



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
MESTRADO ACADÊMICO EM COMPUTAÇÃO

MATEUS SOUSA ARAÚJO

DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM ÁREAS REMOTAS ATRAVÉS DE
REDES LORA

QUIXADÁ

2024

MATEUS SOUSA ARAÚJO

DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM ÁREAS REMOTAS ATRAVÉS DE REDES
LORA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Computação do Programa de Pós-Graduação em Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli

QUIXADÁ

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A69d Araújo, Mateus Sousa.
 Detecção de incêndios florestais em áreas remotas através de redes LoRa / Mateus
 Sousa Araújo. – 2024.
 118 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá,
 Programa de Pós-Graduação em Computação, Quixadá, 2024.
 Orientação: Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli.
1. Incêndios florestais. 2. Veículos aéreos não tripulados. 3. Diversidade espacial. 4.
 Simulação. 5. Agrupamento de gateways. I. Título.

CDD 005

MATEUS SOUSA ARAÚJO

DETECÇÃO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS EM ÁREAS REMOTAS ATRAVÉS DE REDES
LORA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Computação do Programa de Pós-Graduação em Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Aprovada em: 15/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas
Stancanelli (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Arthur de Castro Callado
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Airton Pereira da Silva
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Dr. Renato William Rodrigues de Souza
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

À minha família - pai, mãe e irmão - em reconhecimento ao constante apoio e suporte oferecidos em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha família - meu pai Luciano, minha mãe Ana Kátia e meu irmão Miguel - por todo o apoio incondicional que me deram, não apenas durante o meu mestrado, mas em todos os momentos da minha vida. Vocês sempre foram minha fonte de força e inspiração, oferecendo amor, incentivo e sabedoria nos momentos mais importantes. Obrigado por estarem ao meu lado em cada passo da minha jornada e por acreditarem em mim sempre.

À minha companheira de vida Layla Alves, agradeço do fundo do coração pelo apoio incansável e pelo amor incondicional que me dedicou durante toda esta jornada. Esta conquista é tão sua quanto minha.

Ao Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora pelas valiosas colaborações, sugestões, observações e correções, que enriqueceram ainda mais este trabalho.

Aos colegas e professores do Programa de Pós-Graduação em Computação (PCOMP) pelas valiosas reflexões, críticas e sugestões que recebi ao longo desta jornada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos ao longo de 1 ano e 7 meses durante o curso de mestrado, sob o Código de Financiamento 001 e Processo nº 88887.624280/2021-00.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus colegas na Embraer, que sempre me incentivaram a buscar conhecimento e superar desafios. Suas palavras de encorajamento e apoio foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional. Agradeço por compartilharem suas experiências, ideias e por serem uma fonte constante de inspiração. É uma honra trabalhar ao lado de pessoas tão talentosas e motivadas. Obrigado por serem uma parte essencial da minha jornada.

Gostaria de estender meus sinceros agradecimentos a todos os funcionários que compõem a UFC Campus Quixadá pelo excepcional zelo e cuidado dedicados ao campus. O comprometimento e a dedicação dessas pessoas tão queridas contribuem significativamente para o ambiente acolhedor e funcional que desfrutamos. É graças ao trabalho árduo e à atenção meticulosa desses profissionais que o nosso campus prospera. Obrigado por tudo que fazem para tornar este lugar tão especial.

“Ao voar, descobri que a liberdade não está apenas em conquistar os céus, mas também em libertar os sonhos que habitam dentro de nós.”

(Santos Dumont)

RESUMO

Os incêndios florestais são um problema crítico, especialmente em áreas remotas, onde a detecção e a resposta rápidas são essenciais para minimizar os danos ambientais e econômicos. A necessidade de sistemas eficientes de detecção precoce é vital para garantir que os alertas sejam emitidos de forma precisa e que os recursos de combate a incêndios sejam mobilizados rapidamente. Neste cenário, a tecnologia LoRa surge como uma solução promissora para a detecção de incêndios florestais devido à sua capacidade de comunicação em longas distâncias, baixo consumo de energia e custo reduzido. Esta monografia se debruça sobre o problema da detecção de incêndios florestais de forma confiável, seguida da entrega de sinais de alerta de maneira eficiente e oportuna. Estabelecer uma rede de sensores em um local remoto e inóspito é, por si só, um grande desafio. Este trabalho implementa um sistema de detecção de incêndios florestais auxiliado por alguns veículos aéreos não tripulados (VANTs) capazes de fazer a varredura de uma extensa área. Os resultados foram obtidos por meio de uma ferramenta de simulação computacional própria, que permite integrar modelos de comunicação LoRa com a diversidade espacial inerente aos VANTs e modelos de dispersão de fumaça. A avaliação do desempenho desse sistema foi realizada com base em dados abertos da unidade de conservação de Altamira. Os resultados obtidos através da simulação demonstraram uma melhoria significativa na entrega de pacotes LoRa, utilizando técnicas de agrupamento de gateways e aplicação de diversidade espacial nos elementos da rede. Extensas campanhas de simulação mostraram que a combinação dessas técnicas melhorou a confiabilidade dos alertas de incêndio, mesmo em condições adversas, provendo assim a detecção de incêndios florestais em áreas remotas de maneira eficiente.

Palavras-chave: Incêndios florestais. Veículos aéreos não tripulados. Diversidade espacial. Simulação. Agrupamento de gateways. LoRa.

ABSTRACT

Wildfires are a critical problem, especially in remote areas, where rapid detection and response are essential to minimize environmental and economic damage. The need for efficient early detection systems is vital to ensure that alerts are issued accurately and that firefighting resources are mobilized quickly. In this scenario, LoRa technology emerges as a promising solution for wildfire detection due to its long-distance communication capability, low power consumption, and reduced cost. This monograph addresses the problem of reliably detecting wildfires, followed by delivering warning signals in an efficient and timely manner. Establishing a sensor network in a remote and inhospitable location is, in itself, a great challenge. This work implements a wildfire detection system assisted by some unmanned aerial vehicles (UAVs) capable of scanning a large area. The results were obtained using a proprietary computational simulation tool that allows integrating LoRa communication models with the spatial diversity inherent to UAVs and smoke dispersion models. The performance evaluation of this system was carried out based on open data from the Altamira conservation unit. The results obtained through the simulation demonstrated a significant improvement in the delivery of LoRa packets, using gateway clustering techniques and application of spatial diversity in the network elements. Extensive simulation campaigns have shown that the combination of these techniques improved the reliability of fire alerts, even in adverse conditions, thus providing efficient detection of wildfires in remote areas.

Keywords: Wildfires. Unmanned aerial vehicles. Spatial diversity. Simulation. Gateway clustering. LoRa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de dispersão de fumaça sob uma variedade de condições atmosféricas e intensidades de incêndio.	24
Figura 2 – Fluxo descendente de fumaças liberadas no incêndio <i>Camp Fire</i> (2018). . .	26
Figura 3 – Modelo de detector de fumaça por dispersão óptica.	29
Figura 4 – Representação de um anemômetro ultrassônico.	31
Figura 5 – Estrutura básica de uma sentença NMEA 0183.	32
Figura 6 – Uma arquitetura de rede LoRaWAN típica.	34
Figura 7 – Pilha de protocolos LoRaWAN.	35
Figura 8 – Comparativo de alcance e largura de banda de redes sem fio.	37
Figura 9 – Princípio da modulação de frequência do sinal LoRa.	38
Figura 10 – Símbolo 1024 representado na modulação LoRa com $SF = 12$ e $B = 125$ kHz.	39
Figura 11 – Exemplo de modulação de frequência do sinal LoRa representado por <i>chirps</i>	40
Figura 12 – Constelações LoRa para diferentes fatores de espalhamento (SF) com potência de transmissão/recepção de -72 dBm.	42
Figura 13 – Modelo de uma única célula LoRaWAN.	44
Figura 14 – Propagação do sinal de rádio em múltiplos caminhos.	46
Figura 15 – Tipos de desvanecimentos.	46
Figura 16 – Efeitos combinados de perda de percurso, sombreamento e desvanecimento por multipercurso.	47
Figura 17 – Resposta em frequência do espalhamento <i>Doppler</i>	52
Figura 18 – Envelope de desvanecimento <i>Rayleigh</i> para diferentes larguras de banda. . .	53
Figura 19 – Modelo de diversidade comumente utilizado em sistemas de comunicação. .	53
Figura 20 – Representação de sistemas MIMO e representação matricial de canais de rádio.	55
Figura 21 – Representação de combinação de sinais no receptor.	57
Figura 22 – Representação da técnica de combinação por seleção.	58
Figura 23 – Representação da técnica de combinação de proporção máxima.	59
Figura 24 – Representação de um <i>link</i> sem fio genérico entre transmissor e receptor. . .	61
Figura 25 – Representação do cálculo da SNR do sinal recebido.	62
Figura 26 – Unidades de conservação sobre a cidade de Altamira-PA.	75
Figura 27 – Mapeamento das 11 áreas de conservação.	76
Figura 28 – Visão lateral e superior do enxame de VANTs.	77

