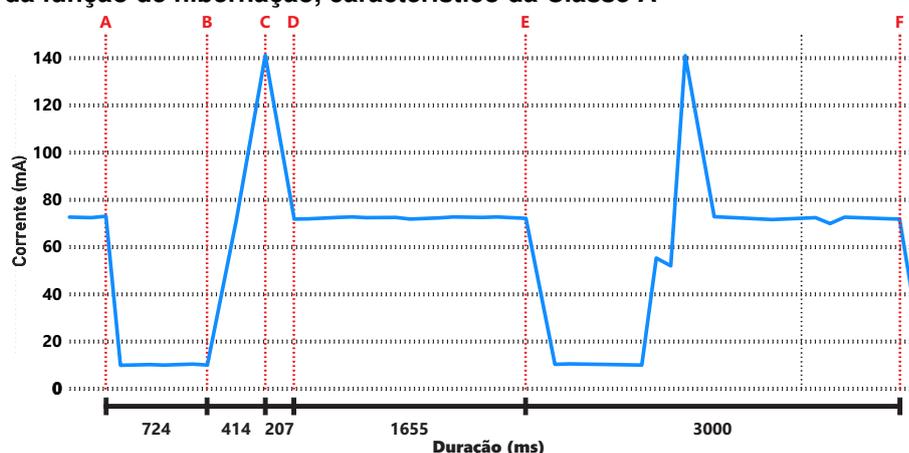
Figura 33 – Consumo médio de corrente pelos dispositivos Raspberry PI 3, RHF0M301 e Heltec LoRa 32 em relação ao tempo



Fonte: Autoria Própria (2023).

O consumo de corrente pelo dispositivo Heltec LoRa apresenta uma particularidade. A implementação da função *sleep mode*, coloca o dispositivo em modo de hibernação quando não está transmitindo dados, característica da Classe A. O momento A ilustrado na Figura 34, representa o momento em que o dispositivo entra em modo hibernação, usando apenas a corrente necessária para se manter ouvindo, desabilitando outras funções até o momento B. No momento C, observa-se o pico de consumo de corrente, que coincide com o momento do envio do pacote. Após o envio, a corrente se estabiliza até o momento E, onde o ciclo é repetido durante todo tempo de transmissão.

Figura 34 – Consumo de corrente do dispositivo Heltec LoRa 32 evidenciando a implementação da função de hibernação, característico da Classe A

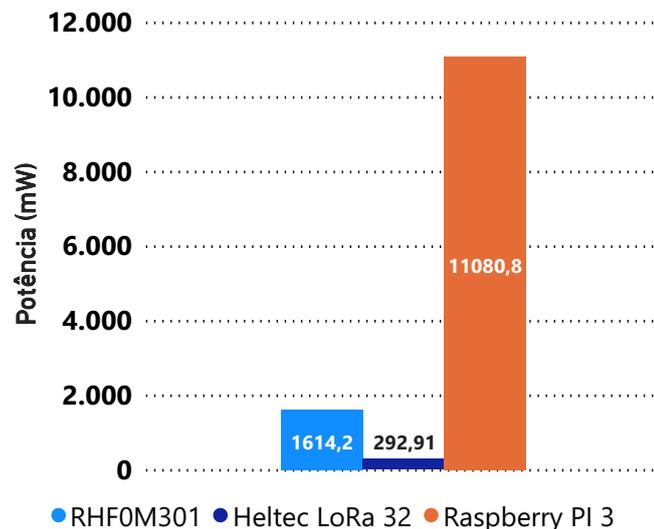


Fonte: Autoria Própria (2023).

Ao implementar essa técnica no código do dispositivo, observa-se que o consumo médio de corrente, que é de 58,96 mA, resulta em uma notável redução de 58,88% em comparação com o pico de consumo, que atingiu 143,4 mA.

O gráfico na Figura 35 exibe o consumo médio de potência dos dispositivos, destacando que a Raspberry PI é o maior consumidor, com uma média de 11 W, enquanto o *endpoint* e o *gateway* consomem 0,292 Watt (W) e 1,61 W, respectivamente. A Raspberry PI pode ser substituída por uma placa com menos recursos, dado que nesse caso não foi usado todo seu poder de processamento, e com isso, ter uma redução no consumo do sistema. Porém ao levar em conta a quantidade de dispositivos dentro da arquitetura proposta, o consumo da Raspberry se torna irrelevante, já que a rede contaria com mais de 14 mil *endpoints* e 7 *gateways*. A escolha dessa placa no desenvolvimento deste trabalho deve-se à sua disponibilidade na UTFPR e à facilidade de desenvolvimento em sistemas embarcados desse tipo.

