



Universidade Federal do Amazonas
Instituto de Computação
Programa de Pós-Graduação em Informática

Tecnologias LPWAN Aplicadas a IoT para Monitoramento de Corpos Hídricos na Floresta Amazônica

Rafael Castilho Carvalho

Manaus-AM, Fevereiro/2024

Rafael Castilho Carvalho

Tecnologias LPWAN Aplicadas a IoT para Monitoramento de Corpos Hídricos na Floresta Amazônica

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática do Instituto de Computação da Universidade Federal do Amazonas, Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Informática.

Orientador: Prof. Dr. Edjair de Souza Mota

Manaus-AM
Fevereiro/2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

C331t Carvalho, Rafael Castilho
Tecnologias LPWAN Aplicadas a IoT para Monitoramento de
Corpos Hídricos na Floresta Amazônica / Rafael Castilho Carvalho .
2024
51 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Edjair de Souza Mota
Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do
Amazonas.

1. lot. 2. Environmental monitoring. 3. lora. 4. lpwan. I. Mota,
Edjair de Souza. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Informática

FOLHA DE APROVAÇÃO

"TECNOLOGIAS LPWAN APLICADAS A IOT PARA MONITORAMENTO DE CORPOS HÍDRICOS NA FLORESTA AMAZÔNICA"

RAFAEL CASTILHO CARVALHO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Edjair de Souza Mota - PRESIDENTE

Prof. Dr. Horácio Antônio Braga Fernandes de Oliveira - MEMBRO INTERNO

Prof. Dr. Celso Barbosa Carvalho - MEMBRO EXTERNO

Manaus, 13 de março de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Edjair de Souza Mota, Professor do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 05:51, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Horácio Antônio Braga Fernandes de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 25/04/2024, às 16:46, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Celso Barbosa Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 03/05/2024, às 19:45, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1958962** e o código CRC **8F91D1F3**.

Avenida General Rodrigo Octávio, 6200 - Bairro Coroado I Campus Universitário
Senador Arthur Virgílio Filho, Setor Norte - Telefone: (92) 3305-1181 / Ramal 1193
CEP 69080-900, Manaus/AM, coordenadorppgi@icomp.ufam.edu.br

Referência: Processo nº 23105.010975/2024-59

SEI nº 1958962

Dedico esse trabalho a minha família, que me deu suporte, aos meus amigos, Larissa e Gabriel, que me auxiliaram na pesquisa e meu orientador, que tornou tudo isso possível.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES-PROEX) - Código de Financiamento 001. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM – por meio do projeto POSGRAD 22-23.

“Até mais, e obrigado pelos peixes.”
(Adams, Douglas)

Lista de ilustrações

Figura 1 – Arduino Uno.	5
Figura 2 – Raspberry Pi 3 modelo B+.	6
Figura 3 – Representação do sinal enviado com CSS e comparação dos fatores de espalhamento LoRa. Retirada de (KIM; LEE; KIM, 2019)	10
Figura 4 – Representação das Zonas de Fresnel, retirado de (ELSIST.BIZ, 2023).	12
Figura 5 – Diagrama da primeira topologia proposta.	17
Figura 6 – Diagrama da segunda topologia proposta.	18
Figura 7 – Dragino LoRa <i>Shield</i> para Arduino	19
Figura 8 – Sensor de turbidez, ST100.	20
Figura 9 – Sensor de Ph, PH-4502C.	20
Figura 10 – Sensor de condutividade da água, TDS meter V1.0.	20
Figura 11 – Sensor de temperatura, NTC 10K MF58 - sonda à prova d'água.	21
Figura 12 – Diagrama do nó sensor.	21
Figura 13 – Dragino LoRa/GPS <i>Hat</i> para Raspberry Pi.	22
Figura 14 – Diagrama do <i>gateway</i>	22
Figura 15 – Diagrama da estação de transmissão.	23
Figura 16 – Modulo de sensores, com antena e todos os sensores conectados.	24
Figura 17 – Modulo <i>gateway</i> , com antena conectada.	25
Figura 18 – Modulo estação de transmissão, com antena conectada.	25
Figura 19 – Localização onde o experimento preliminar foi realizado.	26
Figura 20 – PDR para diferentes combinações SF e CR.	28
Figura 21 – RSSI para diferentes combinações SF e CR.	29
Figura 22 – Tempo de Transmissão por pacote para diferentes combinações SF e CR.	30

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros experimentais fixados.	27
Tabela 2 – PDR para diferentes combinações SF e CR.	37
Tabela 3 – RSSI para diferentes combinações SF e CR.	37
Tabela 4 – Tempo de Transmissão por pacote para diferentes combinações SF e CR.	38

Lista de abreviaturas e siglas

UFAM	Universidade Federal do Amazonas
FACED	Faculdade de Educação
CPU	Central Processing Unit (Unidade de Processamento Central)
RAM	Random Access Memory (Memória de Acesso Randômico)
USB	Universal Serial Bus (Porta Universal Serial)
ARM	Advanced RISC Machine (Máquina RISC Avançada)
CSS	Chirp Spread Spectrum (Espalhamento Espectral de Chirp)
FSK	Frequency-Shift Keying (Modulação de Chaveamento de Frequência)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
RSSI	Received Signal Strength Indication (Indicador de Força de Sinal Recebido)
LPWAN	Low Power Wide Area Networks (Redes de Baixa Potência e Ampla Cobertura)
LoRa	Long Range (Longo Alcance)
SF	Spreading Factor (Fator de Espalhamento)
CR	Coding Rate (Taxa de Codificação)
PDR	Package Delivery Rate (Taxa de Entrega de Pacotes)

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo Geral	2
1.1.1	Objetivos Específicos	2
1.2	Metodologia	3
1.3	Organização do Trabalho	3
2	Referencial Teórico	4
2.1	Microcontroladores e Computadores de Placa Única	4
2.1.1	Arduino	4
2.1.2	Raspberry Pi	5
2.2	Internet das Coisas	5
2.3	Antenas	7
2.4	Tecnologias de Transmissão Sem Fio	8
2.4.1	LoRa	8
2.4.2	Determinantes de Desempenho do LoRa	9
2.5	Fenômenos de Propagação	11
2.5.1	Reflexão	11
2.5.2	Difração	11
2.5.3	Dispersão	11
2.5.4	Zonas de Fresnel	12
2.6	Monitoramento de Corpos Hídricos	12
2.7	Trabalhos Relacionados	13
2.8	Discussão	16
3	Sistema Implementado	17
3.1	Topologia de Rede	17
3.1.1	Primeira Topologia	17
3.1.2	Segunda Topologia	18
3.2	O Hardware	18
3.2.1	Sensores	19
3.2.2	Gateway	20
3.2.3	Estação de Transmissão	22
4	Resultados	24
4.1	Implementação dos Sensores	24
4.2	Implementação do <i>Gateway</i>	24
4.3	Implementação da Estação de Transmissão	25
4.4	Experimentos	26
5	Considerações Finais	31

Referências	32
Apêndices	36
APÊNDICE A Tabelas de Resultados	37

1 Introdução

A Amazônia, com uma extensão de 6,5 milhões de quilômetros quadrados, representa uma vasta área de floresta tropical úmida que abrange mais da metade das florestas tropicais do planeta. Sua influência é notável nas interações entre a superfície terrestre e a atmosfera, desempenhando um papel fundamental nas trocas de energia, umidade e massa. Essa região exerce impacto direto no clima global, exercendo um papel essencial nas interações energéticas, na regulação da umidade e na dinâmica de massa. Suas contribuições incluem o armazenamento e absorção de carbono da atmosfera, o transporte de gases e vapores de água para áreas remotas e, sobretudo, a reciclagem de precipitações, fator de extrema relevância para os ecossistemas. (ROCHA; CORREIA; GOMES, 2019).

O ciclo hidrológico amazônico exerce influência significativa em áreas além de seu próprio domínio, destacando a bacia amazônica como um importante captador de umidade. Ela absorve vapor d'água tanto do oceano quanto da própria floresta, servindo como fonte crucial de umidade para as regiões central, sudeste e sul do Brasil, além de outros países da América do Sul (ROCHA; CORREIA; GOMES, 2019).

As modificações antrópicas, causadas pela presença humana, em grande escala na Amazônia, têm impactos notáveis nos processos operados por essa região, e a água de uma bacia hidrográfica emerge como um indicador de biodiversidade, permeando todo o ciclo dos ecossistemas interligados. Como recurso vital, a vigilância da qualidade da água pode revelar a correlação entre a degradação hídrica e as atividades humanas, como desmatamento e poluição (ZIEGLER, 2018; SILVA et al., 2018).

Embora essencial para a preservação do bioma amazônico, realizar o monitoramento ecológico é uma tarefa custosa. A complexidade é acentuada pelo desafio logístico intrínseco aos biomas, como o da floresta Amazônica, envolvendo deslocamentos de alto custo e baixa segurança, tanto para equipamentos quanto para o corpo técnico. Além disso, há as dificuldades de acesso a locais remotos e o impacto antrópico resultante desse acesso a regiões pouco habitadas. Adicionalmente, para atingir a quantidade necessária de medições, são requeridas várias incursões sob mesmas condições. Em resumo, o monitoramento ambiental apresenta elevados custos operacionais, com uma cobertura espacial e temporal ineficiente.

Recentemente, houve propostas de soluções para o monitoramento por meio de sensores e Internet das Coisas (IoT) (LAMBROU; PANAYIOTOU; ANASTASIOU, 2012; KAMALUDIN; ISMAIL, 2017). A utilização de processos automatizados por meio da IoT reduz os custos associados a recursos econômicos e humanos. Esse sistema assegura a obtenção de informações ambientais altamente precisas, possibilitando análises em tempo

real. Isso, por sua vez, viabiliza a criação de modelos ecológicos e pesquisas mais alinhadas com a realidade, conferindo aos tomadores de decisão a capacidade de reagir prontamente a emergências. Essa abordagem permite a formulação de políticas eficazes e aprimora a proteção ambiental, bem como os esforços de restauração ecológica.

Apesar das soluções implementadas, o monitoramento ainda enfrenta desafios, considerando outros fatores, como a densidade da cobertura florestal e as características da folhagem, que podem atenuar o sinal enviado pelos sensores. Para superar esse obstáculo, o presente estudo adotou a tecnologia LoRa (Long Range), conhecida por sua capacidade de efetuar transmissões robustas mesmo em ambientes densamente arborizados ([ANSAH et al., 2020](#)). Essa escolha é respaldada pelo baixo consumo de energia do LoRa, uma característica crucial dada a ausência frequente de fontes confiáveis de energia na floresta. O LoRa foi utilizado no desenvolvimento de um protótipo para o monitoramento hídrico utilizando a IoT.

1.1 Objetivo Geral

- A criação de um protótipo para monitoramento remoto de corpos hídricos através da análise de parâmetros como pH, turbidez, temperatura e condutividade.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Criação de um protótipo de sensor usando a plataforma Arduino, que será responsável por coletar os dados através dos sensores e transmiti-los via LoRa;
- Criação de um protótipo de *gateway* usando a plataforma Raspberry Pi, que estará conectado a uma fonte de energia elétrica e será responsável por encaminhar para a Internet as informações coletadas;
- Criação de um protótipo de estação de retransmissão usando a plataforma Arduino, que será responsável por receber pacotes dos sensores, combinar e retransmitir para o *gateway* os dados capturados pelos sensores;
- Pesquisar, implementar e avaliar estratégia para aumentar o alcance da comunicação entre sensores e *gateway*;
- Testar os protótipos em um corpo hídrico, auxiliando as pesquisas do Laboratório de Análises de Água e Qualidade Ambiental (LAQUA) do departamento de química da UFAM;

1.2 Metodologia

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foram propostas e avaliadas duas topologias de rede, discutidas no Capítulo 3. Essas topologias servirão para garantir a confiabilidade e o alcance das transmissões a serem feitas pelos componentes deste sistema. Para avaliar as topologias usaremos o indicador de força de sinal recebido (RSSI) e a quantidade de pacotes recebidos, duas medidas que mostram a qualidade do sinal recebido e a efetividade da comunicação.