Figura 29 – Representação da máquina de estados do enxame durante atividade de monitoramento.	78
Figura 30 – Representação dos dados de coleta para um VANT do enxame no estado q_1	79
Figura 31 – Representação geométrica da distância entre gateways de células adjacentes.	80
Figura 32 – Distribuição das células hexagonais ao longo das unidades de conservação.	80
Figura 33 – Exemplo de padrão de varredura realizado por um enxame de VANTs.	82
Figura 34 – Representação da arquitetura de rede proposta.	85
Figura 35 – Casos de teste para ambas as implementações de agrupamento espacial.	89
Figura 36 – Atribuição de gateways aos tipos de agrupamentos estabelecidos.	90
Figura 37 – Visualização dos 3 grupos e da distribuição dos focos de incêndios.	94
Figura 38 – Visualização dos 8 grupos e da distribuição dos focos de incêndios.	95
Figura 39 – Visualização dos 12 grupos e da distribuição dos focos de incêndios.	96
Figura 40 – Gráficos de BER vs SNR para LoRa com diferentes fatores de espalhamento e número de antenas receptoras.	99
Figura 41 – Variação da SNR em função da distância entre os gateways A e B. A curva azul representa a SNR no gateway A, enquanto a curva laranja representa a SNR no gateway B. A linha tracejada vermelha indica o ponto equidistante entre os dois gateways.	101
Figura 42 – Variações de SNR para diferentes configurações de agrupamento.	102
Figura 43 – Resultados de BER nas EPCs.	105
Figura 44 – Mapa de calor representando a BER para cada SF durante a coleta dos 10 focos de incêndio para configuração de agrupamento uniforme.	107
Figura 45 – Mapa de calor representando a BER para cada SF durante a coleta dos 10 focos de incêndio para configuração de agrupamento dinâmico.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os trabalhos relacionados e o proposto (Legenda: ED = VANT como dispositivo final, GT = VANT como gateway).	73
Tabela 2 – Total de bits enviados por VANT.	92
Tabela 3 – Descrição dos parâmetros de simulação para diferentes categorias.	93
Tabela 4 – Configuração dos experimentos.	93
Tabela 5 – Relação da quantidade de gateways para agrupamento dinâmico com 3 grupos.	95
Tabela 6 – Relação da quantidade de gateways para agrupamento dinâmico com 8 grupos.	96
Tabela 7 – Relação da quantidade de gateways para agrupamento dinâmico com 12 grupos.	97
Tabela 8 – Quantidade de bits enviados por SF.	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CR	Taxa de codificação
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
EGC	<i>Equal Gain Combining</i>
EPC	Estação central de processamento
ERU	Estação de recepção urbana
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FSPL	<i>Free-space path loss</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medic</i>
KDE	<i>Kernel Density Estimation</i>
kNN	<i>K-Nearest Neighbors</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LOS	<i>Line-of-sight</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple-input Multiple-output system</i>
MISO	<i>Multiple-input Single-output system</i>
MISR	<i>Multi-angle Imaging SpectroRadiometer</i>
MRC	<i>Maximum Ratio Combining</i>
MRU	Movimento retilíneo uniforme
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NLOS	<i>Non-line-of-sight</i>
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i>
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
SIMO	<i>Single-input Multiple-output system</i>
SISO	<i>Single-input Single-output system</i>
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i>
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
UC	Unidades de conservação
VANT	Veículo aéreo não tripulado
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

π	Número π
λ	Comprimento de onda
φ	Fase de onda
B	Largura de banda
c	Velocidade da luz
dB	Decibel
dBm	Decibel milliwatts
dBW	Decibel watt
f_c	Frequência da onda portadora
f_d	Frequência <i>Doppler</i>
G_t	Ganho da antena transmissora
G_r	Ganho da antena receptora
h	Coefficiente de desvanecimento
H	Matriz de coeficientes de desvanecimento
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
MHz	Megahertz
GHz	Gigahertz
GB	Gigabyte
MB	Megabyte
j	Unidade imaginária
k	Constante de <i>Boltzmann</i>
km	Quilômetro
K	Parâmetro Rice
L_p	Perda de percurso
mW	Miliwatt

N_0	Densidade espectral de potência
P_t	Potência de transmissão
P_r	Potência de recepção
R_x	Receptor
T	Temperatura
T_x	Transmissor
T_s	Período de amostragem
10^1	10
10^2	100
10^3	1 mil
10^4	10 mil
10^5	100 mil
10^6	1 milhão
10^8	100 milhões
10^{16}	10 quadrilhões
10^{17}	100 quadrilhões
10^{19}	10 quintilhões
10^{20}	100 quintilhões
10^{21}	1 sextilhão
10^{22}	10 sextilhões
10^{23}	100 sextilhões

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	20
1.2	Motivação	20
1.3	Objetivos	21
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	21
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	21
1.4	Estrutura da monografia	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Unidades de conservação ambiental no Brasil	22
2.2	Dinâmica de dispersão de incêndios florestais	23
2.3	Modelagem simplificada da dispersão de fumaças em incêndios florestais	26
2.4	Sensores e módulos para facilitar a identificação incêndios	28
2.4.1	<i>Detectores de fumaça por dispersão óptica</i>	28
2.4.2	<i>Sensores de direção de vento</i>	30
2.4.3	<i>Módulo de posicionamento global</i>	31
2.5	Veículos aéreos não tripulados	32
2.6	O protocolo LoRaWAN	33
2.6.1	<i>Topologia e componentes da rede</i>	33
2.6.2	<i>Pilha de Protocolos LoRaWAN</i>	35
2.6.3	<i>Modulação LoRa</i>	37
2.6.4	<i>Demodulação LoRa</i>	39
2.6.5	<i>Representação bidimensional de símbolos LoRa</i>	41
2.6.6	<i>Colisões de pacotes LoRa</i>	43
2.6.7	<i>Métodos de distribuição de SFs entre dispositivos LoRa</i>	44
2.7	Desvanecimento	45
2.7.1	<i>Desvanecimento Rayleigh</i>	47
2.7.2	<i>Desvanecimento Rice</i>	48
2.7.3	<i>Modelo de Jakes</i>	49
2.7.4	<i>Espalhamento Doppler</i>	51
2.8	Técnicas de diversidade	52

2.8.1	<i>Diversidade espacial de antena</i>	54
2.8.2	<i>Combinador de seleção (SC)</i>	58
2.8.3	<i>Combinador de proporção máxima (MRC)</i>	59
2.8.4	<i>Combinador de ganho equivalente (EGC)</i>	60
2.9	Orçamento de custos em um <i>link</i> de comunicação sem fio	60
3	TRABALHOS RELACIONADOS	63
3.1	Utilização de VANTs para coleta e envio de dados	63
3.2	Técnicas para aumento de desempenho na entrega de pacotes LoRa	65
3.3	Organização de células em espaço geográfico	67
3.4	Técnicas de agrupamento para alocação de dispositivos IoT	69
4	METODOLOGIA	74
4.1	Seleção do local de estudo para simulações	74
4.2	Enxame de VANTs	76
4.3	Células hexagonais, gateways e agrupamentos	78
4.4	Gerenciamento de varredura do enxame	81
4.5	Estrutura de rede e funções das estações LoRa	83
4.6	Características do simulador	86
4.6.1	<i>Algoritmos de agrupamentos implementados</i>	86
4.6.1.1	<i>Agrupamento uniforme de gateways</i>	87
4.6.1.2	<i>Agrupamento dinâmico de gateways</i>	87
4.6.2	<i>Autolocalização dos VANTs no espaço</i>	89
4.6.3	<i>Definição das métricas de desempenho</i>	91
4.7	Parâmetros de simulação e configuração dos experimentos	92
4.7.1	<i>1ª configuração de teste: divisão da região em 3 grupos</i>	94
4.7.2	<i>2ª configuração de teste: divisão da região em 8 grupos</i>	95
4.7.3	<i>3ª configuração de teste: divisão da região em 12 grupos</i>	96
4.8	Ambiente de desenvolvimento do simulador	97
5	RESULTADOS	98
5.1	Validação da curva de simulação com diferentes configurações de antenas de recepção	98
5.2	Variação da SNR em função da distância entre gateways e VANTs	100
5.3	Análise de variação na SNR	101

5.3.1	<i>Influência do número de antenas por gateway na SNR</i>	102
5.3.2	<i>Impacto do número de grupos na SNR</i>	102
5.3.3	<i>Comparação entre estratégias de agrupamento dinâmico e uniforme</i>	103
5.3.4	<i>Implicações práticas</i>	104
5.4	Análise da BER	104
5.4.1	<i>Influência do número de antenas por gateway</i>	105
5.4.2	<i>Variação entre configurações de grupos</i>	105
5.4.3	<i>Comparação entre as estratégias de alocação dinâmica e uniforme</i>	106
5.4.4	<i>Implicações Práticas</i>	106
5.5	Impacto dos fatores de espalhamento na BER total do sistema	106
6	CONCLUSÕES	109
6.1	Considerações finais	109
6.2	Trabalhos futuros	110
	REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, incêndios florestais devastadores têm impactado todo o planeta, com consequências humanas e ambientais destrutivas. De acordo com o relatório do PNUMA, as mudanças climáticas serão as principais responsáveis por incêndios florestais mais frequentes e intensos nas próximas décadas. Com base nessa pesquisa, estima-se que haverá um aumento global de incêndios extremos de 30% até 2050 e de 50% até o final do século (Yue *et al.*, 2022).

Apesar desses incêndios serem uma ocorrência natural em alguns ecossistemas florestais, as temporadas de queimadas estão se tornando mais frequentes, até mesmo em florestas tropicais onde essas queimadas são atípicas e particularmente prejudiciais (Roux *et al.*, 2022). Esses eventos, desencadeados por ações humanas ou por fenômenos naturais como raios, podem liberar dióxido de carbono e outros poluentes na atmosfera e, em casos graves, causar danos irreparáveis aos ecossistemas florestais (Pivello *et al.*, 2021). Além disso, a fumaça desses incêndios pode se espalhar por quilômetros, causando crises de saúde pública ao expor as pessoas a poluentes nocivos (Schwarz *et al.*, 2022).

Quando os incêndios se originam em ambientes hostis e remotos, como montanhas, florestas ou áreas suburbanas, eles podem se espalhar rapidamente fora de controle antes que sejam identificados de forma ágil e precisa por tecnologias de sensoriamento inteligente (Saraereh *et al.*, 2020). Tipicamente, os incêndios florestais eram detectados principalmente por observação humana a partir de torres de vigilância de incêndio e envolviam apenas ferramentas primitivas. No entanto, esses tipos de abordagens são ineficientes pois estão propensas a erros humanos (Barmpoutis *et al.*, 2020).