Figura 35 – Potência média consumida pelos dispositivos



Fonte: Autoria Própria (2023).

Por fim, a Tabela 2 sintetiza as informações sobre o consumo de energia dos dispositivos com a mesma amostragem usada na plotagem dos gráficos, composta por 5.512 leituras realizadas em intervalos de 2 segundos. Esta tabela destaca os valores máximos, mínimos, durante a transmissão e durante a recepção, para o *endpoint*, *gateway* e Raspberry PI.

4.5 Dados sobre o consumo energético SIP de Campo Mourão

Com dados extraídos através da plataforma IP Prefeituras da Copel, foi possível construir os gráficos apresentados nas Figuras 36a, 36b e 36c. Esses gráficos fornecem informações sobre o consumo de potência de cada tecnologia, além do número de pontos de iluminação pública no município de Campo Mourão. Também é possível analisar o consumo médio por lâmpada em cada tipo de tecnologia empregada.

Tabela 2 – Tabela com informações sobre o consumo dos dispositivos usados na arquitetura da rede

	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (mW)
RHF0M301			
Máximo	4,58	355,5	1626
Mínimo	4,54	349,3	1585,82
Transmissão	4,58	354,9	1625,44
Recepção	4,58	350,1	1603,46
Heltec LoRa 32			
Máximo	5,08	143,4	694
Mínimo	4,84	9,5	72,4
Sleep Mode	4,84	9,5	72,4
Transmissão	4,98	72,9	360
Recepção	4,98	71,8	358
Raspberry PI 3 Model B			
Máximo	5,13	2249,3	11538,91
Mínimo	5,07	2135	10824,45
Transmissão	5,11	2244,9	11471,4
Recepção	5,10	2229,7	11371,47

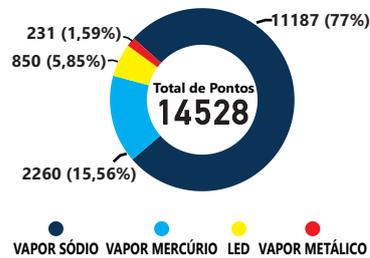
Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 36 – Dados sobre o Sistema de Iluminação Pública de Campo Mourão

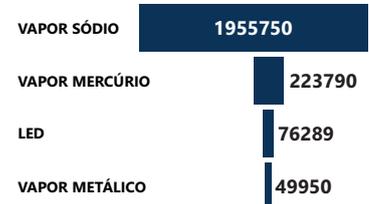
(a) Consumo médio por tipo de lâmpada



(b) Número de pontos do SIP



(c) Consumo total por tipo de lâmpada



Fonte: ArcGIS (2023).

Pode-se observar na Figura 36c que o sistema de iluminação em sua maioria utiliza tecnologias de vapor que são ionizadas através de uma corrente elétrica. Esse processo consome uma quantidade considerável de energia, especialmente quando comparado à eficiência das lâmpadas de LED. Isso ocorre em grande parte devido ao fato de que as lâmpadas de descarga de gás, como as de vapor de sódio e de mercúrio, operam a altas temperaturas para vaporizar os elementos contidos nelas. Além disso, elas emitem luz fora do espectro visível, incluindo luz infravermelha e ultravioleta, o que pode ser considerado como desperdício de energia, uma vez que essa luz não contribui para a iluminação desejada e é dissipada em forma de calor (Pacheco, 2018).

Com base nos dados obtidos a partir da base de dados da ArcGIS (2023), calcula-se o consumo médio das lâmpadas de LED, dividindo o consumo total pelo número de pontos no sistema. Além disso, multiplica-se o número de pontos no SIP pelo consumo médio das

lâmpadas de LED, a fim de estimar o consumo total do SIP em Campo Mourão, considerando exclusivamente o uso de lâmpadas de LED.

O consumo médio das lâmpadas de LED é de 89,75 W por unidade.