Neste trabalho, também, foram construídos os protótipos propostos, sendo eles os nós sensores, a estação de retransmissão de dados e o *gateway*. A construção destes componentes está descrita na Seção 3.2.

1.3 Organização do Trabalho

Neste trabalho são discutidos trabalhos semelhantes e os principais problemas a serem solucionados, pelos protótipos propostos, durante o referencial teórico (capítulo 2). Em seguida, são discutidos cada um dos protótipos construídos, o hardware escolhido e a montagem (capítulo 3). Então, são mostrados os experimentos feitos com estes protótipos e seus resultados (capítulo 4). Por fim são expostas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros que pretendam estender estes resultados (capítulo 5).

2 Referencial Teórico

Neste capítulo são abordadas as principais tecnologias que dão suporte a este trabalho, bem como alguns trabalhos semelhantes, discutindo as tecnologias usadas e seus resultados.

2.1 Microcontroladores e Computadores de Placa Única

Os microcontroladores são circuitos integrados que incorporam os elementos fundamentais de um computador, como memória, CPU e portas de comunicação. Para gerenciar a coleta de dados dos sensores e orquestrar o envio dessas informações, é essencial contar com um componente que coordene essas tarefas. Diversos tipos de microcontroladores estão disponíveis, cada um projetado com um propósito específico. Neste trabalho, será usado a plataforma Arduino para supervisionar a aquisição e transmissão de informações.

Computadores de placa única são dispositivos que incorporam todos os elementos essenciais de um computador, incluindo microprocessador, RAM e portas de entrada e saída. Esses circuitos têm a capacidade de realizar tarefas mais complexas do que os microcontroladores mencionados anteriormente. Neste projeto, é usado o computador de placa única Raspberry Pi como o gateway, encarregado de receber informações dos sensores, processá-las e transmitir os dados pela internet.

2.1.1 Arduino

Arduino é uma família de microcontroladores de código aberto. Neste projeto, foi utilizado o Arduino Uno que se destaca pela sua acessibilidade e versatilidade. Esse microcontrolador é baseado no chip ATmega328P e apresenta 20 pinos de entrada e saída, sendo 14 digitais e 6 analógicos. Este microcontrolador pode ser programado por meio de sua interface USB e utilizando o software Arduino IDE. Esse software possibilita que o usuário escreva código em uma versão do C++, com algumas classes e funções específicas predefinidas para a plataforma Arduino. Posteriormente, o código é compilado e incorporado no controlador alvo ([ARDUINO... , 2005](#)). A figura 1 ilustra um Arduino Uno.

O Arduino Uno foi considerado adequado as necessidades desse trabalho. Suportando uma abundância de módulos que ampliam suas funcionalidades, tais como comunicação, memória de armazenamento, e acesso a sensores. Neste trabalho, esse componente é usado no controle dos sensores e das estações de transmissão.

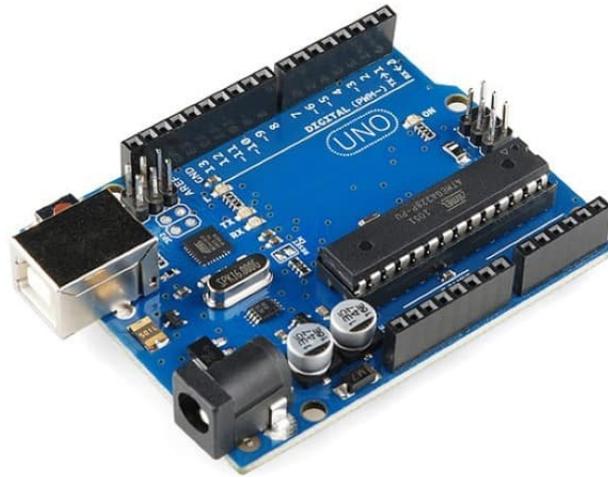


Figura 1 – Arduino Uno.

2.1.2 Raspberry Pi

O Raspberry Pi é um computador de placa única que integra processador, memória RAM e diversas entradas e saídas, incluindo USB, HDMI, Ethernet e um conector denominado "J8 header", com 40 pinos para alimentação e comunicação com sensores e outros módulos. Ele pode ser utilizado com os mesmos módulos de transmissão compatíveis com a plataforma Arduino discutida anteriormente. Existem várias versões dessa plataforma, sendo a versão 3B+ a escolhida para este projeto. Essa versão incorpora o chip Broadcom BCM2837 quad-core ARM Cortex-A53, operando a uma frequência de 1,4 GHz, e inclui conectividade Wi-Fi embutida (RASPBERRY..., 2012). A figura 2 ilustra um Raspberry Pi 3 modelo B+.

Em comparação com o Arduino Uno, este controlador possui maior poder computacional, tornando-se compatível para realizar tarefas mais complexas, como processar dados dos sensores, organizá-los e armazená-los na nuvem. Neste trabalho, este componente é usado para a construção do *gateway*.

2.2 Internet das Coisas

A Internet das Coisas, ou IoT, refere-se à interconexão de sensores e atuadores por meio de dispositivos em uma rede. Essa terminologia abrange uma variedade de aplicações, como residências inteligentes (Smart Home), cidades inteligentes (Smart Cities) e sistemas de monitoramento remoto, sendo amplamente adotada na automação industrial. Os dispositivos IoT estão cada vez mais presentes e versáteis. Atualmente, esses sensores podem empregar modelos avançados de aprendizado de máquina para identificar pessoas e

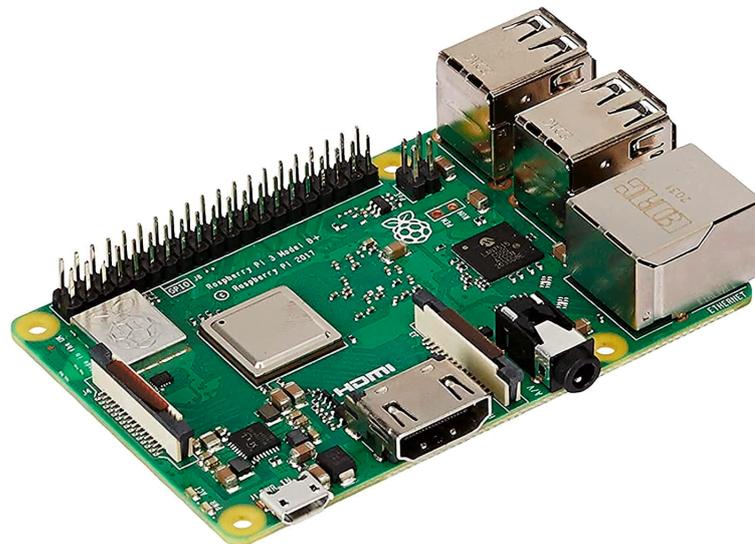


Figura 2 – Raspberry Pi 3 modelo B+.

objetos em tempo real por meio de câmeras, enquanto outros executam ações personalizadas com base em dados capturados. Outros exemplos de uso incluem abrir cortinas durante o dia, acender uma lâmpada ao detectar movimento em um quarto, ou realizar rotinas diárias coordenadas entre diversos dispositivos conectados a um celular, ou outros dispositivos (KUMAR; TIWARI; ZYMBLER, 2019).

Apesar de suas vantagens, a tecnologia IoT ainda apresenta desafios que requerem um planejamento cuidadoso da disposição dos dispositivos a serem conectados e do método de comunicação a ser adotado. Este trabalho delinea tal planejamento, visando desenvolver um sistema IoT sem fio capaz de superar as adversidades do ambiente em que será implementado, assim como as limitações intrínsecas à tecnologia.

Dispositivos que utilizam canais sem fio enfrentam desafios consideráveis, especialmente quando obstáculos como paredes espessas ou vegetação densa podem interferir na propagação das ondas, restringindo a eficácia da comunicação. Além disso, tecnologias menos suscetíveis a esses obstáculos muitas vezes operam em taxas de transmissão mais baixas, o que pode representar uma limitação para aplicações específicas.

Outro aspecto a ser considerado é o consumo de energia desses dispositivos, uma vez que muitos deles dependem de baterias devido à sua natureza móvel ou aos ambientes em que estão inseridos. Para garantir eficiência, a escolha de como o dispositivo utiliza a energia disponível e as dimensões da bateria incorporadas precisam ser ponderadas.

Dispositivos com maior poder computacional consomem consideravelmente mais energia do que dispositivos mais simples, que, em alguns casos, podem executar a mesma tarefa de maneira mais eficiente. Dispositivos que demandam uma vida útil mais longa, sem acesso constante a uma fonte de energia, tendem geralmente a ser mais simplificados nesse aspecto.

No âmbito da proteção e preservação ecológica, diversas soluções baseadas em IoT foram desenvolvidas para monitoramento ambiental e hídrico. Trabalhos recentes destacam a tecnologia IoT como uma abordagem inteligente e de baixo custo para analisar a qualidade da água (OLATINWO; JOUBERT, 2019; WU; KHAN, 2019). Embora a tecnologia IoT ofereça vantagens, ela também enfrenta as limitações já mencionadas, além de outras, como a necessidade de uma conexão de rede versátil em áreas remotas desprovidas de comunicação comercial, a demanda por dispositivos mais resistentes e energeticamente duráveis, com mínimo impacto ambiental, entre outros desafios (OLATINWO; JOUBERT, 2019; WU; KHAN, 2019).

2.3 Antenas

A necessidade de comunicação entre dispositivos IoT e a internet nem sempre pode ser atendida por meio de cabos. Na IoT, é comum encontrar dispositivos pequenos instalados em locais remotos ou móveis, onde a passagem de cabos é inviável, ou cujo custo total de hardware é inferior ao valor necessário para a instalação de cabos. Por essa razão, as antenas desempenham um papel relevante no desenvolvimento dessas aplicações, sendo a escolha da antena particularmente vital para dispositivos destinados a operar em ambientes como florestas, onde o sinal é significativamente prejudicado pela vegetação.

As antenas podem variar em tamanho, desde modelos extremamente compactos, integrados diretamente nos circuitos do dispositivo, até estruturas imponentes, como as torres de celular. Elas podem ser omnidirecionais, distribuindo o sinal em todas as direções, ou direcionais, concentrando o sinal em uma única direção. Antenas direcionais, ao focar o sinal, conseguem transmitir com maior potência, mas demandam alinhamento preciso para funcionar adequadamente. Já as antenas omnidirecionais são mais versáteis, podendo ser usadas em dispositivos em movimento ou em áreas onde o alinhamento preciso não é possível.

Cada antena possui uma faixa de frequência ideal, onde a onda emitida e os atributos físicos da antena não interferem mutuamente. Utilizar uma antena inadequada para as frequências transmitidas pode resultar em problemas de impedância, onde a própria antena oferece resistência ao fluxo elétrico, causando perda de potência.

O ganho de uma antena é uma medida de sua capacidade de concentrar o sinal em uma direção em comparação com uma antena isotrópica ideal, que transmite o sinal

perfeitamente em todas as direções. Esse ganho é medido em decibéis isotrópicos (dBi). Antenas omnidirecionais apresentam geralmente ganho positivo em todas as direções horizontais, enquanto as antenas direcionais têm ganho positivo apenas em uma direção específica.

2.4 Tecnologias de Transmissão Sem Fio

Diversas tecnologias e protocolos para transmissão sem fio estão cada vez mais presentes, sendo amplamente adotados. A maioria dos computadores já incorpora antenas *Wi-Fi* e *Bluetooth* de fábrica, enquanto os telefones com fio tornaram-se quase obsoletos. Contudo, à medida que cada método de comunicação sem fio atual apresenta suas vantagens e desvantagens, novas tecnologias surgem para resolver necessidades, proporcionando uma comunicação mais eficiente. A escolha da forma mais eficaz de comunicação exige conhecimento técnico, observação de vários fatores, como a quantidade de dados transmitida, o consumo energético e o nível de confiabilidade necessário e outros.