A detecção precoce é essencial no combate aos incêndios florestais, e nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) desempenha um papel fundamental ao possibilitar o monitoramento contínuo e a comunicação rápida de alertas (Bushnaq *et al.*, 2021). A maioria das soluções de detecção de incêndios florestais é baseada em sistemas ópticos que utilizam câmeras montadas em postes ou satélites que detectam nuvens de fumaça de incêndios que se elevam acima da copa das árvores. Esse tipo de abordagem tem importantes limitações, uma vez que a visão das câmeras pode ser prejudicada por possíveis obstáculos como nuvens e vegetação, dificultando a identificação de queimadas de forma preventiva (Liu *et al.*, 2021).

Faz-se necessário que o sistema de comunicação cubra grandes áreas geográficas com baixo consumo de energia, custo de produção reduzido e com a manutenção mínima necessária (Verma *et al.*, 2021). Em resposta a essa necessidade, destaca-se a rede de comunicação

denominada *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), que atende aos requisitos exigidos para esse tipo de problema: dispositivos com alcance de cobertura longo e elevada longevidade (Tadríst *et al.*, 2022). Dentre as várias tecnologias de rede LPWAN disponíveis no mercado, a rede LoRa se destaca. Com sua capacidade de cobrir grandes áreas com baixo consumo de energia, a rede LoRa oferece flexibilidade e robustez contra interferências, sendo particularmente adequada para ambientes desafiadores. Essas características permitem a detecção precoce de incêndios e uma resposta rápida às emergências.

Diante do exposto, os problemas de pesquisa que norteiam este estudo são:

- (i) Como podemos integrar de forma eficaz a tecnologia LoRa para garantir uma detecção rápida e confiável de incêndios florestais em reservas ambientais dispersas?
- (ii) Como essa integração pode melhorar significativamente a resposta emergencial e a preservação dos ecossistemas em áreas vulneráveis?

1.1 Justificativa

Diversos trabalhos sobre monitoramento de incêndios florestais que utilizam tecnologia LPWAN carecem de análises de métodos que ofereçam confiabilidade na entrega de dados (Ma *et al.*, 2021). Por outro lado, existem diversos trabalhos na literatura que demonstram técnicas para tornar um sistema de comunicação mais robusto e confiável mesmo em condições adversas. Entre as técnicas mais citadas e utilizadas estão a diversidade espacial, que pode amenizar os efeitos de desvanecimento e interferência (Li *et al.*, 2019). Neste trabalho, associamos a tecnologia LoRa a um arranjo de VANTs, explorando a diversidade espacial formada por um grupo de gateways em benefício do aumento da confiabilidade na entrega de pacotes tão críticos quanto os alertas de incêndio.

1.2 Motivação

Este trabalho propõe uma topologia de detecção de incêndios florestais em áreas remotas, utilizando-se da diversidade espacial inerente a um cenário constituído por gateways, estações centrais de processamento (EPCs), estação de recepção urbana (ERU) e VANTs. Para validar essa proposta, foram feitas simulações computacionais em um ambiente que replicou as características de uma unidade de conservação ambiental no Brasil. Essas simulações exploraram técnicas de combinação e diversidade espacial em sinais LoRa, baseando-se em modelos

matemáticos de modulação e demodulação apresentados por Vangelista (2017).

É importante destacar que neste trabalho não foram consideradas as especificações detalhadas do modelo de VANT utilizado, como a autonomia de bateria/combustível, ou mesmo preocupações relacionadas a inter-relação entre um conjunto de VANTs. Questões relacionadas ao uso de câmeras para a detecção de incêndios ou ao processamento de imagens diretamente no VANT também não foram abordadas, pois estão fora do escopo deste trabalho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Propor uma topologia de detecção de incêndios florestais a fim de melhorar a taxa de sucesso na entrega de pacotes LoRa.

1.3.2 Objetivos específicos

- Utilizar veículos aéreos não tripulados (VANTs) como portadores dos sensores de detecção de fumaça proveniente de incêndios florestais e transmissores de sinais de alerta;
- Propor uma arquitetura de rede que incorpore a diversidade espacial de recepção a fim de mitigar os efeitos do desvanecimento e melhorar a confiabilidade da comunicação;
- Investigar o uso de agrupamentos espaciais de gateways em ambientes geográficos como forma de aprimorar a recepção de alertas de incêndios.

1.4 Estrutura da monografia

A estrutura da monografia é delineada da seguinte forma: O Capítulo 2 estabelece a fundamentação teórica associada ao problema em estudo. Já no Capítulo 3, são expostos vários estudos relevantes e correlacionados com o escopo desta dissertação. O Capítulo 4 explora detalhadamente a metodologia adotada para estabelecer o cenário de detecção de incêndios florestais, assim como as técnicas utilizadas neste processo. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos computacionais realizados, os quais visam avaliar a eficácia da utilização de VANTs e da tecnologia LoRa na detecção e notificação de incêndios florestais. Por fim, no Capítulo 6, são compartilhadas as conclusões alcançadas até o presente momento e traçados os próximos passos a serem seguidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos necessários para o melhor entendimento teórico do leitor ao contexto em que está inserido este trabalho, bem como uma visão geral da aplicação do uso da tecnologia LoRa/LoRaWAN na identificação de incêndios florestais.

2.1 Unidades de conservação ambiental no Brasil

Ao longo do tempo, várias culturas e civilizações reconheceram a importância da preservação dos espaços naturais devido ao fato dessas áreas estarem muitas vezes ligadas a mitos e fatos históricos. O Brasil é um país que abrange quase metade da América do Sul, e possui a maior variedade de espécies no planeta, incluindo mais de 116 mil espécies animais e 46 mil espécies vegetais (Sparovek *et al.*, 2019). Toda essa biodiversidade está distribuída ao longo dos seis biomas brasileiros: Amazônia, Pantanal, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica e Pampas (Sano *et al.*, 2019).

Apesar da grande diversidade biológica que o Brasil possui, há o perigo de que ela se perca caso não sejam adotadas medidas de proteção aos biomas presentes em nosso território. Ainda, muitos biomas naturais já foram amplamente destruídos para dar lugar à ocupação humana, resultando na perda de grande parte de sua vegetação original (Silva *et al.*, 2020). Devido às práticas agrícolas e à urbanização do Brasil, todos os seus biomas estão em risco de serem extintos (Andrade *et al.*, 2019). Com o objetivo de mitigar os efeitos a longo prazo, o governo brasileiro preserva áreas naturais em todos os 26 estados e no Distrito Federal por meio de Unidades de Conservação (UCs). Nessas áreas, qualquer alteração somente pode ser realizada de acordo com a legislação vigente (Bacha, 2020).

As UCs são áreas naturais protegidas criadas pelo governo brasileiro, com o objetivo de preservar a biodiversidade, conservar e monitorar os recursos naturais, incentivar o desenvolvimento sustentável e garantir o uso racional dos recursos naturais (Jeronymo *et al.*, 2021). No Brasil, existem vários tipos de UCs com objetivos diferentes, como parques nacionais, reservas biológicas, áreas de proteção ambiental, monumentos naturais, áreas de relevo, áreas de preservação permanente, entre outros (Bacha, 2020).

Essas unidades são fundamentais para garantir a proteção das espécies da flora e da fauna, prevenir a destruição de ecossistemas, reduzir problemas ambientais, promover a

educação ambiental e contribuir para a economia local. O ICMBio, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, é responsável pelo comando de 968 unidades de conservação (UCs) em território brasileiro (Jeronymo *et al.*, 2021). Desde 2007, essas UCs foram divididas em duas categorias principais: áreas de proteção integral (PI) e áreas de uso sustentável (US) (Sparovek *et al.*, 2019).

As áreas de proteção integral têm como objetivo preservar os ambientes naturais, permitindo somente usos que não afetem a natureza (Bacha, 2020). Atividades como turismo ecológico, recreação, pesquisa científica e educação ambiental são exemplos de proteção integral. As unidades de uso sustentável, por sua vez, oferecem a possibilidade de uso dos recursos naturais de forma sustentável, mantendo a natureza protegida (Oliveira-Arbex *et al.*, 2020).

A Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, criou o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) (Bacha, 2020). O principal objetivo do SNUC é estabelecer diretrizes e regulamentos para a criação, implantação e administração das unidades de conservação. Para isso, o SNUC é gerenciado pelos três níveis de governo (federal, estadual e municipal). A administração federal é responsável por 51,1% das unidades de conservação ambiental existentes no Brasil. Os órgãos estaduais e municipais são responsáveis por 45,3% e 3,6% dessas áreas, respectivamente (Jeronymo *et al.*, 2021; Sparovek *et al.*, 2019).

Apesar do reconhecimento crescente do valor da biodiversidade para as gerações atuais e futuras, as atividades humanas, como queimadas, desmatamento e extrativismo ilegal, continuam contribuindo para a diminuição drástica de espécies. É necessário que tecnologias assistivas em conjunto com a conscientização da população sejam necessárias para uma preservação eficaz dessas áreas tão importantes.

2.2 Dinâmica de dispersão de incêndios florestais

Apesar de serem difíceis de se investigar em laboratório, as grandes queimadas florestais e suas fumaças resultantes podem ser mais bem compreendidas através de experimentos realizados na atmosfera. Esta é uma das melhores maneiras de obter informações sobre o comportamento da fumaça de um incêndio florestal (Roux *et al.*, 2022).