O cálculo fica da seguinte forma:

$$231 + 2,260 + 11,187 + 850 = 14,528 \quad (1)$$

$$14,528 \cdot 89,75 = 1.303.888 \text{ W} \quad (2)$$

A redução percentual no consumo energético, comparando o consumo atual com o consumo estimado usando apenas lâmpadas de LED, é de:

$$((2.305.779 - 1.303.888) / 2.305.779) \cdot 100 = 43,45\% \quad (3)$$

Essa redução de 43% no consumo energético, pode ser atribuída à maior eficiência das lâmpadas de LED em comparação com outras tecnologias empregadas no sistema. Além disso, as lâmpadas de LED possuem a vantagem de permitir um controle mais preciso de sua intensidade luminosa. Isso se deve à melhor sensibilidade e à rápida resposta do diodo emissor de luz, a variações de tensão e corrente, em contraste com as lâmpadas de vapor (Pereira, 2021).

Ao considerar um sistema que controle a intensidade luminosa das lâmpadas do SIP individualmente a partir de dados de sensores, é possível reduzir ainda mais o consumo do sistema. Com todas as informações apresentadas anteriormente, é possível determinar o número de *gateways* e *endpoints*, além de ser possível realizar uma estimativa do consumo de energia de um sistema proposto que forneça cobertura necessária a todos os pontos de iluminação de Campo Mourão.

O resultado vem da multiplicação do número de dispositivos pelo seu consumo médio respectivo, como mostra as equações a seguir:

$$CT = (n_{EP} \cdot P_{MEP}) + (n_{GW} \cdot P_{MGW}) + (n_{RP} \cdot P_{MRP}) \quad (4)$$

$$CT = (14528 \cdot 292,91 \text{ mW}) + (7 \cdot 1614,2 \text{ mW}) + (7 \cdot 2365,6 \text{ mW}) \quad (5)$$

$$CT = 4255396,48 \text{ mW} + 11.299,4 \text{ mW} + 16.559,2 \text{ mW} \quad (6)$$

$$CT = 4.283.255,08 \text{ mW} \approx 4,28 \text{ MW} \quad (7)$$

$$\% = \left(\frac{CT}{CTSIP} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

$$\% = \left(\frac{4283}{2305779} \right) \cdot 100\% = 0,1857 \approx 0,19\% \quad (9)$$

Em que:

- nEP = Número de *endpoint*
- $PMEP$ = Potência Média *endpoint*
- nGW = Número de *gateway*
- $PMGW$ = Potência Média *gateway*
- nRP = Número de Raspberry
- $PMRP$ = Potência Média Raspberry
- CT = Consumo total
- $CTSIP$ = Consumo total do SIP

Ao considerar cada ponto de iluminação como um nó na rede, com um consumo similar ao do dispositivo Heltec 32, e os *gateways* e servidores de aplicação com características semelhantes ao RHF0301 e Raspberry PI, o consumo aproximado total seria de 4,28 kWh. Isso corresponde a apenas 0,19% do consumo de energia atual do Sistema de Iluminação Pública de Campo Mourão, lembrando que esse trabalho não leva em conta o consumo energético do sistema de controle.

É importante lembrar que esses números são uma estimativa inicial e podem variar com base em vários fatores, incluindo o consumo energético dos dispositivos escolhidos e as características específicas do sistema de gerenciamento. No entanto, essa análise preliminar fornece uma ideia geral do potencial impacto no consumo de energia de um sistema de transmissão sem fio que empregue a modulação LoRa na cidade de Campo Mourão.

A partir deste trabalho que se dedica a abordar questões relacionadas ao consumo de energia e à proposta de um sistema de controle baseado em LoRa, surge a oportunidade de realizar pesquisas que englobem outros aspectos cruciais para o sucesso de uma arquitetura LoRaWAN. Um desses fatores fundamentais, é a avaliação da capacidade das células LoRaWAN, uma vez que não foi definido neste estudo qual é o número máximo de dispositivos finais, que podem ser conectados ao mesmo *gateway* para que não ocorra colisões de pacotes que prejudiquem a confiabilidade da transmissão. A aplicação de um sistema com um maior número de dispositivos finais pode ser aplicada a um modelo de tráfego realista, com o intuito

de ajustar os valores do SF de forma a acomodar o maior número possível de dispositivos em uma única célula LoRa, minimizando a interferência entre diferentes SFs.