Neste trabalho, são investigadas as tecnologias LPWAN (*Low Power Wide Area Networks* ou redes de baixa potência e longo alcance). Essas tecnologias possuem amplo alcance, podendo chegar a 5 km, determinado pelo uso de frequências mais baixas (abaixo de 1Ghz), fazendo espalhamento espectral e, assim, minimizando o impacto das interferências (paredes ou vegetação) entre o transmissor e o receptor. Apesar disso, a desvantagem dessas tecnologias são as taxas de transmissão mais baixas, o que é impeditivo para aplicações que transmitam arquivos como vídeo, áudio ou imagens. Neste trabalho, a tecnologia LPWAN LoRa é o foco da pesquisa, pois é mais barata e mais adequada para o cenário alvo, conforme os trabalhos discutidos em 2.7.

2.4.1 LoRa

LoRa (Long Range) é uma tecnologia de comunicação sem fio desenvolvida e patentada pela empresa Semtech, sendo promovida pela LoRa® Alliance (LORAWAN, 2015). Essa tecnologia se destaca pela sua camada física ou modulação exclusiva, integrada a um protocolo aberto de comunicação denominado LoRaWAN, projetado especificamente para ser utilizado na rede LoRa.

A modulação do LoRa emprega o método de espalhamento espectral conhecido como *Chirp Spread Spectrum* (CSS), inicialmente desenvolvido para aplicações de radar e amplamente utilizado em contextos militares e espaciais. Essa técnica de codificação para transmissão digital de sinais utiliza uma abordagem de espalhamento do sinal no espectro de frequência, gerando um sinal de portadora denominado “*chirp*”. Os *chirps* são pulsos de radar comprimidos de alta intensidade, caracterizados por uma amplitude constante, que varrem toda a largura de banda. Essa variação ocorre linearmente ao longo de um

determinado intervalo de tempo, sendo referida como *Up-chirp* (aumento da frequência) ou *Down-chirp* (diminuição da frequência).

A modulação CSS adapta a taxa de transmissão com base na sensibilidade nos receptores, mantendo a mesma largura de banda por canal e utilizando três parâmetros-chave da modulação. É importante notar que a modulação do espectro de propagação “*chirp*” preserva características semelhantes às da modulação de chaveamento de frequência *Frequency Shifting Keying* (FSK). Essa semelhança torna a modulação eficaz para operar em baixas potências e ampliar significativamente o alcance do sinal propagado (CUNHA, 2021).

A tecnologia LoRa permite personalizar a comunicação através dos parâmetros *Spread Factor* (SF) e *Coding Rate* (CR):

O primeiro parâmetro define a quantidade de *chirps* enviados por segundo. As especificações da tecnologia definem seis valores de SF, variando entre 7 e 12. Aumentar o valor de SF aumenta a duração dos símbolos, com isso, aumentando a sensibilidade do receptor, o alcance do sinal e o consumo energético, ao mesmo tempo, diminuindo a taxa de bits transmitidos.

Já o segundo parâmetro define a quantidade de bits separados para redundância na mensagem. As especificações da tecnologia definem quatro valores de CR, variando entre 5 e 8, quanto maior for esse valor de CR, maior a proteção contra perda de dados. Vale ressaltar que esses valores de CR são convertidos através da fórmula $CR = \frac{4}{cr}$, $cr \in \{5, 6, 7, 8\}$, alguns autores costumam usar os valores convertidos em fração para definir CR, enquanto outros optam pelos valores inteiros para serem mais concisos. Este trabalho opta pelos valores inteiros, visando manter a consistência com as bibliotecas de *software* utilizadas.

A figura 3 demonstra como um símbolo LoRa é modulado sobre um *up-chirp* e compara os diferentes valores de SF.

Alguns trabalhos usando o LoRa são: (OJO et al., 2021) que faz uma avaliação empírica dos parâmetros do LoRa e seus efeitos na transmissão, (TOVAR-SOTO et al., 2021) avalia a aplicação dessa tecnologia em fazendas, avaliando os efeitos da vegetação na transmissão em um raio de 500 m.

A tecnologia LoRa foi escolhida para esse trabalho por ser mais acessível e promissora, sendo usada em muitos trabalhos recentes e é adequado às necessidades de transmissão e de consumo energético deste projeto.

2.4.2 Determinantes de Desempenho do LoRa

Existem diversos determinantes de desempenho de comunicação no contexto do LoRa, sendo dois deles particularmente relevantes: a taxa de perda de pacotes (PDR -

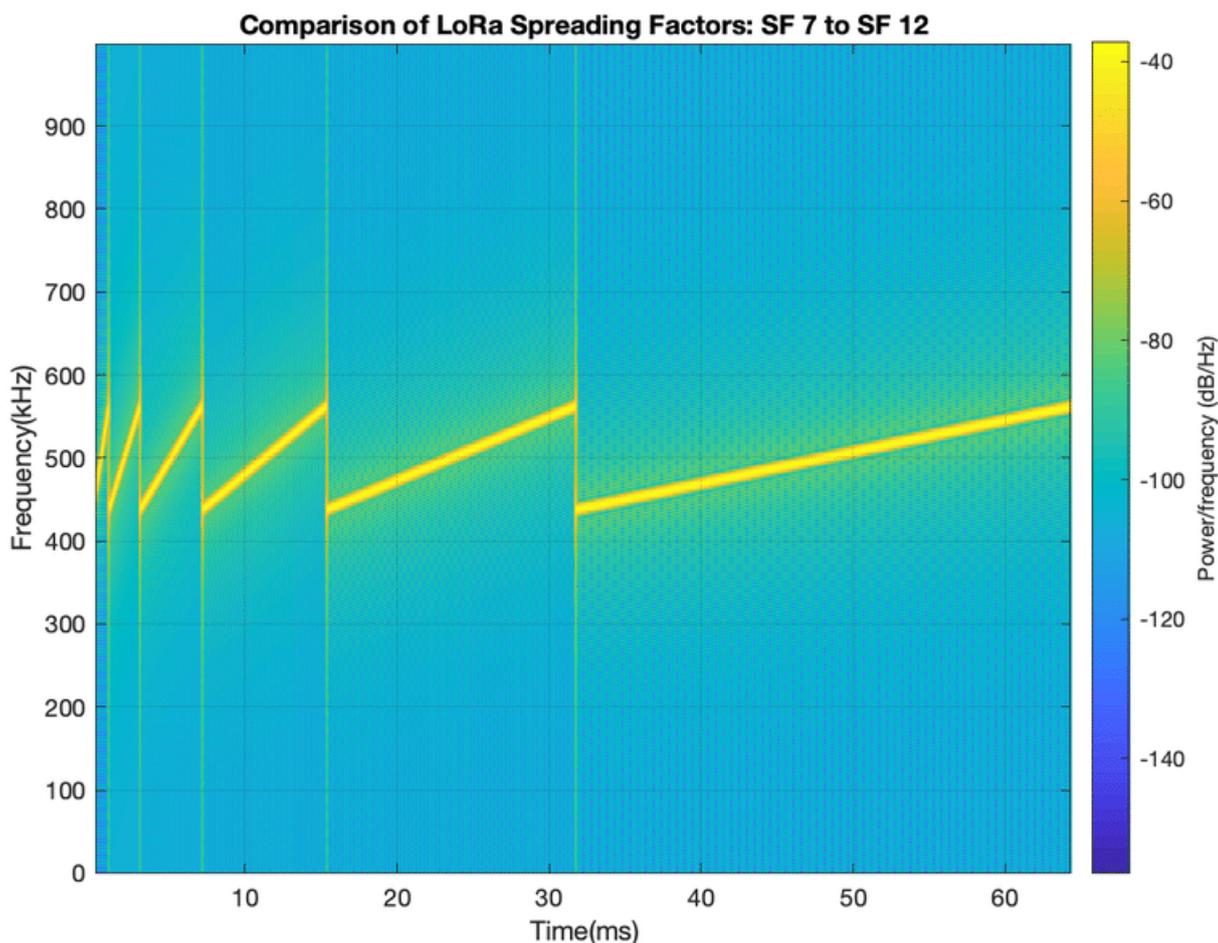


Figura 3 – Representação do sinal enviado com CSS e comparação dos fatores de espalhamento LoRa. Retirada de (KIM; LEE; KIM, 2019)

Packet Delivery Rate) e o indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*) (HABAEBI et al., 2017; OLATINWO; JOUBERT, 2019).

A taxa de perda (*Packet Delivery Rate*) é uma medida que avalia a efetividade da comunicação, indicando a proporção de pacotes de dados recebidos em relação ao total enviado.

O RSSI (*Received Signal Strength Indication*) mensura a intensidade do sinal recebido em decibéis por miliwatt (dBm). Portanto, valores mais altos indicam uma melhor qualidade de comunicação. O RSSI é expresso em uma escala logarítmica (dBm), com valores tipicamente variando entre -30 e -100, com a tecnologia LoRa, valores típicos variam entre -100 e -140, para comunicações de médio a longo alcance. Nessa escala, valores negativos indicam enfraquecimento do sinal. É importante observar que, como a comunicação inevitavelmente envolve alguma perda, o RSSI é sempre representado como um valor negativo.

2.5 Fenômenos de Propagação

Alguns fenômenos físicos podem provocar atenuação total ou parcial dos sinais transmitidos durante a comunicação sem fio. A presença, densidade de obstáculos no caminho e as condições atmosféricas no momento da transmissão impõem limitações no desempenho de sistemas de comunicação móveis (RAPPAPORT, 2009). Os principais fenômenos que limitam as transmissões sem fio são a reflexão, difração, a dispersão e as zonas de Fresnel.

2.5.1 Reflexão

O fenômeno de reflexão acontece quando uma onda eletromagnética incide em um meio com propriedades elétricas diferentes, podendo ser uma reflexão total ou parcial. Na primeira, a onda não penetra o novo meio, e toda a energia é transferida novamente para o meio de origem. Já na segunda, uma parte da energia penetra o novo meio, sendo refratada (mudando a direção), enquanto outra parte volta ao meio de origem, nesse caso passa a haver 2 sinais mais fracos que o sinal original. A quantidade de energia refletida e refratada depende das propriedades do material e do ângulo de incidência.

2.5.2 Difração

A difração é um fenômeno ondulatório que ocorre quando uma onda encontra uma abertura ou obstáculo e se espalha em torno dele. Este fenômeno é particularmente evidente quando a dimensão da abertura ou do obstáculo é da ordem de magnitude do comprimento de onda da onda incidente. A difração é uma característica fundamental das ondas, incluindo ondas eletromagnéticas (como luz) e ondas sonoras.

A difração pode causar alterações na distribuição espacial do sinal, levando a áreas onde o sinal é reforçado (máximos de difração) e áreas onde o sinal é atenuado (mínimos de difração). Isso pode resultar em variações na intensidade do sinal recebido em diferentes posições.

2.5.3 Dispersão

A dispersão, no contexto de comunicações eletromagnéticas, refere-se à propagação das ondas eletromagnéticas que resulta na separação dos diferentes componentes da onda, como frequência ou polarização, ao longo do tempo ou do espaço. Essa separação pode ocorrer devido a velocidades diferentes das componentes do sinal em um meio dispersivo (dispersão temporal), ou devido à reflexão, ou refração das componentes em direções diferentes (dispersão espacial). A dispersão é um fenômeno que pode ser indesejável em muitas aplicações de comunicação, pois pode comprometer a integridade e a qualidade do sinal transmitido.