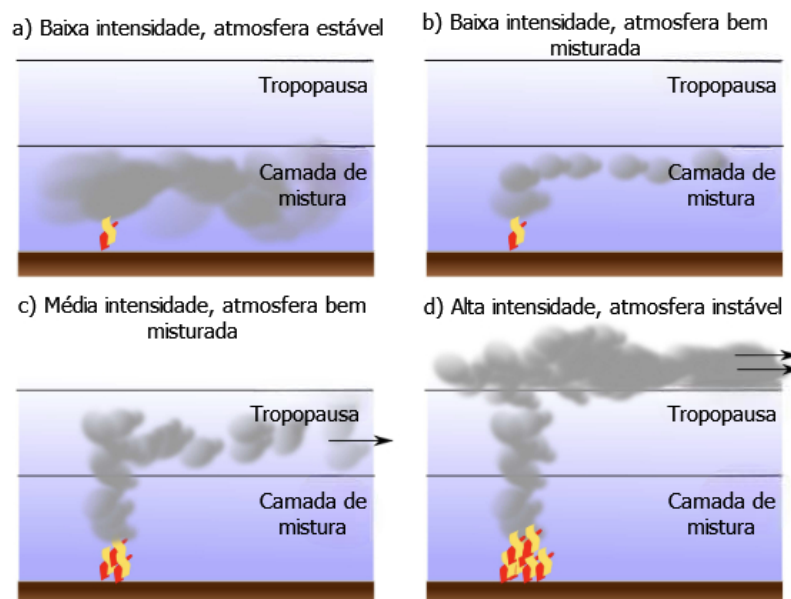
As fumaças decorrentes dos incêndios florestais são extremamente complexas e variáveis. Esses incêndios emitem uma grande variedade de compostos químicos na forma de gases, muitos dos quais são compostos por átomos de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio em diferentes proporções (Schwarz *et al.*, 2022). É necessário aplicar diversos instrumentos para

mensurar todas essas moléculas ao mesmo tempo (Pivello *et al.*, 2021). Alguns compostos são difíceis de serem medidos, o que torna esse estudo ainda mais desafiador (Bencherif *et al.*,).

À medida que um incêndio florestal aumenta em intensidade, grandes quantidades de fumaça são liberadas na atmosfera. Quanto maior a intensidade, maior a altitude alcançada pela fumaça. Uma vez que a fumaça alcança altitudes mais elevadas, ela pode viajar milhares de quilômetros na estratosfera da Terra (Bencherif *et al.*, ; Pivello *et al.*, 2021; Kahn *et al.*, 2022). Por outro lado, a fumaça que fica presa em altitudes mais baixas tende a afetar apenas as comunidades próximas ao incêndio, não tendo a capacidade de percorrer distâncias mais longas.

No trabalho de Williamson *et al.* (2016), há um estudo que investiga como a fumaça resultante de um incêndio florestal pode ser dispersa na atmosfera. A Figura 1 ilustra a classificação proposta pelos autores em diferentes condições atmosféricas e níveis de gravidade do incêndio: (a) um incêndio de baixa intensidade em uma atmosfera estável, onde a fumaça permanece limitada à parte inferior da troposfera; (b) um incêndio de baixa intensidade em uma atmosfera propícia à dispersão eficiente dos gases, resultando no transporte regional da fumaça pela troposfera; (c) um incêndio moderadamente intenso em uma atmosfera com a presença de gases bem misturados, permitindo que a fumaça ultrapasse a troposfera e seja transportada a grandes distâncias; (d) Um incêndio de alta intensidade em uma atmosfera instável gera fumaça que alcança a estratosfera e se dispersa globalmente.

Figura 1 – Exemplos de dispersão de fumaça sob uma variedade de condições atmosféricas e intensidades de incêndio.



Fonte: Adaptado de (Williamson *et al.*, 2016).

Uma das maneiras mais eficazes de coletar informações sobre incêndios florestais é por meio da observação de satélites, entretanto, a maioria dos instrumentos de satélite está limitada a observações em direção à superfície terrestre ou ao horizonte planetário (Pivello *et al.*, 2021). Para entender o clima da Terra e determinar como ele pode estar mudando, é necessário saber a quantidade de luz solar que é espalhada em diferentes direções sob condições naturais (Tomas *et al.*, 2021). Dessa forma, a NASA¹, agência espacial estado-unidense, desenvolveu um novo tipo de instrumento projetado para atender a essa necessidade. Trata-se de uma ferramenta capaz de observar a Terra com câmeras apontadas em nove ângulos diferentes. Esse instrumento é conhecido por MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*) (Kahn *et al.*, 2022).

À medida que o instrumento sobrevoa, cada região da superfície da Terra é sucessivamente fotografada por todas as nove câmeras em cada um dos quatro comprimentos de onda (azul, verde, vermelho e infravermelho) (Kahn *et al.*, 2022). Uma das tarefas mais importantes do MISR é monitorar a quantidade e o tipo de partículas de aerossóis lançadas na atmosfera, incluindo aquelas formadas por fontes naturais e por atividades humanas. Estes dados são divulgados diariamente no *NASA Earth Observatory*, uma publicação online da NASA que foi criada em 1999 (Observatory, 2018). Esse periódico é a principal fonte de imagens de satélite e outras informações científicas relativas ao clima e ao meio ambiente que estão sendo fornecidas para consulta pelo público em geral (Schwarz *et al.*, 2022; Pivello *et al.*, 2021).

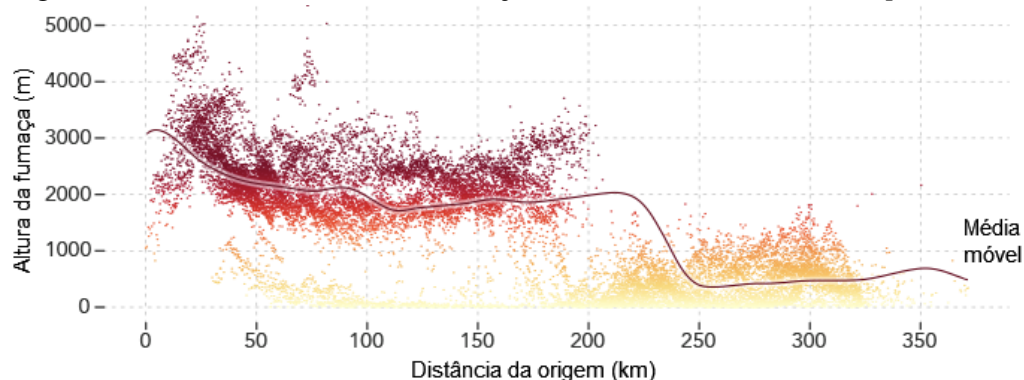
As informações multiangulares das imagens do MISR são usadas para calcular a altura das nuvens de fumaça. No ano de 2021, o MISR da NASA capturou essas nuvens de cinco incêndios no norte da Califórnia (Schwarz *et al.*, 2022). Foi constatado que, em áreas mais próximas dos focos de incêndio, a fumaça alcançou cerca de 6 quilômetros de altitude, enquanto que em áreas mais distantes, a fumaça alcançou 3 quilômetros. Em geral, as nuvens de maior altitude transportam a fumaça a distâncias maiores da fonte, impactando as comunidades de acordo com o vento (Schwarz *et al.*, 2022; Kahn *et al.*, 2022).

Em 2018, a Califórnia presenciou o incêndio florestal mais mortal e destrutivo de sua história, sendo o desastre natural mais caro do mundo naquele ano em termos de perdas seguradas (Syifa *et al.*, 2020; Schwarz *et al.*, 2022). Durante o incêndio *Camp Fire*, como foi posteriormente intitulado, o MISR foi capaz de reunir uma ampla gama de dados sobre o alcance das nuvens de fumaça deste incêndio. A Figura 2 mostra um gráfico da altura e do raio de alcance da fumaça medidos pelo MISR em diferentes distâncias a partir do foco inicial do incêndio.

¹ <https://www.nasa.gov/>

Percebe-se que a fumaça conseguiu alcançar mais de 4 quilômetros de altitude próximos aos focos de incêndio (pontos em vermelho) e mais de 300 quilômetros de distância horizontalmente (Kahn *et al.*, 2022; Tomas *et al.*, 2021). Conforme a fumaça se espalha, ela vai perdendo altitude (pontos em amarelo).

Figura 2 – Fluxo descendente de fumaças liberadas no incêndio *Camp Fire* (2018).



Fonte: Adaptado de (Observatory, 2018).

Outros incêndios florestais foram capazes de transportar fumaça a uma distância maior do que foi registrado durante o *Camp Fire*. Como exemplo, podemos destacar a tarde de 19 de agosto de 2019, quando fumaças provenientes de incêndios da Amazônia foram detectadas na cidade de São Paulo, cerca de 2000 quilômetros de distância dos focos iniciais (Pivello *et al.*, 2021; Tomas *et al.*, 2021). O mesmo fenômeno também aconteceu em setembro de 2020, quando nuvens de fumaças provocadas por queimadas no Pantanal atingiram os céus de São Paulo (Pivello *et al.*, 2021; Bencherif *et al.*, ; Tomas *et al.*, 2021). Por meio dessas informações, percebe-se que a dinâmica de espalhamento de fumaças provenientes de incêndios florestais pode alcançar dezenas ou até milhares de quilômetros a partir dos focos iniciais.

2.3 Modelagem simplificada da dispersão de fumaças em incêndios florestais

A distância que as fumaças de um incêndio florestal podem se espalhar depende de diversos fatores, incluindo a intensidade e direção dos ventos locais, o tamanho e duração do incêndio, a quantidade e tipo de material queimado, a topografia e a umidade do ar (Williamson *et al.*, 2016). Na região de Altamira, os ventos predominantes sopram do sudeste para o noroeste, o que significa que a fumaça dos incêndios pode ser levada em direção às áreas urbanas da região, como a própria cidade de Altamira e municípios vizinhos (BRAGA JUNIOR, Euclides de Oliveira, 2018).