A aplicação da tecnologia LoRaWAN na IoT abre portas para técnicas que visam aprimorar a comunicação entre dispositivos. Uma outra proposta de pesquisa consiste em introduzir o conceito de repetição cega e compará-lo com os modos existentes, conduzindo simulações realistas para quantificar as diferenças entre esses modos. Com isso, torna-se possível desenvolver uma implementação realista de um sistema de controle de iluminação pública inteligente baseado em LoRa, que permita a gestão dinâmica de postes de iluminação pública.

5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, foi explorado o potencial da tecnologia LoRaWAN na criação de uma infraestrutura de rede que fornecesse conexão a todos os pontos do sistema de iluminação pública na cidade de Campo Mourão. A pesquisa apresenta tecnologias de comunicação sem fio LPWAN, que podem ser empregadas em arquiteturas de redes IoT. Foi realizado um estudo mais aprofundado sobre a modulação LoRa e a pilha de protocolos LoRaWAN, devido à sua capacidade de transmitir dados a distâncias consideráveis com um consumo baixo de energia.

Para aplicar o estudo realizado, foi construído um *gateway* LoRaWAN a partir de um módulo RHF0M301 integrado a uma Raspberry PI. Além disso, foi desenvolvido um código e embarcado em uma placa de desenvolvimento Heltec LoRa 32 que serviu como ponto final da rede. A integração desses dispositivos na plataforma TTN possibilitou a obtenção de dados em tempo real e a geração de relatórios para análises mais detalhadas.

A simulação do diagrama de irradiação do sinal dos *gateways* foi possível por meio da ferramenta de código aberto Radio Mobile. Isso permitiu estimar a cobertura dos *gateways* em todo o município de Campo Mourão, garantindo que todos os postes de iluminação pública da cidade, recebessem um nível de sinal adequado para o correto funcionamento da comunicação. A antena empregada na simulação foi a mesma utilizada no teste prático, sendo do tipo omnidirecional, ou seja, irradiando o sinal de forma circular em todas as direções.

Além disso, a partir da obtenção de dados do SIP de Campo Mourão, foi possível estimar o custo energético do sistema, além de uma comparação se o mesmo sistema contasse exclusivamente com lâmpadas de LED. A comparação mostra uma redução de 43% no consumo energético do sistema, além de viabilizar um sistema de controle, dado a sua rápida resposta a variação de tensão e corrente.

A transmissão entre o *gateway* e o *endpoint* permitiu analisar o consumo energético e a eficiência na transmissão de dados dos dispositivos de forma prática. A comunicação entre os membros da rede teve 77,6% dos 375 pacotes enviados pelo *endpoint* recebidos pelo *gateway*. Quanto ao consumo energético, uma arquitetura de rede LoRa que cobrisse todo o município de Campo Mourão, representaria apenas 0,19% do consumo energético do sistema de iluminação pública, lembrando que esse seria o custo energético da arquitetura de rede, não levando em conta o sistema de controle.

No entanto, percebe-se que a Raspberry PI, devido à sua complexidade e alto consumo de energia, não se mostrou uma escolha eficiente energeticamente. Somado ao consumo do módulo RHF0M310, a estação base consumiu em média 12,7 W, sendo a Raspberry responsável por 87,3% deste consumo. Por outro lado, o *endpoint* manteve um consumo médio de aproximadamente 0,3 Watts, o que permitiria que ele funcionasse por cerca de dois anos com uma bateria comum de 5600 mili-Âmpere / hora (mAh). Essa eficiência energética é crucial em um sistema de gerenciamento de iluminação pública, pois assegura que a infraestrutura de comunicação, não adicione carga significativa ao consumo de energia, que já é alto, e evita a

necessidade de manutenção frequente nos dispositivos. Contudo, é preciso destacar que em um sistema que contasse com mais de 14 mil *endpoints* e 7 *gateways*, o consumo acentuado da Raspberry se tornaria irrelevante no contexto geral.

Uma arquitetura de rede IoT abrangente que cobrisse todo o município poderia contribuir para melhorar o sistema de transporte público, monitorar indicadores ambientais e otimizar o sistema de iluminação pública. A análise dos dados relacionados à iluminação pública de Campo Mourão sugere oportunidades para reduzir o consumo de energia, desde a substituição de tecnologias antigas por lâmpadas LED até a implementação de sistemas de gerenciamento inteligentes.