2.5.4 Zonas de Fresnel

Zonas de Fresnel são um conjunto de elipsoides concêntricos ao redor de uma linha reta entre dois pontos que se comunicam usando ondas eletromagnéticas. Essas zonas são criadas pelo efeito de difração do sinal saindo por uma abertura circular e são importantes para compreender o comportamento de uma transmissão sem fio. Qualquer obstrução dentro das zonas de Fresnel faz com que as ondas sofram com os fenômenos supracitados (reflexão, difração e dispersão) afetando a comunicação que gerou essas zonas, quanto mais próxima do centro, também conhecido como linha de visada, for a obstrução, maior o efeito dela na comunicação. A Figura~4 ilustra esse efeito.

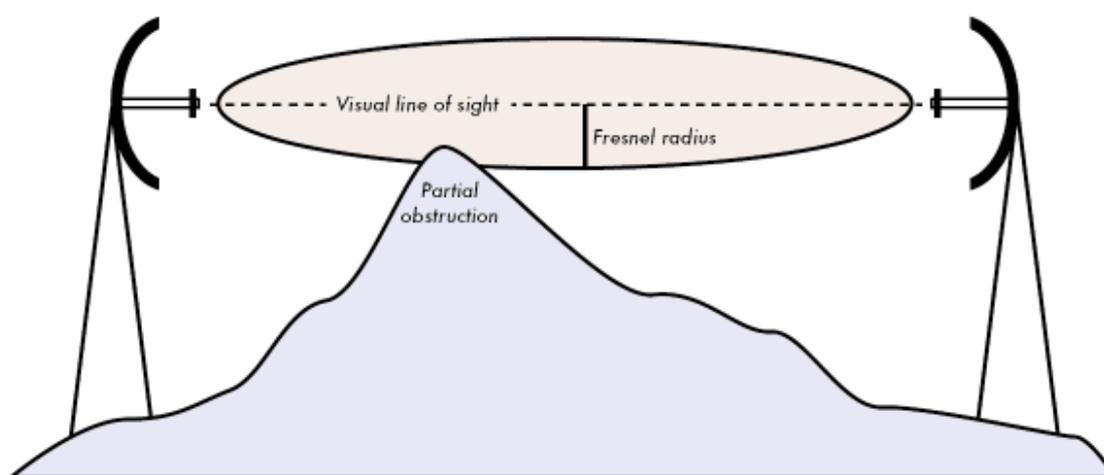


Figura 4 – Representação das Zonas de Fresnel, retirado de (ELSIST.BIZ, 2023).

2.6 Monitoramento de Corpos Hídricos

O monitoramento de corpos hídricos consiste em medir parâmetros de um corpo de água e avaliar a qualidade da água com base nesses dados. Os métodos convencionais de monitoramento hídrico envolvem as seguintes etapas:

- Coleta manual de amostras diretamente da fonte de água, como um igarapé;
- Transporte das amostras para o laboratório responsável;
- Realização de análises laboratoriais para avaliar os parâmetros desejados;
- Previsão da qualidade geral da água de acordo com algum padrão estabelecido (JAN; ALLAH; DUSTEGOR, 2021).

O CONAMA (CONAMA..., 2005) é o órgão nacional responsável pelas decisões e ações relacionadas ao meio ambiente. Sua Resolução 357 é amplamente utilizada para classificar a qualidade da água e será considerada neste trabalho. Essa resolução categoriza as águas abordadas neste estudo como pertencentes à Classe 3, destinadas ao consumo

humano após tratamento convencional ou avançado, à irrigação, à pesca amadora, à recreação e contato secundário, ou à dessedentação de animais.

A Resolução 357 define parâmetros para avaliar a qualidade da água, incluindo a presença de óleos e resíduos sólidos, demanda biológica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), potencial de hidrogênio (pH) e turbidez. Alguns desses parâmetros exigem análises laboratoriais, enquanto outros, como a condutividade elétrica, podem indicar variações em parâmetros como DBO e OD, sugerindo a necessidade de investigação. Este trabalho focaliza os parâmetros turbidez, temperatura, pH e condutividade da água.

No intervalo desses parâmetros definido pelo CONAMA, os corpos hídricos apresentam considerável variabilidade entre si. Para uma análise aprofundada de um corpo hídrico específico, é necessário um estudo detalhado ao longo do tempo, levando em consideração o comportamento sazonal do corpo d'água.

Apesar da predominância dos modelos de monitoramento tradicionais, suas limitações são numerosas: são necessários recursos especializados, como financeiros, equipamentos e pessoal; dificuldades de acesso; dados defasados devido à demora na coleta; erro na manipulação dos dados e viés na amostragem causado pela interferência humana no corpo d'água.

A implementação de sistemas automatizados de coleta pode mitigar algumas dessas limitações, reduzindo o impacto ambiental e econômico da coleta de dados. Além disso, esses sistemas proporcionam acesso a dados mais precisos e menos tendenciosos, aumentando significativamente o número de observações sobre um determinado rio, por exemplo, facilitando estudos nessa área.

2.7 Trabalhos Relacionados

Esta seção começa revisando alguns trabalhos importantes relacionados ao monitoramento de água baseado em IoT. Em seguida, são apresentados os trabalhos mais recentes relacionados ao monitoramento de água usando LoRa. Posteriormente, concentramo-nos em estudos relacionados à caracterização de canais sem fio para IoT, especificamente aqueles baseados em LoRa para ambientes florestais com vegetação densa e na viabilidade do uso de LoRa em tais ambientes.

O monitoramento da qualidade da água desempenha um papel crucial na avaliação dos ecossistemas, na extensão de sua poluição e na eficácia das medidas de controle da poluição (JAN; MIN-ALLAH; DüşTEGÖR, 2021). No entanto, a coleta de amostras no local e a subsequente análise laboratorial envolvem mão de obra substancial e dispendiosa, tornando-se um desafio. Os avanços em IoT têm mitigado esses desafios, possibilitando o monitoramento autônomo em tempo real da água por meio da integração de dispositivos

de sensoriamento de baixo custo e tecnologias sem fio de IoT ([AHMED et al., 2019](#)).

Várias tecnologias LPWAN foram usadas para o fim do monitoramento hídrico. No trabalho de ([KAMALUDIN; ISMAIL, 2017](#)), o qual monitora pH e temperatura de um rio, os autores propõem um sistema usando a tecnologia XBee para a transmissão com o protocolo DigiMesh, e usando a RSSI para medir a qualidade do sinal e mostra um alcance de, pelo menos, um quilômetro sem perda de informação. O trabalho também extrapola os resultados obtidos para prever como a transmissão deve se comportar em distâncias maiores. Porém, os autores fazem as medições em um ambiente aberto e consideram a perda causada pela presença de vegetação como um valor fixo (20%), de acordo com uma resolução de 2005 da União Internacional de Telecomunicação (ITU), disponível no site da ITU, portanto os autores não testaram o sistema proposto em um ambiente com vegetação.

([ALKANDARI et al., 2012](#)) usa XBee e o protocolo ZigBee para monitorar a temperatura em praias. Este trabalho é interessante, pois, para estudar um corpo hídrico maior, é necessária uma rede de sensores mais complexa. Os autores propõem um nó cabeça, que recebe as informações de um conjunto de sensores (chamado de cluster), os nós cabeças são os únicos a se comunicar com o gateway, dessa forma há menos transmissões feitas simultaneamente, dessa forma o canal não fica sobrecarregado e a transmissão tem maior qualidade. Infelizmente os autores não incluem nenhuma experimentação da topologia proposta, porém ela se assemelha à topologia proposta neste trabalho.

([ENCINAS et al., 2017](#)) apresentaram um protótipo para monitoramento da qualidade da água de lagoas. Eles usaram sensores de temperatura, pH e oxigênio em um módulo Arduino e transmissores e receptores ZigBee. O sistema utiliza um transmissor ZigBee para enviar dados, e as leituras são recebidas por um receptor ZigBee conectadas a um computador. As leituras recebidas são então salvas no banco de dados local e enviadas para a nuvem por meio de um serviço web e eventualmente visualizadas no aplicativo Android.

Existem outros exemplos do uso de dispositivos IoT utilizando tecnologias Zigbee e XBee, mas ao considerar que o monitoramento da qualidade da água em uma região florestal, diferente dos monitoramentos em ambientes controlados, estes exigem tecnologias de baixo custo, grande área de cobertura que permitam distância entre sensores e consumo de energia que permitam longos períodos sem manutenção. Neste caso, outras tecnologias de rede de baixo consumo e longo alcance (LPWAN) são mais indicadas para monitoramento ambiental por conseguir conectar dispositivos que precisam permanecer em serviço por um longo período sem manutenção e enviar pequenas quantidades de dados por longas distâncias. Alguns aplicativos de IoT só precisam transmitir pequenas quantidades de informações, por exemplo, um sensor que envia dados quando detectar fumaça na floresta ([DUISEBEKOVA et al., 2019](#)), aplicações como esta, são perfeitas para tecnologias LPWAN.

O LoRa atende os requisitos – uma estrutura robusta com grande área de cobertura

e baixo consumo de energia, além de uma arquitetura aberta, que possui muitos dos principais fabricantes de software e hardware, como Intel, IBM e Cisco, garantindo confiabilidade de que esta tecnologia tem perspectivas de desenvolvimento e presença no mercado (LoRa Alliance, 2020). Com LoRa, (GUTIÉRREZ-GÓMEZ et al., 2021) demonstra que a tecnologia tem potencial para funcionar em um ambiente de floresta, chegando a uma cobertura de 1,6 km.

Pela sua flexibilidade e larga cobertura, o LoRa tem sido proposto para o monitoramento da água em diversos cenários, incluindo agricultura inteligente (PAGANO et al., 2022), prevenção de inundações (CECÍLIO; FERREIRA; CASIMIRO, 2020), detecção de vazamentos (ISLAM et al., 2022), e tem se mostrado adequado em ambientes desafiadores como áreas costeiras, montanhas e florestas tropicais (SENDRA et al., 2022; OJO; ADAMI; GIORDANO, 2021; FERREIRA et al., 2020; ALOBAIDY et al., 2022; ANTOINE-SANTONI et al., 2022). Utilizar o LoRa para monitoramento da água nesses cenários, em comparação com outras tecnologias, tem mostrado que o LoRa proporciona comunicação de longo alcance, permitindo o monitoramento de recursos hídricos em áreas remotas; possui baixo consumo de energia, possibilitando uma longa vida útil da bateria e reduzindo a necessidade de manutenção frequente (KOMBO; KUMARAN; BOVIM, 2021); é economicamente viável, permitindo a implantação de numerosos sensores em uma ampla área sem a necessidade de uma infraestrutura extensa (PETÄJÄJÄRVI et al., 2017), e oferece conectividade consistente mesmo em condições desafiadoras (FERREIRA et al., 2020).

Em exemplos mais práticos, (ANSAH et al., 2020) faz um comparativo entre modelos de propagação de sinal e resultados reais e discute a diferença de altura entre as antenas e seu efeito na comunicação. Nesse trabalho foi possível obter um alcance de 3 km com uma conexão altamente confiável. Esse trabalho mostra que, em determinados ambientes, LoRa consegue alcançar resultados impressionantes, mesmo em condições reais.

No entanto, apesar das qualidades do LoRa, a vegetação densa e as variações ambientais apresentam impacto significativo no desempenho da tecnologia, especialmente em ambientes como a floresta tropical. Estudos têm destacado os efeitos da vegetação densa no desempenho do LoRa: Ojo et al. (OJO; ADAMI; GIORDANO, 2020) demonstram que a folhagem densa reduz significativamente o desempenho do LoRa, com a taxa de entrega de pacotes (PDR) enfrentando maiores dificuldades devido ao desvanecimento lento.