A altitude em que as fumaças podem se elevar também depende dos mesmos fatores, mas normalmente elas podem atingir altitudes elevadas o suficiente para serem transportadas por centenas de quilômetros, dependendo das condições atmosféricas (Observatory, 2018). Devido às complexidades envolvidas na simulação da dinâmica de dispersão de fumaças em grandes áreas, muitas vezes podemos explorar modelos matemáticos mais simples que ainda assim satisfaçam nossos objetivos de estudo. Dessa forma, podemos obter resultados eficientes para avaliar o desempenho de redes de monitoramento de incêndios florestais em diferentes cenários (Nicolaou; Checkley, 2021).

A técnica de Estimativa de Densidade do Kernel (KDE) pode ser uma solução simples e eficaz para simular o comportamento das fumaças liberadas por incêndios em Altamira. É importante lembrar que o foco da nossa simulação não é detalhar a dinâmica de dispersão das fumaças, mas sim analisar métricas de desempenho que afetam o comportamento da rede nesse cenário de identificação de queimadas. O KDE é uma técnica estatística que estima a função de densidade de probabilidade a partir de um conjunto de dados (Silva *et al.*, 2020). Nesse caso, podemos utilizar o KDE para gerar uma distribuição de fumaça a partir das informações de direção e intensidade do vento, além da localização do incêndio.

A função KDE tem diversas aplicações em análise de dados espaciais, incluindo o monitoramento de incêndios florestais e outras situações de emergência ambiental. No artigo Silva *et al.* (2020), por exemplo, os autores utilizaram a função KDE para analisar os padrões de queimadas na região do Pantanal, a fim de identificar áreas com maior risco de incêndios e orientar políticas de prevenção e combate. Já os autores de Xu *et al.* (2022) utilizaram a técnica de KDE para analisar a distribuição espacial dos casos de COVID-19 em Wuhan, na China.

Os autores desse estudo usaram dados de auto-relato da população, combinados com informações socioeconômicas e de mobilidade, para identificar padrões de disseminação do vírus e fatores que influenciaram sua propagação em diferentes áreas da cidade. Por outro lado, os autores do artigo Huang *et al.* (2019) utilizaram a função KDE para representar a distribuição espacial das emissões de fumaça de incêndios florestais, a fim de realizar simulações de exposição à fumaça para avaliar os riscos à saúde.

A fórmula matemática que define a KDE com núcleo Gaussiano é dada por:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right), \quad (2.1)$$

onde $\hat{f}_h(x)$ é a estimativa da densidade de probabilidade da variável aleatória X no ponto x , n

é o número de observações, h é a largura de banda, uma constante que determina o grau de suavização da curva de densidade, X_i é a i -ésima observação, e K é a função de densidade do núcleo, que neste caso é a função densidade de probabilidade de uma distribuição normal:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (2.2)$$

A KDE com núcleo Gaussiano é amplamente utilizada para estimar a densidade de probabilidade em dados contínuos, sendo uma técnica simples e flexível para modelagem de dados. A biblioteca *scikit-learn* em Python possui uma função de estimativa de densidade do kernel com núcleo Gaussiano que permite gerar uma distribuição de probabilidade suave a partir de um conjunto de dados observados.

2.4 Sensores e módulos para facilitar a identificação incêndios

Nos esforços para combater incêndios florestais, a tecnologia desempenha um papel importante na detecção precoce e no acompanhamento eficiente dos focos de fumaça. Nesta seção, exploramos três componentes essenciais para a identificação eficaz de incêndios: detectores de fumaça por dispersão óptica, sensores de vetores de vento e o sistema de posicionamento global (GPS).

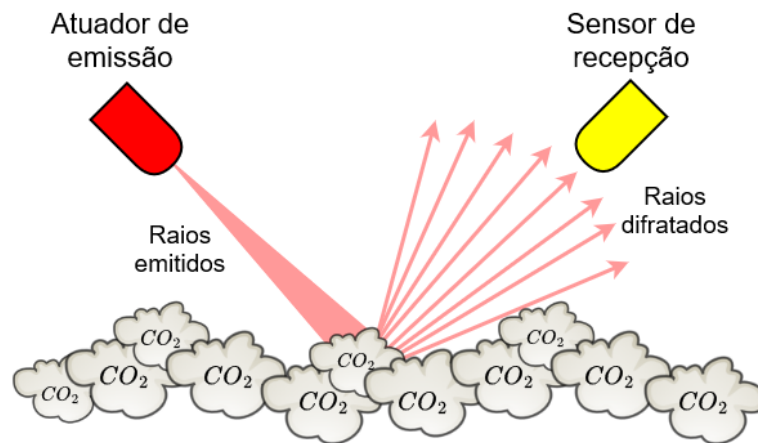
2.4.1 Detectores de fumaça por dispersão óptica

Os detectores de fumaça por dispersão óptica operam não apenas com base nos princípios ópticos convencionais, mas também incorporam o princípio do movimento browniano para aumentar a eficácia na identificação de partículas de fumaça no ar. Além de detectar variações na intensidade da luz causadas pela presença de partículas, esses dispositivos observam o movimento aleatório dessas partículas, conhecido como movimento browniano (Stephan, 2023).

O movimento browniano é o movimento caótico e imprevisível das partículas em um fluido, como o ar (Misono, 2019). Ao integrar essa abordagem, os detectores podem distinguir com maior precisão entre partículas de fumaça e outros elementos no ambiente, proporcionando uma detecção mais confiável de focos de incêndio. Essa combinação de princípios ópticos e movimento browniano contribui para uma resposta mais rápida e precisa diante das condições dinâmicas associadas aos incêndios florestais (Yue *et al.*, 2022).

Na Figura 3 é representado o esquemático de funcionamento desse tipo de dispositivo. Esse tipo de detector geralmente consiste em uma fonte de luz (atuador) e um fotodiodo posicionado em um ângulo específico em relação à fonte de luz (sensor). Quando não há fumaça presente, a luz emitida pela fonte de luz não é detectada pelo fotodiodo. No entanto, quando há fumaça no ambiente, as partículas de fumaça dispersam a luz, criando um feixe de luz dispersa que é captado pelo fotodiodo. Esse feixe de luz disperso, também conhecido como raio refratado, é detectado como um sinal de alarme pelo sensor.

Figura 3 – Modelo de detector de fumaça por dispersão óptica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Seja L a luminosidade medida pelo sensor óptico e L_{max} a luminosidade máxima medida em condições sem fumaça. A relação matemática para a intensidade de fumaça (I_L) na escala de 0 a 10 pode ser expressa como:

$$I_L = 10 \times \left(1 - \frac{L}{L_{max}} \right). \quad (2.3)$$

Essa relação assume que a luminosidade diminui à medida que a presença de fumaça aumenta. A intensidade da fumaça é então ajustada para uma escala de 0 a 10. Quanto mais próxima de 10 for a intensidade da fumaça em uma área específica, mais provável é que o foco do incêndio esteja próximo. Por outro lado, quanto mais próximo de zero estiver, maior a probabilidade de o foco identificado estar distante. Isso ocorre porque a fumaça está dispersa, sugerindo que está distante de seu ponto de origem. O modelo de detector óptico adotado nos VANTs segue essa relação, permitindo uma avaliação eficaz da intensidade de fumaça em tempo real durante as operações de monitoramento.

2.4.2 Sensores de direção de vento

Os sensores de vetores de vento são fundamentais para compreender o comportamento e a propagação do fogo. Ao monitorar a velocidade e a direção do vento, esses sensores fornecem informações cruciais para prever a trajetória do incêndio. Tecnologias como anemômetros e medidores de direção são comumente utilizadas para obter dados precisos sobre as condições atmosféricas (Alablani; Alenazi, 2020).

A direção do vento pode ser representada por um vetor em um plano bidimensional, onde o vetor indica a direção do vento e o seu comprimento representa a intensidade do vento. A direção do vento é geralmente expressa em termos de ângulo em relação ao norte, no sentido horário (Barmpoutis *et al.*, 2020; Bushnaq *et al.*, 2021).

Na meteorologia, o vetor de vento é frequentemente decomposto em duas componentes horizontais: u (velocidade leste-oeste) e v (velocidade norte-sul). Juntas, essas componentes compõem o vetor de vento tridimensional (Barmpoutis *et al.*, 2020). A fórmula utilizada para calcular a direção do vento (θ) a partir das componentes u e v é representada pela seguinte relação matemática:

$$\theta = \arctan\left(\frac{u}{v}\right) \times \left(\frac{180}{\pi}\right). \quad (2.4)$$

Existem diversos modelos de anemômetros no mercado. Porém, o mais adequado a ser utilizado em VANTs, é o anemômetro ultrasônico (Angrisani *et al.*, 2019). Esse dispositivo é disponibilizado em diversos tamanhos e é utilizado para medir velocidade e direção do vento. O anemômetro emite ondas ultrasônicas em várias direções usando dois ou mais transdutores ultrasônicos para emitir e receber as ondas, assim como representado na Figura 4a (Barmpoutis *et al.*, 2020).

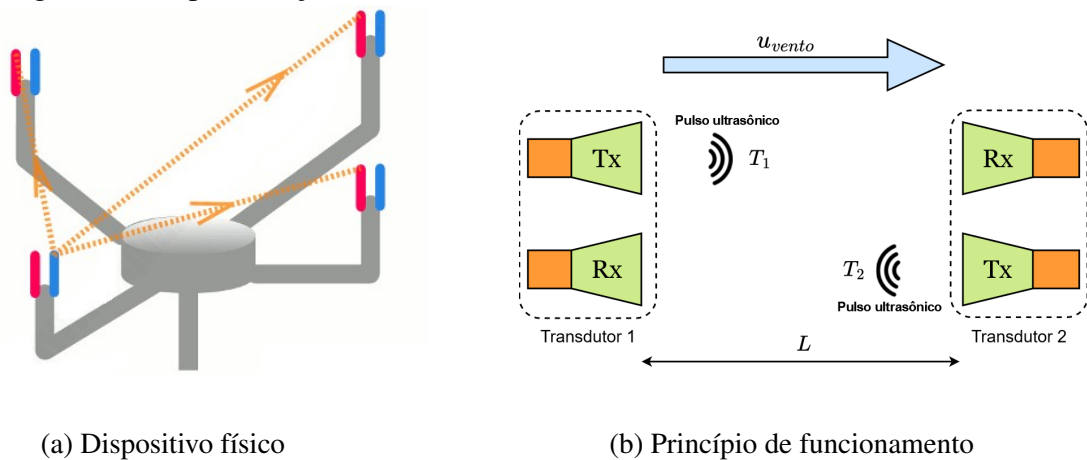
O dispositivo funciona por meio do princípio de tempo de trânsito, onde um transdutor emite um pulso ultrasônico em direção ao vento e outro transdutor recebe o pulso após ele ter viajado uma certa distância. Quando o vento está soprando, ele afeta a velocidade com que o pulso ultrasônico viaja. Se o vento estiver a favor do pulso, ele o acelera, diminuindo o tempo de trânsito. Se estiver contrário, ele o retarda, aumentando o tempo de trânsito (Barmpoutis *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021).