Por fim, todos os objetivos propostos foram integralmente alcançados. Ao cumprir os objetivos propostos, este trabalho não apenas atende às expectativas iniciais, mas também oferece uma base sólida para investigações futuras, que podem abordar questões como a capacidade de suporte de nós por *gateway*, o ajuste do SF para reduzir a perda de pacotes com um número maior de *endpoints* em uma célula LoRa, e a aplicação de uma arquitetura LoRa que gerencie um sistema de iluminação na prática, para consolidar conceitos teóricos e práticos sobre o sistema proposto por este trabalho, que visa eficiência energética, economia de recursos e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- AGENCY, I. E. **CO2 Emissions from Fuel Combustion 2019**. [s.n.], 2019. 514 p. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/2a701673-en>.
- ALECRIM, A. M. E. **Bluetooth: o que é, como funciona e quais são versões da tecnologia?** 2023. Disponível em: <https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-bluetooth/>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- ALECRIM, E. **O que é NFC? (e como funciona)**. 2012. Disponível em: <https://www.infowester.com/nfc.php>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- ALLIANCE, L. LoRaWAN® specification v1. 1. **LoRa Alliance: Fremont, CA, USA**, 2017.
- ANATEL. **Anatel - Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017**. 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936--resolucao-680>. Acesso em: 8 mai. 2022.
- ANATEL. **Ato nº 14448, de 04 de dezembro de 2017**. 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448>. Acesso em: 8 mai. 2022.
- ANDREZ, R. P.; HODGSON, E. A.; KRAUSS, R. Desafios na implementação de uma rede lorawan em cidades inteligentes. **XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**, 2022. Disponível em: <https://11nq.com/28V7A>. Acesso em: 10 set, 2023.
- ARCGIS, W. A. **Mapa de Iluminação Pública do Paraná**. 2023. Copel Distribuição. Disponível em: <https://www.copel.com/portaldis/apps/webappviewer/index.html>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- AVSYSTEM. **What is LTE-M?** 2020. Disponível em: <https://www.avsystem.com/blog/LTE-M/>. Acesso em: 14 mai. 2022.
- AYOUB, W. *et al.* Internet of mobile things: Overview of lorawan, dash7, and nb-iot in lpwans standards and supported mobility. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 21, n. 2, p. 1561–1581, 2019.
- BERNADES, D. M.; CELESTE, W. C.; CHAVES, G. d. L. D. Eficiência energética na iluminação pública urbana: revisão bibliográfica dos equipamentos e tecnologias. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e606973957–e606973957, 2020.
- BRAGA, A. M. L. **O que é 4G LTE? Entenda como funciona a quarta geração de redes móveis no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://tecnoblog.net/responde/lte-4g-como-funciona/>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- CAMPOS, M. **Crise energética no Brasil**. 2021. Mundo Educação. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/crise-energetica-no-brasil.htm>. Acesso em: 30 Jul. 2023.
- CHALACAN, V. H. L. Performance evaluation of long range (lora) wireless rf technology for the internet of things (iot) using dragino lora at 915 mhz. **UNF Graduate Theses and Dissertations. 986**, 2020. Disponível em: <https://digitalcommons.unf.edu/etd/986>.
- CRUZ, O. A. R. da; RAMOS, D. C. Avaliação da comunicação lora no controle de um robô móvel. *In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 1, n. 1.