Ferreira et al. (FERREIRA et al., 2020) mostram que a folhagem interfere na faixa de comunicação e afeta a qualidade do sinal. Ansaah et al. (ANSAH et al., 2020) e Ahmad et al. (ANZUM, 2021) revelam que a cobertura e a confiabilidade da comunicação LoRa em áreas florestais são significativamente reduzidas, podendo resultar em perda de caminho e sinal. Em condições sem linha de visada (NLoS), Anzum et al. (ANZUM et al., 2022) evidenciam que a vegetação pode introduzir bloqueio de sinal e interferência. Fatores como

umidade, variações climáticas e a escolha da antena também podem degradar a qualidade do canal e diminuir o alcance do LoRa em ambientes adversos (FERREIRA et al., 2020).

Resumindo, o desempenho da tecnologia LoRa em vegetação densa degrada significativamente, afetado pela propagação do sinal, seleção da antena, cobertura, interferência, perda pelo caminho e variações ambientais. Esses fatores devem ser cuidadosamente considerados ao avaliar a viabilidade do uso de LoRa em um ambiente desafiador. Mesmo sob esses dilemas, ao considerar os avanços no monitoramento ambiental, IoT, tecnologias de rede de sensores sem fio de longa distância e as peculiaridades do ecossistema, a tecnologia LoRa permanece promissora, e o trabalho proposto fornecerá novos *insights* e possíveis melhorias nos processos de monitoramento de corpos hídricos em meio a floresta.

2.8 Discussão

A utilização de tecnologias de transmissão em IoT tem se tornado cada vez mais frequente na literatura, demonstrando sua capacidade de proporcionar benefícios significativos em diversas áreas do conhecimento. No contexto da coleta eficiente de dados com menor impacto ambiental, a tecnologia LoRa destaca-se como uma opção robusta e promissora, características essenciais para superar as atenuações provocadas pelos efeitos físicos previamente mencionados.

É crucial ressaltar que, devido à presença de vegetação, diversas obstruções na zona de Fresnel da comunicação são observadas. Em ambientes distintos, seria possível minimizar os efeitos da vegetação elevando as antenas para que as zonas de Fresnel fiquem acima da copa das árvores. No entanto, na floresta amazônica, onde a altura média das árvores varia de 40 a 50 metros (CORRÊA, 2022), podendo ultrapassar esses valores, instalar antenas a essa altura seria impossível sem impactar negativamente na fauna e flora da região. Portanto, a tecnologia escolhida para este trabalho deve ser capaz de superar essas interferências.

Para utilizar essa tecnologia de maneira eficiente, é necessário estabelecer uma rede de sensores abrangente que cubra a área de estudo. No contexto do monitoramento de corpos hídricos, é crucial ter múltiplos pontos de coleta de dados para garantir uma representação precisa do corpo d'água em estudo, em vez de abranger apenas um trecho limitado. No entanto, gerenciar um conjunto extenso de sensores tentando enviar informações simultaneamente é uma tarefa complexa, mas desnecessária. Uma abordagem mais viável envolve a inclusão de um nó na rede dedicado a coordenar e consolidar as informações provenientes dos sensores antes de retransmiti-las como um único pacote de dados, evitando assim interferências decorrentes de transmissões simultâneas.

3 Sistema Implementado

Neste capítulo descreveremos o sistema implementado, começando pela topologia de rede e partindo para os detalhes de implementação do protótipo.

3.1 Topologia de Rede

Antes de iniciar a implementação de uma rede sem fio, é essencial planejar o posicionamento dos dispositivos nessa rede e como eles se conectarão. Dado que o objetivo deste trabalho é implantar o sistema na floresta, foi necessário levar em consideração as particularidades do ambiente. Portanto, foram propostas duas propostas de topologias distintas: a primeira visa testar o conceito de comunicação, servindo apenas para experimentações e prova de conceito; a segunda, por sua vez, foi efetivamente implementada no protótipo final.

3.1.1 Primeira Topologia

A primeira topologia é simples, composta apenas pelo nó sensor e o *gateway*, responsável pelo processamento e envio das informações para a internet. Essa topologia é interessante para experimentar a comunicação com o *gateway* e testar o alcance da comunicação entre dois pontos. A figura 5 mostra um diagrama da topologia proposta. O nó de sensores está ancorado em um ponto do rio enquanto o *gateway* está fora da floresta, com acesso à energia elétrica e Internet.

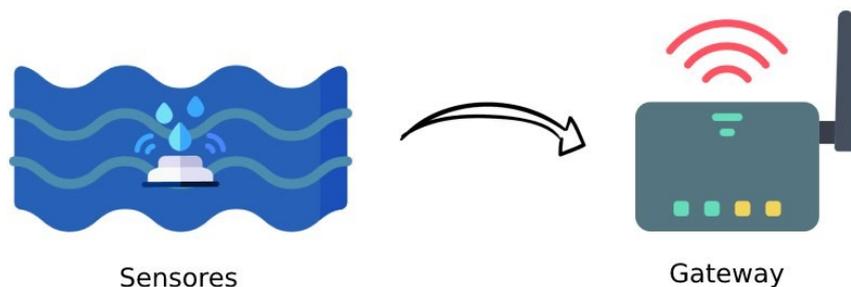


Figura 5 – Diagrama da primeira topologia proposta.

Neste estudo, a mencionada topologia foi empregada nos testes de qualidade de comunicação, simplificando a interação para apenas dois pontos. Devido à utilização do mesmo equipamento de transmissão da topologia 2, os resultados obtidos com essa configuração foram equivalentes entre os dois pontos. Entretanto, essa topologia não é

altamente recomendada para o cenário real, uma vez que, para avaliar corretamente a qualidade de um corpo hídrico, é necessário implementar mais de um nó de sensores (variando conforme o tamanho do corpo). Além disso, ao ser posicionada dentro do rio, revela-se desfavorável para a transmissão, pois está relativamente mais baixa em relação à vegetação ao redor, sem contar a instabilidade causada pela correnteza.

3.1.2 Segunda Topologia

A segunda topologia é um pouco mais complexa, visando aumentar o alcance de transmissão. Esta topologia se difere da primeira pela presença de uma ou mais estações de transmissão responsáveis por coordenar os nós de sensores, aglutinar os dados e retransmitir. A presença desse nó, permitiu medições mais representativas, pois possibilita coordenar quantidade maior de sensores e aumentar o alcance do sistema usando um ou mais nós como estações intermediárias. A figura 6 mostra um diagrama da topologia proposta, nela a estação de transmissão está representada entre os sensores e o *gateway*.



Figura 6 – Diagrama da segunda topologia proposta.

Esta topologia é mais adequada para o objetivo deste trabalho, uma vez que usa os mesmos nós de sensores e o mesmo *gateway* da seção 3.1.1, mas é mais eficiente, pois a estação de transmissão pode armazenar os dados de vários nós sensores em mais de uma medição, efetuar algum tipo de pre-processamento, se necessário, e só então retransmitir, diminuindo a necessidade de transmissões de longo alcance. A possibilidade da inclusão de mais estações de transmissão permite, também, a inclusão de mais conjuntos de nós de sensores, atuando como os *clusters* no trabalho de (ALKANDARI et al., 2012). Nesse modelo as estações de transmissão atuam como as cabeças de *cluster*, ao aglutinar e retransmitir os dados coletados nos sensores, porém, elas também podem aglutinar e retransmitir os dados de outras estações, permitindo a cobertura de uma área maior. Esta topologia foi testada apenas em laboratório, devido a limitações de material disponível.

3.2 O Hardware

Nesta seção é descrito o hardware escolhido para cada componente da rede, descrito na seção 3.1. Exceto pelo *gateway*, é necessário criar também um invólucro à prova do

clima, pois o contato com água e umidade podem danificar os componentes, portanto é importante ressaltar: para a implantação destes protótipos no ambiente real, é necessário criar os envólucros e selar o protótipo dentro deles. Devido à natureza experimental deste projeto e da necessidade de desmontagens para utilização dos em projetos concorrentes, o envólucro não foi implementado durante este projeto.

3.2.1 Sensores

O nó sensor é composto por um microcontrolador Arduino Uno, um *shield* de comunicação LoRa e os sensores individuais. O Arduino já foi discutido na seção 2.1.1, mas as funcionalidades desses controladores podem ser expandidas usando placas chamadas *shields*. Essas placas simplificam alguns componentes sem implicar na perda de funcionalidades. Neste trabalho usamos o *shield* LoRa da marca Dragino, implementando o chip SX1276, para controlar a transmissão e recepção de dados. A figura 7 mostra o *shield* usado. Esse *shield* inclui também uma entrada para a antena. Nesse trabalho escolhemos uma antena com ganho de 5 dBi, mas esta pode ser substituída por antenas de maior ganho, caso seja necessário. Na segunda topologia, esse módulo não se beneficia tanto de antenas mais potentes, pois transmite apenas para a estação de retransmissão próxima da margem, ao invés de enviar para o *gateway* fora da floresta.

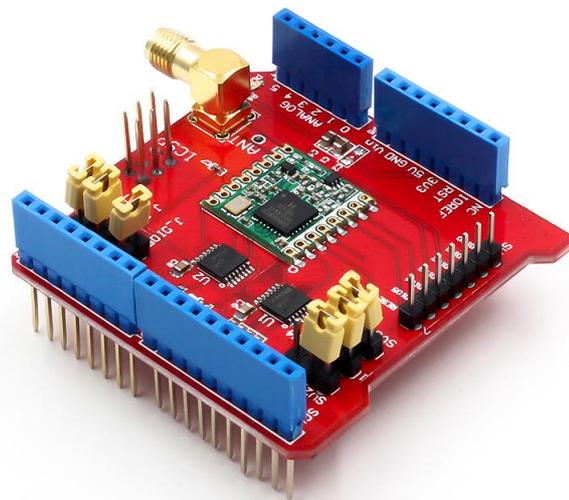


Figura 7 – Dragino LoRa *Shield* para Arduino

Para o sensoriamento, foram selecionados os seguintes sensores amplamente encontrados nas lojas especializadas: turbidez (ST100), medindo entre 0 e 1000 NTU, pH (PH-4502C), medindo PH entre 0 e 14, condutividade da água (TDS meter V1.0), medindo entre 0 e 1000 ppm, e temperatura (NTC 10K MF58 - sonda à prova d'água), medindo entre -20 e 105 °C. Esses sensores foram escolhidos devido à disponibilidade, podendo ser

substituídos por sensores de melhor precisão ou com características específicas para outras aplicações. As figuras 8, 9, 10 e 11 mostram os sensores escolhidos. A figura 12 mostra um diagrama do nó sensor.



Figura 8 – Sensor de turbidez, ST100.



Figura 9 – Sensor de Ph, PH-4502C.



Figura 10 – Sensor de condutividade da água, TDS meter V1.0.

3.2.2 Gateway

Para permitir o acesso remoto dos dados, eles precisam ser acessados através de uma conexão de rede. O *gateway* é o módulo responsável por organizar as informações capturadas pelos sensores e então armazená-las em algum servidor remoto, podendo ser qualquer serviço de armazenamento em nuvem. Para facilitar essa etapa, este trabalho armazenará as informações em um arquivo “.csv” que ficará acessível através do aplicativo



Figura 11 – Sensor de temperatura, NTC 10K MF58 - sonda à prova d'água.

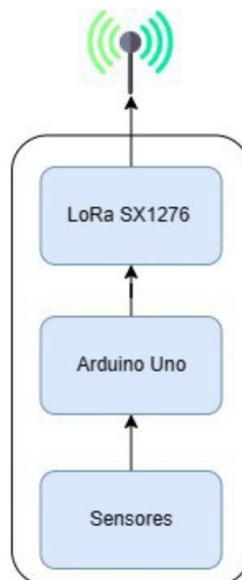
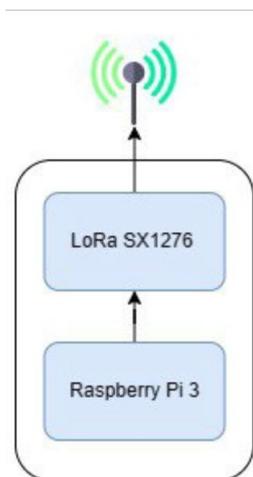


Figura 12 – Diagrama do nó sensor.