Esse princípio de funcionamento é representado na Figura 4b. A partir da diferença de tempo entre a emissão e a recepção do pulso, o anemômetro pode calcular a velocidade ou

direção do vento. Quanto maior a diferença de tempo, maior a velocidade do vento. Este método permite medições precisas mesmo em baixas velocidades de vento, pois não há inércia mecânica a ser superada (Angrisani *et al.*, 2019).

Geralmente, anemômetros ultrassônicos são mais precisos e robustos do que os anemômetros tradicionais de copo ou de hélice, porque não têm partes móveis sujeitas a desgaste e não são afetados por congelamento ou acúmulo de detritos.

Figura 4 – Representação de um anemômetro ultrassônico.



Fonte: Adaptado de (Salah, 2023).

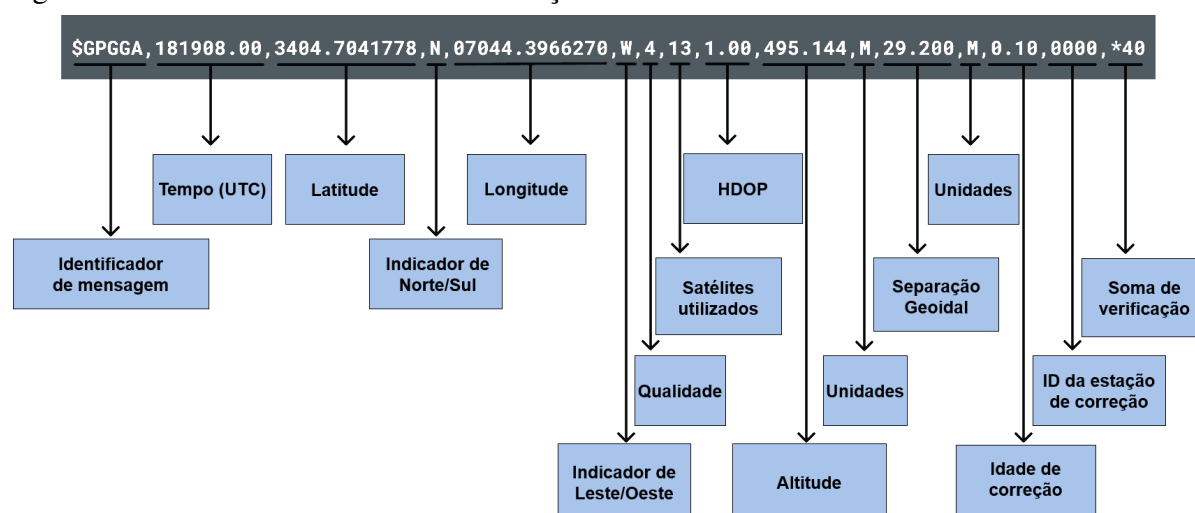
2.4.3 Módulo de posicionamento global

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é um termo genérico que se refere a qualquer sistema global de navegação por satélite (Aughey, 2011). O GPS (*Global Positioning System*) é um dos sistemas GNSS mais conhecidos e utilizados. Embora o Sistema de Posicionamento Global (GPS) dos Estados Unidos seja o GNSS mais utilizado no mundo, outros GNSS também estão disponíveis. Estes incluem o sistema de Navegação por Satélite *BeiDou* (BDS) da China, a Constelação Indiana de Navegação (NavIC) da Índia, o Sistema Global de Navegação Europeu (Galileo) da Europa, o Sistema de Satélites *Quasi-Zenith* (QZSS) do Japão e o Sistema Global de Navegação por Satélite (GLONASS) da Rússia (Langley, 1995; Aughey, 2011).

Receptores de GPS se comunicam usando vários protocolos, incluindo formatos de mensagem padronizados ou não. Nestes protocolos de mensagens, as informações podem ser transmitidas como dados binários ou usando a codificação de caracteres ASCII. De todos os padrões de mensagem usados com receptores de GPS, o NMEA (*National Marine Electronics Association*) é o padrão de mensagens mais amplamente utilizado (Langley, 1995).

O NMEA 0183, representado visualmente pela Figura 5, é um protocolo de mensagens simples, onde os dados neste protocolo de mensagens são transmitidos em strings ASCII ou “sentenças” de um “emissor” para múltiplos “receptores” ao mesmo tempo (Langley, 1995). Para os propósitos desta dissertação, concentramo-nos na integração de módulos GPS em VANTs que operam utilizando o protocolo NMEA 0183. No entanto, estamos interessados especificamente em três campos das mensagens: marca temporal (*timestamp*), latitude e longitude.

Figura 5 – Estrutura básica de uma sentença NMEA 0183.



Fonte: Adaptado de (Bagur, 2023).

Além disso, ao registrar a marca temporal nos pacotes LoRa, torna-se viável a sincronização dos dados provenientes de diversas fontes, permitindo correlacionar eventos com precisão temporal. Adicionalmente, a disponibilidade de informações precisas de latitude e longitude facilita a análise geoespacial pós-voe e a elaboração de relatórios detalhados sobre os trajetos percorridos e os locais visitados pelos VANTs.

A combinação de dados de GPS com outras informações, como dados meteorológicos e resultados de sensores, possibilita uma compreensão abrangente da situação, facilitando a tomada de decisões informadas para um gerenciamento eficaz de incêndios florestais.

2.5 Veículos aéreos não tripulados

Os Veículos aéreos não tripulados (VANTs) constituem o componente móvel da arquitetura de telecomunicação proposta, estando equipados com sensores ópticos para a detecção de fumaça e sensores de vetores de velocidade do vento. Deslocando-se a uma velocidade constante sobre as células hexagonais, os VANTs também realizam a coleta de dados, incluindo

latitude, longitude e *timestamp* por meio de GPS. Essa abordagem móvel apresenta vantagens significativas na eficiência de cobertura da área monitorada quando comparada com sensores estáticos distribuídos no solo (Tadrist *et al.*, 2022).

A presença de múltiplos VANTs visa aprimorar a capacidade de identificar emissões de dióxido de carbono provenientes de incêndios florestais, manifestando-se como nuvens de fumaça no ambiente. Trabalhando de maneira coordenada, os VANTs podem realizar uma varredura em uma área expandida e identificar a presença de fumaça de modo mais eficiente e ágil do que se cada VANT operasse individualmente (Angrisani *et al.*, 2019).

Os VANTs desempenham dois papéis fundamentais nesse contexto: identificam a presença de fumaça no ambiente e transmitem informações por meio de um *broadcast* para os gateways de um mesmo agrupamento, utilizando um canal LoRa. Cada VANT é equipado com uma antena omnidirecional para efetuar essa comunicação. Nos gateways, há várias antenas omnidirecionais colocadas² que são responsáveis por captar os sinais com diferentes níveis de SNR provenientes dos VANTs.

2.6 O protocolo LoRaWAN

Desenvolvido pela *LoRa Alliance*³, – um fórum industrial internacional com mais de 500 membros –, a rede LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) foi criada para fornecer uma solução de conectividade segura altamente escalável e de baixo custo que também suporta recursos avançados. Dentre eles, podemos citar recursos de *multicast*, atualizações de *firmware over-the-air* e geolocalização baseada em rede (Yegin *et al.*, 2020).

2.6.1 Topologia e componentes da rede

Na Figura 6 é ilustrada uma típica topologia em estrela empregada em redes LoRaWAN, similar a redes de telefonia celular ou redes Wi-Fi infraestruturadas. A arquitetura dessa rede consiste em nós ou dispositivos finais, gateways, servidor de rede e servidores de aplicações (Yu *et al.*, 2017; Manzano *et al.*, 2021). Dispositivos finais são sensores ou atuadores que enviam ou recebem mensagens sem fio moduladas através da camada física do LoRa para os gateways. Os concentradores ou gateways, por sua vez, são equipamentos que recebem mensagens dos dispositivos finais e os encaminham para o servidor de rede (Kim *et al.*, 2020; Gopal; Prabhakar,

² A colocação refere-se à prática de instalar várias antenas em uma única torre ou estrutura.