- EMBRATEL. **Entenda o que é NB-IoT e LTE-M, redes dedicadas a projetos de IoT**. 2019. Embratel. Disponível em: <https://proximonivel.embratel.com.br/entenda-o-que-e-nb-iot-e-lte-m-redes-dedicadas-a-projetos-de-iot/>. Acesso em: 21 abr. 2022.
- ENERGETICA, E. de P. **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 28 mar. 2022.
- FREDERICO, C. d. A. *et al.* Projeto de equipamento de monitoramento de umidade do solo com comunicação lora. Florianópolis, SC, 2022.
- FREITAS, C. M. **Protocolo Modbus: Fundamentos e Aplicações**. 2014. Disponível em: <https://embarcados.com.br/protocolo-modbus/>. Acesso em: 06 dez. 2023.
- GINANJAR, S. *et al.* An internet of things architecture for real-time tide and wave monitoring using heltec lora 32 and kalman filter. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**, Springer, v. 9, n. 2, p. 219–231, 2023.
- JAGADEESH, Y. *et al.* Intelligent street lights. **Procedia Technology**, Elsevier, v. 21, p. 547–551, 2015.
- JUNIOR, J. C. d. M. V. **Introdução à Eficiência Energética**. [S.l.], 2017. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4226465/mod_resource/content/2/SEL0437_Aula01_Introducao_2018.pdf. Acesso em: 28 mar. 2022.
- LAI, C. S. *et al.* A review of technical standards for smart cities. **Clean Technologies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 2, n. 3, p. 290–310, 2020.
- LI, X.-X.; ZHU, Y.-W.; WANG, J. Efficient encrypted data comparison through a hybrid method. **Journal of Information Science & Engineering**, v. 33, n. 4, 2017.
- LINO, B. **ABINC e CABASE assinam acordo de cooperação para integrar o sistema de IoT entre Brasil e Argentina**. 2019. Disponível em: <https://l1nq.com/jNG1R>. Acesso em: 08 mai. 2022.
- MUTALIB, H. **LoRa Gateway Setup for RHF0M301 Raspberry Pi with Basic Station**. 2021. Disponível em: <https://www.cytron.io/tutorial/lora-gateway-setup-for-rhf0m301-raspberry-pi-with-basic-station>. Acesso em: 16 abr. 2023.
- NETO, W. S. **Iluminação Pública**. [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/iluminacao-publica.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2022.
- OLIVEIRA, L. R. de; CONCEIÇÃO, A. F. da; NETO, L. P. Revisão sistemática da literatura sobre aplicações das tecnologias lora e lorawan. **Anais Estendidos do VIII Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais**, SBC, 2018.
- PACHECO, L. F. L. Questões relevantes sobre a iluminação pública no brasil. **Revista de Administração Municipal - IBAM**, v. 278, 2018.
- PEREIRA, L. M. Iluminação pública: efficientização das luminárias. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2021.
- PÉREZ-TRUJILLO, C. *et al.* Cobertura de la claridad de fresnel en lora iot coverage of fresnel clarity in lora iot. 2022.
- QAHTAN, M. H.; MOHAMMED, E. A.; ALI, A. J. Iot-based electrical vehicle's energy management and monitoring system. **Open Access Library Journal**, Scientific Research Publishing, v. 9, n. 7, p. 1–15, 2022.

RATLIFF, L. Unlocking captive value: Lpwan enables emerging iot applications. **lora-alliance.org/sites/default/files/2019-07/ihsmarkit_berlin**, 2019.

RESEARCH, S. C. **The Internet of Things (IoT): AnOverview**. 2020. Disponível em: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11239>. Acesso em: 16 abr. 2022.

ROSSATO, J.; CAMARGO, E. Implantação e avaliação de uma rede lorawanna utfpr-câmpus toledo. **Trabalho de Conclusão de Curso, Tec. Sistemas para Internet, UTFPR, Toledo, Brasil**, 2019.

SALGADO, N. C. **Sistema de controle de iluminação pública utilizando comunicações LoRaWAN**. 2019. Tese (Doutorado), 2019.

SEMTECH, C. **LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview**. [S.l.]: Semtech Corporation, 2019.

SIGFOX. **Sigfox Technical Overview**. 2017. Disponível em: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2022.

SIGFOX. 2022. Disponível em: <https://www.sigfox.com/en>. Acesso em: 21 abr. 2022.

TELECO. **Redes Sem Fio: Comparação entre os Protocolos**. 2012. Disponível em: [https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredespaid/pagina_6.asp#:~:text=O%20protocolo%20ZigBee%20tem%20alcance,baterias%20comuns%20\(pilhas%20AA](https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredespaid/pagina_6.asp#:~:text=O%20protocolo%20ZigBee%20tem%20alcance,baterias%20comuns%20(pilhas%20AA). Acesso em: 06 dez. 2023.