Google Drive, porém esse formato de armazenamento e o serviço de nuvem podem ser facilmente modificados conforme as necessidades do usuário.

O *gateway* usado foi implementado em um Raspberry Pi 3, um Dragino Lora/GPS *Hat*, uma placa de expansão parecido com o *shield* de Arduino usado na seção 3.2.1, no sentido que se conecta e expande as funções do Raspberry Pi da mesma forma que o *shield* expande o Arduino e implementa o mesmo chip SX1276, garantindo, portanto, que não há nenhum impedimento para a comunicação entre os dois módulos. A figura 13 mostra o *Hat*. Como antena, foi escolhida a antena com maior ganho disponível (5 dBi), mas esse módulo se beneficia de uma antena melhor, pois facilita a comunicação com os outros módulos deste sistema. A figura 14 mostra um diagrama do gateway.

Figura 13 – Dragino LoRa/GPS *Hat* para Raspberry Pi.Figura 14 – Diagrama do *gateway*.

3.2.3 Estação de Transmissão

A estação de transmissão é um componente necessário para permitir a adaptação deste sistema ao ambiente onde será implementado, ao permitir que o número de nós sensores do sistema aumente com a distância entre eles e o *gateway*. Através desse módulo é possível fazer um melhor uso da comunicação. Um ponto importante do controlador LoRa usado neste trabalho é sua baixa taxa de transmissão, permitindo a transmissão de até 256 bytes, essa limitação não é um problema, pois, em uma abordagem minimalista, enviar as leituras dos sensores, compostas por 4 leituras separadas pelo caractere “;” e com até 5 caracteres por sensor (essa precisão pode ser ajustada, mas 2 casas, vírgula e mais duas casas após a vírgula dão uma boa precisão para os valores menores e os valores maiores não precisam de tanta precisão após a vírgula), tem-se 24 bytes em uma leitura, deixando muito espaço para mais informações em um envio. A estação de transmissão

permite agrupar facilmente até 10 medições em um único pacote. Dessa forma, em casos onde a comunicação com o *gateway* é mais difícil, precisará ser realizada menos vezes.

O hardware escolhido para esse módulo é composto por: um Arduino Uno com o *shield* LoRa Dragino, o mesmo da seção 3.2.1, um módulo leitor de cartão SD, para armazenar os dados a serem enviados, e uma antena de 5 dBi. Esse módulo também se beneficia de uma antena melhor, com o auxílio de um poste para deixar a antena o mais alto possível, essa altura adicional torna o módulo mais seguro, pois estará fora do alcance da maioria dos animais, e aumenta o alcance e a qualidade da transmissão. A figura 15 mostra um diagrama da estação de transmissão.

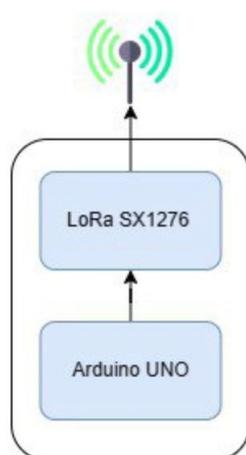


Figura 15 – Diagrama da estação de transmissão.

4 Resultados

4.1 Implementação dos Sensores

A construção do módulo de sensores já foi discutida na seção 3.2.1, e agora serão discutidos os resultados dessa implementação.

O módulo de sensores, apesar de ser teoricamente simples de implementar, provou ser muito problemático, pois, uma vez montado, funcionou de forma inconsistente, apresentando travamentos e mensagens corrompidas. Após análises e diversos testes, optou-se por algumas modificações de hardware. A hipótese de que os sensores estavam interferindo entre si foi diversas vezes confirmadas através de experimentos. Este problema foi solucionado com a substituição dos módulos de sensores por outros idênticos, porém mais novos.

Como os sensores utilizados neste trabalho são sensores comercialmente disponíveis, está fora do escopo deste trabalho uma análise detalhada das leituras dos valores que eles fornecem, pois os testes dos sensores funcionaram de acordo com as especificações dos fabricantes.

A figura 16 mostra a aparência do módulo.

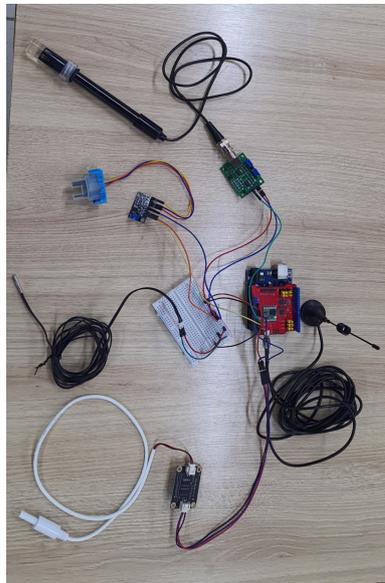


Figura 16 – Módulo de sensores, com antena e todos os sensores conectados.

4.2 Implementação do *Gateway*

A construção do *gateway* já foi discutida na seção 3.2.2. A construção desse módulo ocorreu sem problemas e foi possível se comunicar com o módulo de sensores corretamente.

A implementação deste protótipo seguiu os passos descritos no seguinte tutorial no *github* disponível em <<https://github.com/Alexandre-Tupinamba/Lora-RaspberryPi>>, produzido durante o desenvolvimento deste trabalho pelo laboratório de pesquisa IoTS (IoT para Sustentabilidade) na UFAM.

A figura 17 mostra a aparência do módulo.



Figura 17 – Módulo *gateway*, com antena conectada.

4.3 Implementação da Estação de Transmissão

A construção da estação de transmissão já foi discutida na seção 3.2.3. Este nó é o mais simples de implementar, sendo composto apenas por um microcontrolador Arduino, o *Shield* de comunicação LoRa e uma antena.

A figura 18 mostra a aparência do módulo.



Figura 18 – Módulo estação de transmissão, com antena conectada.

4.4 Experimentos

Testes com o sistema proposto foram conduzidos múltiplas vezes, na maioria delas, não foi possível conectar os protótipos. Nos testes preliminares, a largura de banda foi definida para 125 mHz, porém, após estes testes, não foi possível reproduzir esses resultados. Isso é consistente com as observações feitas em (RAPPAPORT, 2009), onde é mostrado que a qualidade do canal de radiofrequência muda constantemente com o tempo e com o espaço. Para alcançar resultados reproduzíveis, buscou-se formas de fortalecer o sinal, para isso seriam necessárias antenas mais potentes. Na impossibilidade, a solução encontrada para este problema foi reduzir a largura de banda pela metade. Esta modificação não aumenta a força do sinal, mas aumenta a sensibilidade do receptor, permitindo comunicação com um sinal mais fraco (MDPI, 2019).

Esse experimento foi realizado entre o centro de convivência, onde ficou o *gateway*, e o estacionamento da FACED na UFAM, onde estavam os sensores. A imagem 19 mostra uma imagem de satélite do estacionamento, com uma reta entre os pontos onde estavam os módulos. A distância de transmissão foi de cerca de 200 metros com vegetação entre os módulos.



Figura 19 – Localização onde o experimento preliminar foi realizado.

Para encontrar os melhores parâmetros para comunicação LoRa, foram avaliados os parâmetros específicos dessa tecnologia, *Spread Factor* (SF) e *Coding Rate* (CR), enquanto outros parâmetros foram mantidos fixos, conforme a Tabela 1. Todas as combinações possíveis entre os valores de SF (entre 7 e 12) e os dois valores extremos de CR (5 e 8) foram testadas. Nem todos os possíveis valores de CR foram testados, uma vez que esse parâmetro serve apenas para correção de erros. Para testar o sistema em um cenário de

estresse, os pacotes enviados pelo nó de sensores foram configurados para enviar 250 bytes por pacote, o máximo possível por esse sistema, e cada pacote gera uma resposta curta do *gateway*, permitindo averiguar o desempenho do sistema tanto com mensagens curtas quanto longas. No total foram enviados 200 pacotes, 100 enviados pelo nó de sensores e 100 respostas.

Tabela 1 – Parâmetros experimentais fixados.

<i>Nome do Parâmetro</i>	<i>Valor do Parâmetro</i>
Frequência	915 mHz
Largura de Banda	62,5 mHz
Potência da Transmissão	20 dBm
Ganho da Antena	5dBi
Altura da Antena	1,65 m

Para este experimento, foram transmitidos 100 pacotes para medir a quantidade de pacotes recebidos (*Package Delivery Rate* ou PDR), a força do sinal no *gateway* (RSSI) e o tempo médio de transmissão. A Figura 20 mostra os resultados de PDR, divididos em PDR transmissão, levando em consideração apenas os pacotes longos transmitidos pelo nó de sensores, PDR resposta, levando em consideração apenas as respostas curtas enviadas pelo *gateway* e PDR total, considerando todos os pacotes. Os dados usados para gerar esse gráfico se encontram na Tabela 2, localizada no Apêndice A.

A Figura 20 ilustra uma transmissão assimétrica, onde as transmissões iniciais foram claramente mais bem-sucedidas do que as respostas correspondentes. Isto indica que, com os parâmetros especificados (SF 7 a 9 e SF 12), embora a taxa de sucesso global não tenha sido desfavorável, a comunicação foi predominantemente unidirecional, tornando estes resultados sub ótimos. Ao contrário da sugestão em (OJO; ADAMI; GIORDANO, 2021), que postula que cargas mais longas são mais suscetíveis à atenuação do sinal, resultando em taxas de entrega de pacotes (PDR) mais baixas, este experimento indica o oposto: pacotes mais longos sofreram menos perdas.

Além disso, uma tendência discernível é observada com SF 8, 10 e 12, mostrando uma propensão à deterioração dos resultados com CR mais altas. Por outro lado, SF 7, 9 e 11 exibem uma relação inversa. Embora sejam necessários mais testes antes que conclusões definitivas possam ser tiradas, é evidente que o CR afeta diferentes valores de SF de forma díspar, e um simples aumento no CR pode impactar negativamente a comunicação.

Notavelmente, as combinações com SF 10 e 11 demonstraram o desempenho mais favorável, alcançando um equilíbrio entre as transmissões e as respostas recebidas. A melhor combinação foi identificada como SF 11 – CR 8, atingindo um PDR aproximado de 80% tanto para transmissões iniciais quanto para respostas recebidas.