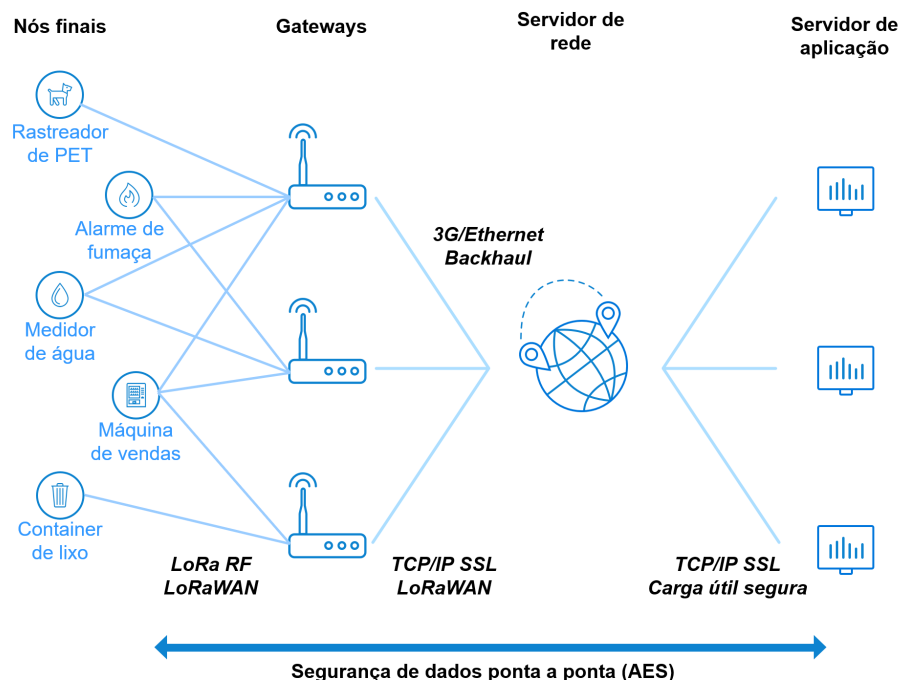
³ <https://lora-alliance.org/>

2020).

O servidor de rede gerencia e mantém a rede LoRaWAN. Ele é o principal responsável pela coleta de dados dos gateways e pela filtragem de mensagens duplicadas (Liando *et al.*, 2019). Além disso, o servidor decide qual gateway deve responder as mensagens dos dispositivos finais e adapta as taxas de dados para prolongar a vida útil da bateria dos dispositivos LoRa. O protocolo LoRaWAN suporta mensagens de *uplink* e *downlink*; o sentido de comunicação do dispositivo final para o servidor de rede é chamado de *uplink*; e o sentido de comunicação do servidor de rede para o dispositivo final é chamado de *downlink* (Wiklundh, 2019; Noreen *et al.*, 2017).

Na borda final da topologia da rede está o servidor de aplicação. Esse servidor é uma forma moderna de *middleware* de plataforma que disponibiliza um ambiente para a instalação e execução de aplicações diversas. Ele é o ator responsável por prover uma interface de interação com o usuário para visualização dos dados que percorreram toda a rede, o que possibilita um monitoramento da aplicação auxiliando na tomada de decisões (Liando *et al.*, 2019).

Figura 6 – Uma arquitetura de rede LoRaWAN típica.



Fonte: Adaptado de Network (2020).

A maneira mais comum de utilizar a rede LoRaWAN é pelo envio de mensagens *uplink* por um sensor para que possa relatar qualquer valor ao servidor de aplicação. Sob certas condições, pode ser útil utilizar uma mensagem de *downlink* para fornecer ao sensor uma

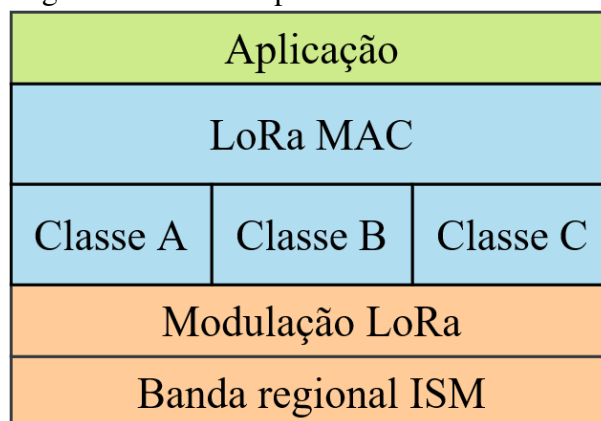
confirmação para deixar claro que a mensagem chegou no receptor e que será encaminhada à aplicação final de usuário (Magrin *et al.*, 2017). Essas mensagens também podem ser utilizadas para controlar as configurações de um sensor, por exemplo, para ajustar sua frequência de atualização ou quaisquer outras configurações no dispositivo. Outra aplicação das mensagens de *downlink* poderia ser, por exemplo, o controle de uma válvula ou uma fechadura de um atuador.

Além disso, o protocolo LoRaWAN fornece padrão de criptografia avançada (AES) de dados dos dispositivos finais para o servidor de aplicação (Yu *et al.*, 2017). As propriedades básicas de segurança da rede são autenticação, integridade e confidencialidade. Autenticação é atribuída para proteger a identidade dos dispositivos finais. Isso garante que apenas dispositivos autorizados ingressem na rede. A proteção de integridade é fornecida para garantir que as mensagens não sejam alteradas pelo método de validação. A confidencialidade é obrigatória para garantir que terceiros não consigam ler as informações transmitidas (Manzano *et al.*, 2021; Yegin *et al.*, 2020).

2.6.2 Pilha de Protocolos LoRaWAN

O protocolo de rede LoRaWAN é implementado sobre a camada física LoRa. A pilha consiste em três camadas, que são: a camada física, a camada de controle de acesso à mídia (MAC) e a camada de aplicação, como mostrado na Figura 7. A camada de aplicação lida com os dados transmitidos pela rede, enquanto que a camada MAC implementa o protocolo LoRaWAN de acordo com a classificação da classe do dispositivo final. A última camada lida com a modulação sem fio LoRa (Wiklundh, 2019; Vangelista, 2017).

Figura 7 – Pilha de protocolos LoRaWAN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A especificação LoRaWAN define três tipos de dispositivos finais: classe A, classe

B e classe C. Todos dispositivos devem implementar a classe A; as classes B e C são extensões da especificação de dispositivos da classe A (Haxhibeqiri *et al.*, 2018). De acordo com a classe do dispositivo, alguns parâmetros de eficiência energética são definidos.

Dentre todas as classes, a classe A é a que oferece a configuração mais econômica em termos energéticos. Nessa configuração, os dispositivos são alimentados por bateria e a comunicação de *downlink* ocorre em duas janelas curtas de tempo após uma janela de *uplink*. A maioria dos dispositivos que utilizam a pilha LoRaWAN suporta essa classe, pois a potência de consumo é menor do que as demais (Wiklundh, 2019).

Na classe B, os dispositivos abrem janelas temporais de recebimento programadas para receber mensagens de *downlink* do servidor de rede. Esse processo é sincronizado através do envio de um sinal de *beacon* pelos gateways, permitindo que eles percebam quando o dispositivo final estará monitorando o canal de comunicação. A duração da bateria é menor em dispositivos da classe B do que na classe A (Wiklundh, 2019).

Os dispositivos classe C podem monitorar o *downlink* o tempo todo, exceto quando estiverem no modo de transmissão. No modo de recepção, é aberta uma janela de *downlink* que será fechada quando o dispositivo final passar a transmitir dados (Wiklundh, 2019). Portanto, espera-se que dispositivos desta classe consumam mais energia que os dispositivos da classe A e B. Por outro lado, os dispositivos da classe C possuem a menor latência entre dispositivos finais LoRa (Yu *et al.*, 2017).

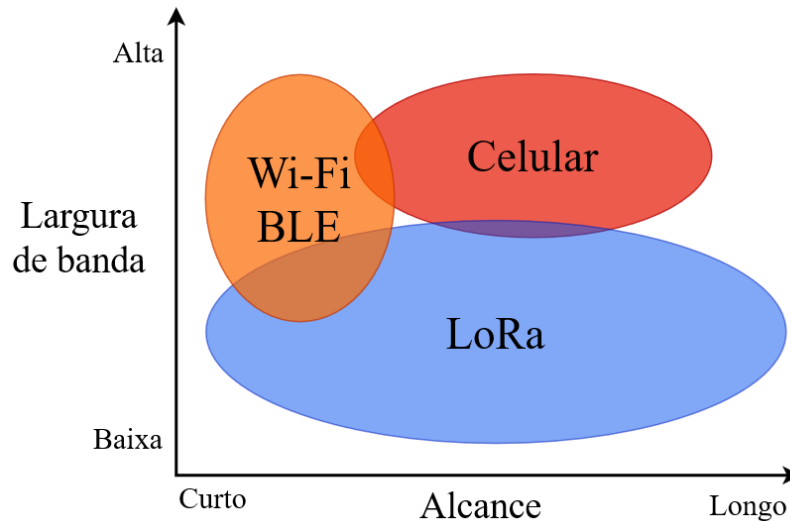
A camada física do LoRa é responsável por mapear os bits de informações das camadas superiores em sinais do tipo *chirps* modulados para faixas de frequências não licenciadas⁴. Nesta camada realizam-se a modulação e demodulação LoRa, as quais serão discutidas na próxima subseção. A frequência de operação LoRa varia para diferentes regiões do planeta e utiliza frequências de banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) (Ameloot *et al.*, 2020).

A utilização da modulação LoRa é bastante adequada para transmitir dados com baixas taxas de transmissão (Ma *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020). Em compensação, a informação pode ser transmitida por um alcance muito maior quando comparado a outras tecnologias de comunicação sem fio, como mostrado na Figura 8 (Manzano *et al.*, 2021). A figura compara algumas tecnologias de acordo com a dimensão de cobertura em função das suas capacidades de transmissão. Observa-se que os recursos apresentados na imagem tornam o LoRa adequado para

⁴ O uso de frequências não licenciadas de rádio é permitido para qualquer pessoa sem a necessidade de pagamento de taxas pelos direitos de transmissão, sujeito às regulamentações pertinentes estabelecidas pelas autoridades competentes.

sensores e atuadores que operam no modo de baixo consumo energético.

Figura 8 – Comparativo de alcance e largura de banda de redes sem fio.



Fonte: Adaptado de (Network, 2020).