TELECO. **Comunicação Via Satélite: Vsat**. 2018. Disponível em: https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialsatcom/pagina_4.asp#:~:text=A%20dist%C3%A2ncia%20m%C3%A1xima%20que%20a,de%2050%20a%20100%20metros. Acesso em: 06 dez. 2023.

THE THINGS NETWORK. 2022. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/>.

ULLAH, Z. *et al.* Applications of artificial intelligence and machine learning in smart cities. **Computer Communications**, Elsevier, v. 154, p. 313–323, 2020.

ZHUHADAR, L. *et al.* The next wave of innovation—review of smart cities intelligent operation systems. **Computers in Human Behavior**, Elsevier, v. 66, p. 273–281, 2017.

APÊNDICE A – Código embarcado no Heltec LoRa 32

Listagem 1 - Código embarcado no Heltec LoRa 32

```

1 #include <lmic.h>
2 #include <hal/hal.h>
3 #include <SPI.h>
4 #include <Wire.h>
5 #include "RTCLib.h"
6
7 // LoRaWAN NwksKey, chave de sessão de rede em MSB
8 static const PROGMEM u1_t NWKSKEY[16] = {0xF1, 0xC5, 0x52, 0xA2, 0
    xE6, 0xEA, 0xE1, 0x89, 0xF9, 0xC2, 0x6A, 0x19, 0xF9, 0xD8, 0xC8,
    0x50};
9
10 // LoRaWAN AppSKey, chave de sessão do aplicativo em MSB
11 static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = {0xBF, 0x0A, 0x6E, 0x5A, 0
    xBB, 0x46, 0x23, 0xB6, 0xFA, 0x7C, 0x31, 0x55, 0xD3, 0x6C, 0xCA,
    0xAA};
12
13 // Endereço do dispositivo final LoRaWAN (DevAddr) em MSB
14 static const u4_t DEVADDR = 0x260CB260; // <-- Altere este endereço
    para cada nó!
15
16 void os_getArtEui(u1_t *buf) {} //armazena em um buffer de 8 bytes e
    passa como argumento
17 void os_getDevEui(u1_t *buf) {}
18 void os_getDevKey(u1_t *buf) {}
19
20 static uint8_t mydata[] = "11010110011100100001001100011011"; //<- n
    úmero de 32 bits
21 static osjob_t sendjob; // <-
    agenda tarefas e interrupções no sistema LoRaWAN
22
23 // Agendar TX a cada X segundos (pode se tornar mais longo devido às
    limitações do ciclo de trabalho).