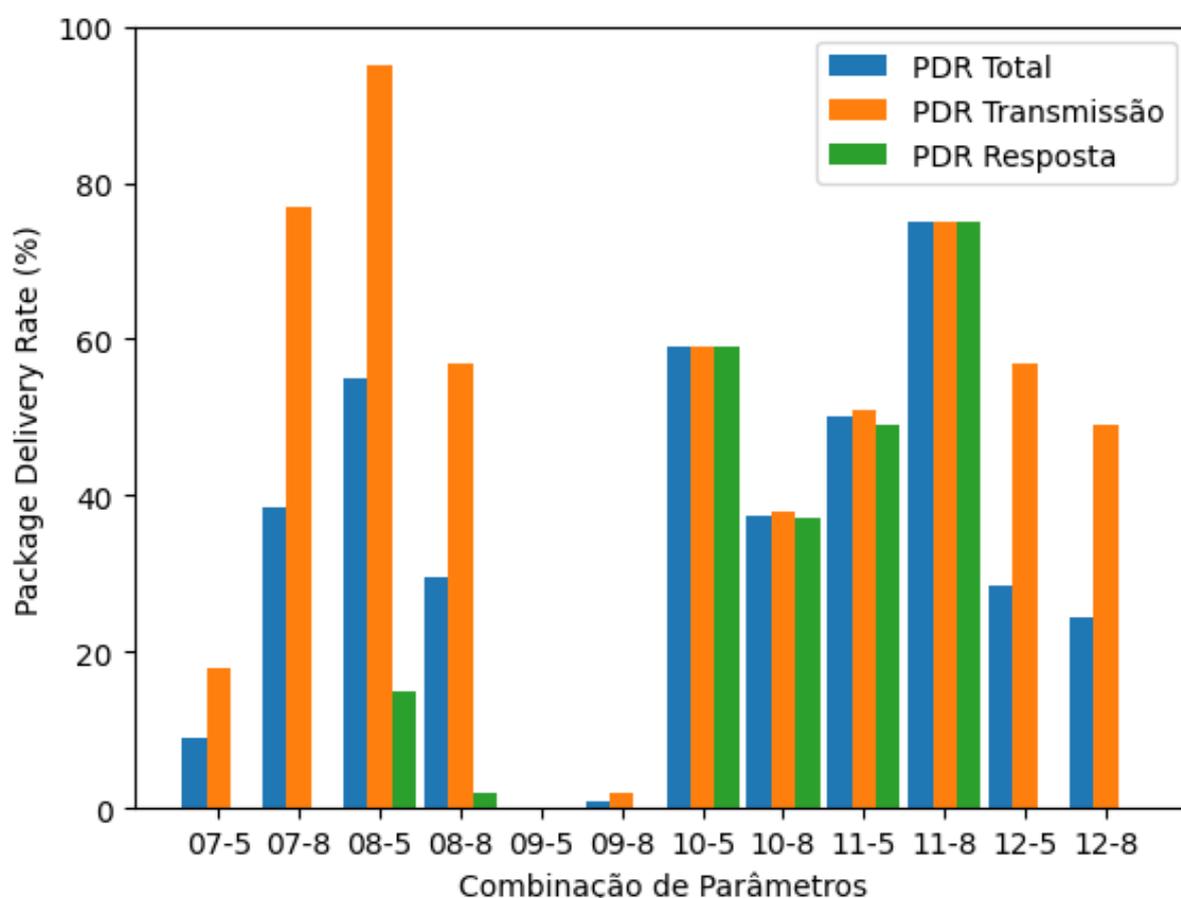


Figura 20 – PDR para diferentes combinações SF e CR.

Excluindo a combinação SF 9 – CR 5 devido à ausência de comunicação, o gráfico subsequente (Fig. 20) é apresentado para maior clareza na avaliação dos resultados de outras combinações. Embora a Fig. 20 elucide a eficácia da comunicação, o experimento também mediu o RSSI para cada combinação de parâmetros, conforme representado na Fig. 21, para fornecer informações sobre qualidade do sinal. Nas combinações onde há respostas, separou-se os dados em RSSI médio, RSSI Transmissão e RSSI Resposta, assim como na Figura 20, manteve-se apenas o total nas combinações sem resposta, uma vez que os valores da transmissão seriam iguais à média e a presença uma linha que não traz nenhuma informação prejudicaria o entendimento do gráfico. Os dados usados para gerar esse gráfico se encontram na Tabela 3, localizada no Apêndice A.

O RSSI fornece informações sobre a intensidade do sinal recebido em dBi, onde sinais mais fortes são geralmente mais amigáveis ao receptor. O gráfico revela que a maioria das combinações de pior desempenho exibem uma intensidade de sinal aproximadamente 10 dBi menor, considerando a natureza logarítmica do dBi, representando um décimo das combinações de melhor desempenho. No entanto, a intensidade do sinal por si só não transmite a imagem completa, como exemplificado pelas combinações SF 12 – CR 5 e SF 12 – CR 8. Apesar de estar entre os sinais mais fortes, este último foi aproximadamente 10

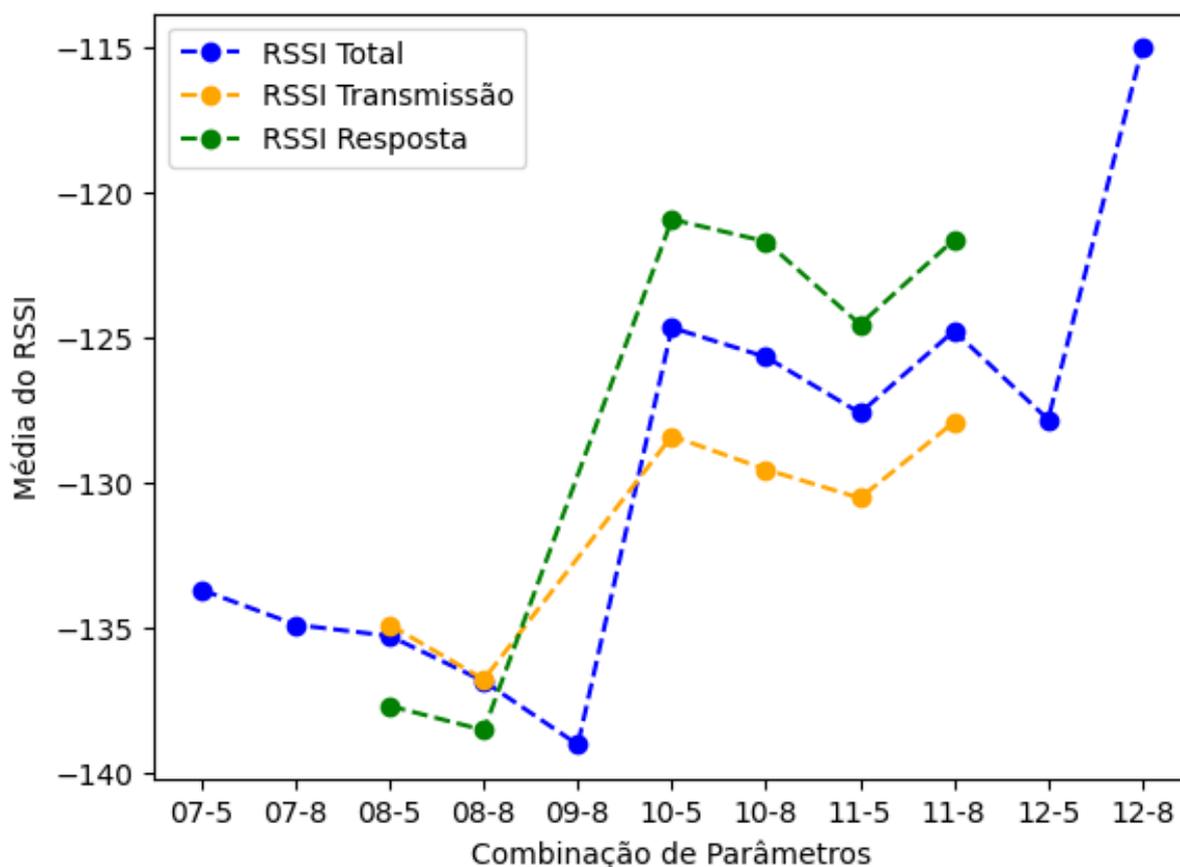


Figura 21 – RSSI para diferentes combinações SF e CR.

vezes mais forte que a combinação de melhor desempenho (SF 11 – CR 8), indicando a existência de outras desvantagens desta configuração de SF, apesar de ser projetada para o maior alcance ([NETWORK, 2023](#)).

Certas combinações, como SF 7 – CR 8, SF 8 – CR 5 e SF 8 – CR 8, demonstram resultados promissores, apesar da comunicação unilateral. Embora testes adicionais possam explorar se a alteração dos papéis de Tx e Rx pode influenciar os resultados, as combinações com SF 10 e 11 não apresentam problemas com o recebimento de respostas, tornando altamente improvável que a direcionalidade da transmissão seja um fator significativo.

É possível notar que, as combinações SF 10 - CR 5, SF 10 - CR 8, SF 11 - CR 5 e SF 11 - CR 8, há uma grande discrepância entre o RSSI da transmissão e da resposta. Essa diferença pode ser explicada pelo fenômeno *Fading*, causado pela dispersão do pacote transmitido. Porém, nas combinações SF 8 - CR 5 e SF 8 - CR 8, esse fenômeno parece afetar mais os pacotes menores.

Por fim, foi medido o tempo de transmissão de cada pacote, métrica crítica para a aplicação proposta deste trabalho. Em dispositivos IoT alimentados por baterias, o gerenciamento do consumo de energia é crucial, e a transmissão constitui a tarefa que mais consome energia para o dispositivo proposto. Fig. 22 representa o tempo médio de

transmissão em segundos por pacote, para cada combinação de parâmetros. Os dados usados para gerar esse gráfico se encontram na Tabela 4, localizada no Apêndice A.

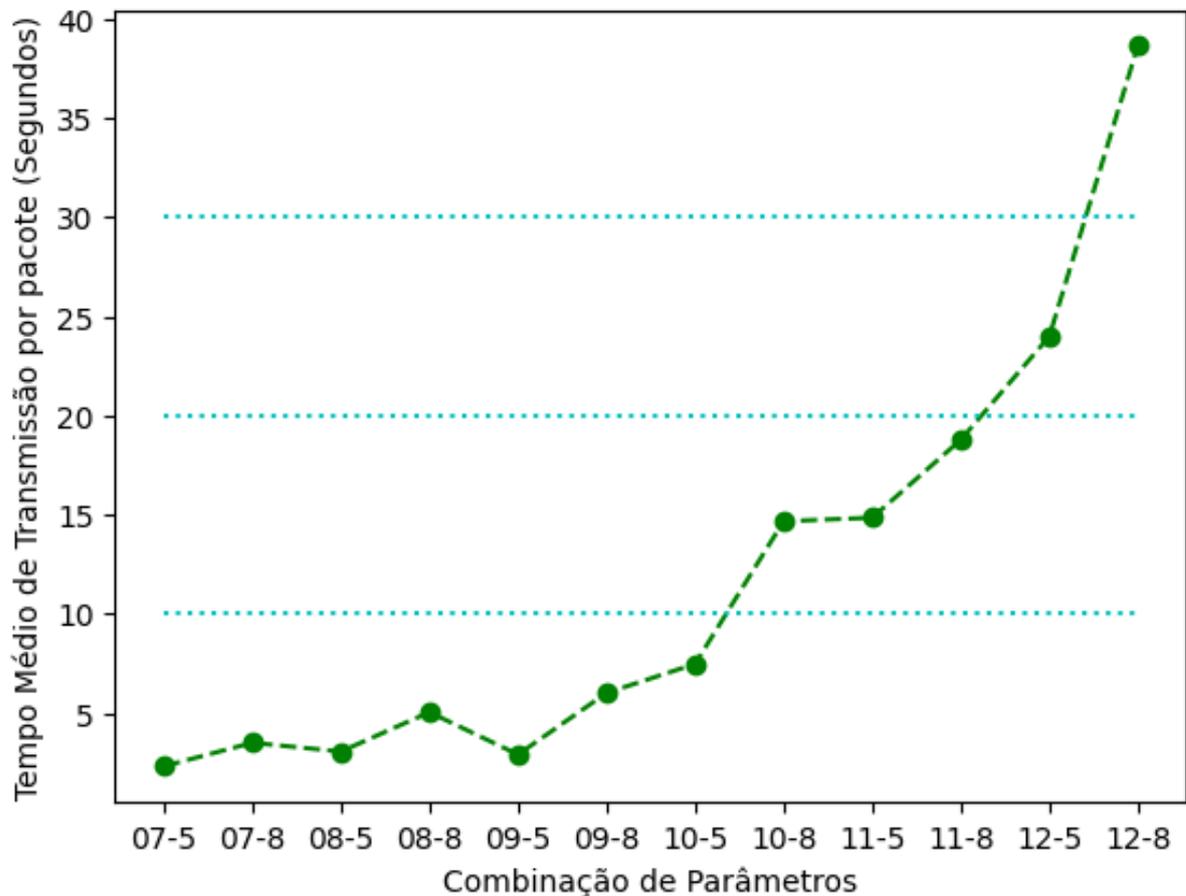


Figura 22 – Tempo de Transmissão por pacote para diferentes combinações SF e CR.