```

```
24 const unsigned TX_INTERVAL = 3;
25
26 // Mapeamento de pinos p/ HELTEC LoRa 32
27 const lmic_pinmap lmic_pins = {
28     .nss = 18,
29     .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
30     .rst = 14,
31     .dio = { /*dio0*/ 26, /*dio1*/ 35, /*dio2*/ 34 }
32 };
33
34 void do_sleep(osjob_t *j){
35     // Configura o tempo para o próximo envio
36     os_setTimedCallback(&sendjob, os_getTime() + sec2osticks(
37         TX_INTERVAL), do_send);
38     // Calcula quanto tempo falta para o próximo envio
39     uint32_t sleep_time = TX_INTERVAL * 1000000 - micros();
40     // Verifica se o tempo de sono é maior que zero
41     if (sleep_time > 0){
42         // Configura o dispositivo para acordar após o tempo de sono
43         esp_sleep_enable_timer_wakeup(sleep_time);
44         // Configura o dispositivo para acordar após o tempo de sono
45         esp_deep_sleep_start();
46     }
47 }
48
49 void onEvent(ev_t ev){
50     Serial.print(os_getTime());
51     Serial.print(": ");
52     switch (ev) {
53         case EV_SCAN_TIMEOUT:
54             Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
55             break;
56         case EV_BEACON_FOUND:
```

```
56     Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
57     break;
58 case EV_BEACON_MISSED:
59     Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
60     break;
61 case EV_BEACON_TRACKED:
62     Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
63     break;
64 case EV_JOINING:
65     Serial.println(F("EV_JOINING"));
66     break;
67 case EV_JOINED:
68     Serial.println(F("EV_JOINED"));
69     break;
70 case EV_JOIN_FAILED:
71     Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
72     break;
73 case EV_REJOIN_FAILED:
74     Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));
75     break;
76 case EV_TXCOMPLETE:
77     Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (Incluindo janelas de espera
78 RX)"));
79     if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
80         Serial.println(F("Received ack"));
81     if (LMIC.dataLen) {
82         Serial.println(F("Received "));
83         Serial.println(LMIC.dataLen);
84         Serial.println(F(" bytes of payload"));
85     }
86     // Agendar próxima transmissão ou colocar em modo de hibernação profunda
87     do_sleep(&sendjob);
```

```
87     break;
88 case EV_LOST_TSYNC:
89     Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
90     break;
91 case EV_RESET:
92     Serial.println(F("EV_RESET"));
93     break;
94 case EV_RXCOMPLETE:
95     // data received in ping slot
96     Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
97     break;
98 case EV_LINK_DEAD:
99     Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
100    break;
101 case EV_LINK_ALIVE:
102     Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
103     break;
104 case EV_TXSTART:
105     Serial.println(F("EV_TXSTART"));
106     break;
107 case EV_TXCANCELED:
108     Serial.println(F("EV_TXCANCELED"));
109     break;
110 case EV_RXSTART:
111     break;
112 case EV_JOIN_TXCOMPLETE:
113     Serial.println(F("EV_JOIN_TXCOMPLETE: no JoinAccept"));
114     break;
115 default:
116     Serial.print(F("Unknown event: "));
117     Serial.println((unsigned)ev);
118     break;
119 }
```

```
120 }
121
122 void do_send(osjob_t *j){
123     // Verifica se não há um trabalho TX/RX atual em execução
124     if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND)    {
125         Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not sending"));
126     }
127     else{
128         // Prepare a transmissão de dados upstream no próximo momento
129         // possível.
130         LMIC_setTxData2(1, mydata, sizeof(mydata) - 1);
131         unsigned long sentTime = millis();
132     }
133 }
134
135 void setup() {
136     Wire.begin();
137     if (! rtc.isrunning() ) {
138         Serial.println("O módulo RTC não está sendo executado!
139         Configurando...");
140         rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
141     }
142     while (!Serial); // espera a Serial ser inicializada
143     Serial.begin(115200);
144     delay(100);
145     Serial.println(F("Starting"));
146     //Define VCC High e espera um segundo pra inicializar
147     #ifdef VCC_ENABLE
148         pinMode(VCC_ENABLE, OUTPUT);
149         digitalWrite(VCC_ENABLE, HIGH);
150         delay(1000);
151     #endif
152 }
```

```
151 // Inicialização do OS
152 os_init();
153 // Reset na biblioteca LMIC
154 LMIC_reset();
155
156 #ifdef PROGMEM
157     uint8_t appskey[sizeof(APPSKEY)];
158     uint8_t nwkskey[sizeof(NWKSKEY)];
159     memcpy_P(appskey, APPSKEY, sizeof(APPSKEY));
160     memcpy_P(nwkskey, NWKSKEY, sizeof(NWKSKEY));
161     LMIC_setSession(0x13, DEVADDR, nwkskey, appskey);
162 #else
163     LMIC_setSession(0x13, DEVADDR, NWKSKEY, APPSKEY);
164 #endif
165
166 #if defined(CFG_us915) || defined(CFG_au915)
167     // Os canais 0-71 NA-US e AU são configurados automaticamente
168     LMIC_selectSubBand(1);
169 #else
170 #error Region not supported
171 #endif
172
173 // Desativa a validação de verificação de link
174 LMIC_setLinkCheckMode(0);
175 // TTN usa SF9 para sua janela RX2.
176 LMIC.dn2Dr = DR_SF9;
177 // Definir taxa de dados e a potência de transmissão para uplink
178 LMIC_setDrTxpow(DR_SF7, 27);
179
180 // Inicia o trabalho
181 do_send(&sendjob);
182 }
183
```

```
184 void loop() {  
185     unsigned long now;  
186     now = millis();  
187     if ((now & 512) != 0) {  
188         digitalWrite(13, HIGH);  
189     }  
190     else {  
191         digitalWrite(13, LOW);  
192     }  
193     os_runloop_once();  
194 }
```

Fonte: Aatoria Própria (2023)

**APÊNDICE B – Repositório contendo os arquivos de configuração e
filtragem de dados utilizados neste trabalho**

O repositório pode ser acessado em: <https://github.com/rpandrez/tcc2>.