O gráfico da Figura 22 está alinhado com o comportamento previsto da tecnologia LoRa, indicando que Fatores de Espalhamento (SFs) maiores estão associados a tempos de transmissão maiores. Este gráfico introduz uma informação crucial na avaliação, enfatizando a importância da eficiência energética na determinação da combinação ideal de parâmetros. Apesar do desempenho superior do SF 11 – CR 8 (entrega aproximadamente 15% mais pacotes), a segunda melhor combinação, SF 10 – CR 5, leva menos da metade do tempo para transmitir cada pacote, significando uma eficiência energética significativamente maior.

5 Considerações Finais

Em resumo, este estudo propôs um dispositivo IoT adaptado para monitoramento da qualidade da água por meio de LoRa LPWAN, visando avaliar especificamente a qualidade da comunicação em ambientes de floresta tropical e determinar parâmetros LoRa ideais. A experimentação ressaltou a natureza dependente do ambiente da comunicação LoRa, fortemente influenciada pelas condições climáticas e pela hora do dia. Conseqüentemente, ajustes iterativos de parâmetros foram necessários para estabelecer uma comunicação estável.

Os resultados demonstram os diversos impactos de diferentes parâmetros na comunicação, considerando fatores como comprimento da carga útil, qualidade do sinal e duração da transmissão. Notavelmente, a combinação SF 10 – CR 5 se mostrou a mais eficiente, apresentando comunicação eficiente para dispositivos IoT. Apesar de não atingir a mais alta taxa de entrega de pacotes (PDR), essa combinação demonstrou eficiência energética superior – uma consideração essencial para a aplicação pretendida. Em contraste, outras combinações exibiram PDRs mais baixos ou prolongaram significativamente os tempos de transmissão. Estas descobertas oferecem *insights* práticos para determinar parâmetros ideais para melhorar a cobertura em ambientes de floresta tropical, um aspecto crítico para a implementação bem-sucedida do monitoramento da qualidade da água.

Para acomodar as mudanças no canal causadas pelas condições climáticas, trabalhos futuros deverão introduzir algoritmos para selecionar e alterar entre parâmetros até encontrar a melhor combinação para aquele momento.

Referências

- AHMED, U. et al. Water quality monitoring: from conventional to emerging technologies. *Water Supply*, v. 20, p. 28–45, 10 2019. Citado na página 14.
- ALKANDARI, A. et al. Water monitoring system using wireless sensor network (wsn): Case study of kuwait beaches. In: . [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.
- ALBAIDY, H. A. et al. Low altitude platform-based airborne iot network (lap-ain) for water quality monitoring in harsh tropical environment. *IEEE Internet of Things Journal*, p. 1–1, 2022. Citado na página 15.
- ANSAH, M. R. et al. Characterizing foliage influence on lorawan pathloss in a tropical vegetative environment. *IET Wireless Sensor Systems*, v. 10, 10 2020. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 15.
- ANTOINE-SANTONI, T. et al. Factors influencing lora communication in iot deployment: Overview and experience analysis. 01 2022. Citado na página 15.
- ANZUM, R. Factors that affect lora propagation in foliage medium. *Procedia Computer Science*, v. 194, p. 149–155, 01 2021. Citado na página 15.
- ANZUM, R. et al. A multiwall path-loss prediction model using 433 mhz lora-wan frequency to characterize foliage’s influence in a malaysian palm oil plantation environment. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 22, p. 5397–5397, 07 2022. Citado na página 15.
- ARDUINO Uno R3 Documentation. 2005. <<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>>. Acessado: 10-09-2022. Citado na página 4.
- CECÍLIO, J.; FERREIRA, P. M.; CASIMIRO, A. Evaluation of lora technology in flooding prevention scenarios. *Sensors*, v. 20, p. 4034, 01 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/14/4034/htm>>. Citado na página 15.
- CONAMA 357. 2005. <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acessado: 10-09-2022. Citado na página 12.
- CORRÊA, M. *Pesquisadores chegam à árvore mais alta da Amazônia, de 88,5 metros e cerca de 400 anos*. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ap/amapa/natureza/amazonia/noticia/2022/10/03/pesquisadores-chegam-a-arvore-mais-alta-da-amazonia-de-885-metros-e-cerca-de-400-anos.ghml>>. Citado na página 16.
- CUNHA, M. P. d. *Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz*. Dissertação (Mestrado), 2021. Citado na página 9.
- DUISEBEKOVA, K. S. et al. Environmental monitoring system for analysis of climatic and ecological changes using LoRa technology. In: *Proceedings of the 5th*

- International Conference on Engineering and MIS*. ACM, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3330431.3330446>>. Citado na página 14.
- ELSIST.BIZ. *Como calcular a zona Fresnel em transmissões de rádio?* 2023. Disponível em: <<https://support.elsist.biz/pt/Artigos/how-to-calcular-the-Fresnel-zone-in-radiodifus%C3%A3o/>>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 12.
- ENCINAS, C. et al. Design and implementation of a distributed iot system for the monitoring of water quality in aquaculture. In: *2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7. Citado na página 14.
- FERREIRA, A. E. et al. A study of the lora signal propagation in forest, urban, and suburban environments. *Annals of Telecommunications*, v. 75, p. 333–351, 07 2020. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/FOC20.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- GUTIÉRREZ-GÓMEZ, A. et al. A propagation study of lora p2p links for iot applications: The case of near-surface measurements over semitropical rivers. *Sensors*, v. 21, 10 2021. Citado na página 15.
- HABAEBI, M. H. et al. Effects of shadowing on lora lpwan radio links. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 7, p. 2970, 2017. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:26339364>>. Citado na página 10.
- ISLAM, M. R. et al. A review on current technologies and future direction of water leakage detection in water distribution network. *IEEE Access*, v. 10, p. 107177–107201, 2022. Citado na página 15.
- JAN, F.; ALLAH, N. M.; DUSTEGOR, D. Iot based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends and challenges for domestic applications. *Water*, v. 13, p. 1729, 06 2021. Citado na página 12.
- JAN, F.; MIN-ALLAH, N.; DÜŞTEGÖR, D. Iot based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends and challenges for domestic applications. *Water*, v. 13, p. 1729, 06 2021. Disponível em: <https://mdpi-res.com/d_attachment/water/water-13-01729/article_deploy/water-13-01729-v2.pdf>. Citado na página 13.
- KAMALUDIN, K. H.; ISMAIL, W. Water quality monitoring with internet of things (iot). In: *2017 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 18–23. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 14.
- KIM, D.-H.; LEE, E.-K.; KIM, J. Experiencing lora network establishment on a smart energy campus testbed. *Sustainability*, v. 11, p. 1917, 03 2019. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 10.
- KOMBO, O. H.; KUMARAN, S.; BOVIM, A. Design and application of a low-cost, low- power, lora-gsm, iot enabled system for monitoring of groundwater resources with energy harvesting integration. *IEEE Access*, v. 9, p. 128417–128433, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9536662>>. Citado na página 15.
- KUMAR, S.; TIWARI, P.; ZYMBLER, M. Internet of things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *Journal of Big Data*, v. 6, 12 2019. Citado na página 6.

- LAMBROU, T.; PANAYIOTOU, C.; ANASTASIOU, C. A low-cost system for real time monitoring and assessment of potable water quality at consumer sites. In: . [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. ISBN 978-1-4577-1766-6. Citado na página 1.
- LORAWAN. 2015. <<https://lora-alliance.org/about-lorawan/>>. Acessado: 10-09-2022. Citado na página 8.
- MDPI. *Wireless Networks: Characteristics and Applications*. [S.l.]: MDPI, 2019. Citado na página 26.
- NETWORK, T. T. *Spreading Factors*. 2023. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/spreading-factors/>>. Citado na página 29.
- OJO, M.; ADAMI, D.; GIORDANO, S. Network performance evaluation of a lora-based iot system for crop protection against unguates. 09 2020. Citado na página 15.
- OJO, M. et al. Design, implementation and evaluation of a lora packet generator for forest environments. In: . [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Citado na página 9.
- OJO, M. O.; ADAMI, D.; GIORDANO, S. Experimental evaluation of a lora wildlife monitoring network in a forest vegetation area. *Future Internet*, v. 13, p. 115, 05 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-5903/13/5/115>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 27.
- OLATINWO, S. O.; JOUBERT, T.-H. Enabling communication networks for water quality monitoring applications: A survey. *IEEE Access*, v. 7, p. 100332–100362, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 10.
- PAGANO, A. et al. A survey on lora for smart agriculture: Current trends and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, p. 1–1, 2022. Citado na página 15.
- PETÄJÄJÄRVI, J. et al. Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 13, p. 155014771769941, 03 2017. Citado na página 15.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 26.
- RASPBERRY Pi Documentation. 2012. <<https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/raspberry-pi.html>>. Acessado: 10-09-2022. Citado na página 5.
- ROCHA, V.; CORREIA, F.; GOMES, W. Avaliação dos impactos da mudança do clima na precipitação da amazônia utilizando o modelo rcp 8.5 eta-hadgem2-es. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, p. 2051, 12 2019. Citado na página 1.
- SENDRA, S. et al. Lora-based network for water quality monitoring in coastal areas. *Mobile Networks and Applications*, 07 2022. Citado na página 15.
- SILVA, P. et al. Optimal selective logging regime and log landing location models: A case study in the amazon forest. *Acta Amazonica*, v. 48, p. 18–27, 03 2018. Citado na página 1.
- TOVAR-SOTO, J. et al. Performance evaluation of lora technology for implementation in rural areas. *DYNA*, v. 88, p. 69–78, 02 2021. Citado na página 9.

WU, N.; KHAN, M. Lora-based internet-of-things: A water quality monitoring system. In: *2019 SoutheastCon*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4. Citado na página 7.

ZIEGLER, M. F. *Conservar a amazônia É Questão Ambiental, social e econômica*. Agência FAPESP, 2018. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/conservar-a-amazonia-e-questao-ambiental-social-e-economica/28518/>>. Citado na página 1.

Apêndices

APÊNDICE A – Tabelas de Resultados

Tabela 2 – PDR para diferentes combinações SF e CR.

Combinação de Parâmetros	PDR Total	PDR Transmissão	PDR Resposta
07-5	9.0 %	18 %	0 %
07-8	38.5 %	77 %	0 %
08-5	55.0 %	95 %	15 %
08-8	29.5 %	57 %	2 %
09-5	0.0 %	0 %	0 %
09-8	1.0 %	2 %	0 %
10-5	59.0 %	59 %	59 %
10-8	37.5 %	38 %	37 %
11-5	50.0 %	51 %	49 %
11-8	75.0 %	75 %	75 %
12-5	28.5 %	57 %	0 %
12-8	24.5 %	49 %	0 %

Tabela 3 – RSSI para diferentes combinações SF e CR.

Combinação de Parâmetros	RSSI Total	RSSI Transmissão	RSSI Resposta
07-5	-133.667	-133.667	-
07-8	-134.87	-134.87	-
08-5	-135.255	-134.874	-137.667
08-8	-136.814	-136.754	-138.5
09-5	-	-	-
09-8	-139.0	-139.0	-
10-5	-124.644	-128.373	-120.915
10-8	-125.653	-129.526	-121.676
11-5	-127.58	-130.51	-124.531
11-8	-124.753	-127.893	-121.613
12-5	-127.807	-127.807	-
12-8	-115.02	-115.02	-

Tabela 4 – Tempo de Transmissão por pacote para diferentes combinações SF e CR.

Combinação de Parâmetros	Tempo Médio de Transmissão por pacote
07-5	2.306 s
07-8	3.49 s
08-5	3.046 s
08-8	5.031 s
09-5	2.897 s
09-8	6.002 s
10-5	7.467 s
10-8	14.663 s
11-5	14.843 s
11-8	18.771 s
12-5	23.981 s
12-8	38.643 s