2.6.3 Modulação LoRa

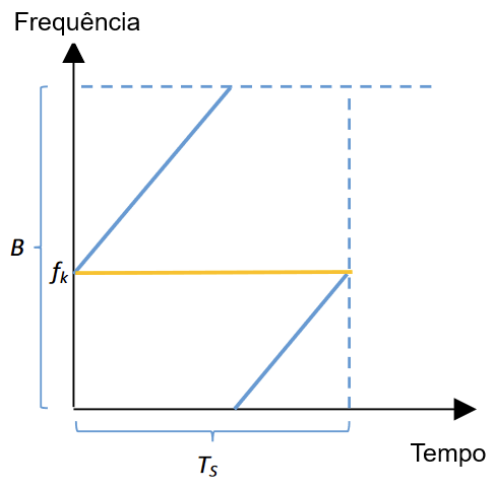
O termo LoRa refere-se apenas à técnica de modulação desenvolvida e patenteada pela empresa *Semtech* (Saraereh *et al.*, 2020). Essa técnica é responsável pela modulação de sinais por meio do procedimento de espalhamento espectral conhecido como *Chirp Spread Spectrum* (CSS). O bit de informação é mapeado para símbolo, e então modulado para *chirp* (Haxhibeqiri *et al.*, 2018).

Os principais parâmetros da modulação LoRa são largura de banda (B), fator de espalhamento (SF) e taxa de codificação (CR). O valor de B, que pode assumir 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, mostra o quão ampla será a banda do canal lógico, limitando portanto qual será a largura de banda do sinal modulado. O fator de espalhamento se resume à razão entre largura de banda do sinal modulado e do sinal antes de ser modulado. Dado que a largura de banda do sinal modulado é fixada em B, o fator de espalhamento permite controlar a velocidade da transmissão de dados e utiliza valores de 7 a 12. Por fim, o parâmetro CR é usado no módulo FEC (*Forward Error Correction*) para especificar quanta redundância é inserida, sendo definido por $\frac{4}{4+n}$, onde $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ (Wiklundh, 2019; Ameloot *et al.*, 2020).

Nas redes LoRaWAN os sinais são divididos em 2^{SF} chips com duração de $T = \frac{1}{B}$ segundos (Goursaud; Gorce, 2015). Cada símbolo gerado possui 2^{SF} bits de informação e é

transmitido em uma janela temporal de transmissão de $T_s = 2^{SF} \cdot T$ segundos. Isso é representado na Figura 9, em que cada símbolo LoRa é modulado com uma frequência portadora inicial de $f_k = \frac{B_k}{2^{SF}}$ em um sinal do tipo *chirp*. Dessa forma, a frequência portadora do sinal cresce linearmente com um ângulo de $\frac{B^2}{2^{SF}}$ graus a partir de f_k até alcançar o valor máximo de B . Nesse instante, o *chip* recomeça em 0 e termina em f_k no tempo total T_s (Wiklundh, 2019).

Figura 9 – Princípio da modulação de frequência do sinal LoRa.



Fonte: Adaptado de (Wiklundh, 2019).

Um fator de espalhamento maior aumenta o tempo dos pacotes no ar, o que aumenta o consumo de energia, aumenta as chances de colisão de pacotes, reduz a taxa de dados e melhora o alcance de comunicação. Quanto menores são os fatores de espalhamento, maior é a taxa de dados, porém o alcance é reduzido e a transmissão de dados ocorre de forma mais rápida. À medida que a taxa de codificação diminui, o tempo de permanência no ar de uma transmissão aumenta. Essa dinâmica facilita o processo de recepção, pois cada símbolo será mais amplo no tempo, permitindo que o receptor demodule sinais com menor potência (Goursaud; Gorce, 2015; Faber *et al.*, 2020).

De acordo com Vangelista (2017), um símbolo $s(nT_s)$ é um número real formado por um vetor $w(nT_s)$ de dígitos binários definido da seguinte forma:

$$s(nT_s) = \sum_{h=0}^{SF-1} w(nT_s)_h \cdot 2^h. \quad (2.5)$$

Da mesma forma, Vangelista (2017) define o sinal LoRa como sendo uma forma de onda transmitida de duração T_s para um determinado símbolo $s(nT_s)$, de acordo com a equação:

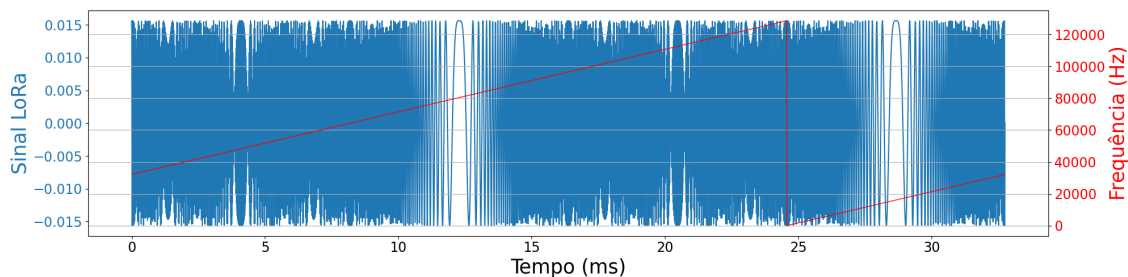
$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} e^{j2\pi[(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF}] \frac{k}{2^{SF}}}. \quad (2.6)$$

Na relação acima, podemos ver que o sinal modulado é uma forma de onda do tipo *chirp*, pois a frequência aumenta linearmente com k , que é o índice de tempo. Se aplicarmos a relação de Euler na Equação 2.6, obteremos a seguinte relação:

$$c(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \left\{ \cos \left(2\pi[(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF}] \frac{k}{2^{SF}} \right) - j \sin \left(2\pi[(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF}] \frac{k}{2^{SF}} \right) \right\}. \quad (2.7)$$

Por meio da Equação 2.7 é possível visualizar as partes real e imaginária do sinal LoRa modulado no domínio do tempo. Para representar esse sinal de forma prática, a Figura 10 mostra a parte real de um sinal LoRa que representa o símbolo 1024 com $SF = 12$ e $B = 125$ kHz. A curva em azul representa o sinal modulado $c(nT_s + kT)$ com valores de máximo e mínimo iguais a $\pm \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} = \pm 0,015$. A curva em vermelho, por sua vez, que varia de acordo com a largura de banda escolhida no eixo vertical, representa o componente de espalhamento espectral $(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF}$ ou o *chirp* único que equivale ao símbolo 1024 especificado de acordo com as configurações dos parâmetros predeterminados.

Figura 10 – Símbolo 1024 representado na modulação LoRa com $SF = 12$ e $B = 125$ kHz.



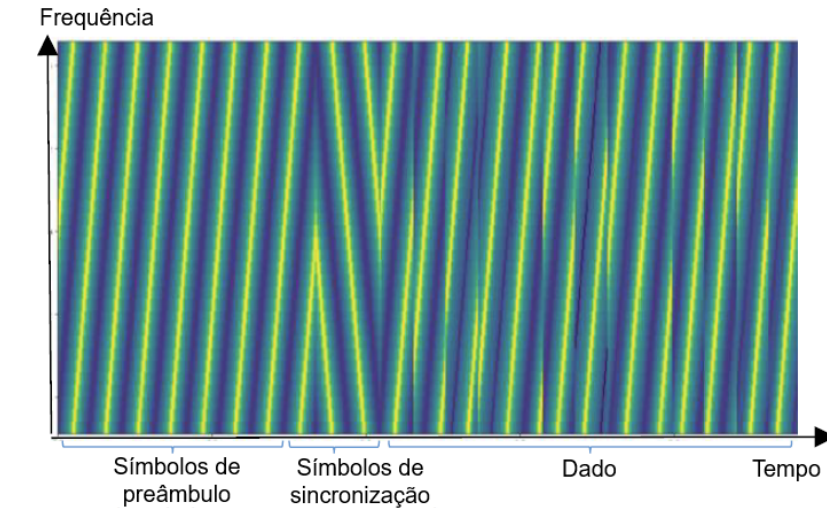
Fonte: Elaborado pelo autor.

2.6.4 Demodulação LoRa

A Figura 11 mostra a representação de um sinal LoRa ao longo do plano tempo-frequência. Ele começa com 8 símbolos de preâmbulo e 2 símbolos de sincronização, seguidos por símbolos de dados. Os símbolos de sincronização de preâmbulo são representados por sequências de *up-chirp* e *down-chirp*, respectivamente. A informação dos símbolos de dados

é representada pelo início da frequência do sinal transmitido. Por isso, os símbolos de dados possuem formatos diferentes de sinais *chirp* (Wiklundh, 2019).

Figura 11 – Exemplo de modulação de frequência do sinal LoRa representado por *chirps*.



Uma verificação de similaridade é realizada pelo receptor em cada símbolo por meio de uma operação matemática chamada correlação (Vangelista, 2017). Basicamente, considerando conhecido o fator de espalhamento SF, o demodulador LoRa realiza uma operação de produto interno entre a amostra do sinal recebido (a_n) e o símbolo LoRa candidato (b_n) de acordo com:

$$\sum_{n=1}^{2^{SF}} a_n \cdot b_n. \quad (2.8)$$

Quanto maior for o número obtido na Equação 2.8, maior será a semelhança do símbolo recebido pelo receptor com o símbolo LoRa candidato. Faz-se então necessário realizar essa operação com todos os possíveis símbolos candidatos para um certo fator de espalhamento. Contudo, esse método é muito dispendioso por ter que realizar 2^{SF} verificações de similaridade para cada símbolo recebido. Isso torna o processo computacionalmente oneroso. Para simplificar este processo, o demodulador proposto por Vangelista (2017) realiza a seguinte operação:

$$\sum_{k=0}^{2^{SF}-1} r(nT_s + kT) \cdot c^*(nT_s + kT), \quad (2.9)$$

onde $r(nT_s + kT)$ é o sinal recebido e $c^*(nT_s + kT)$ é o símbolo base. A partir da Equação 2.6, temos que o complexo conjugado que representa o sinal LoRa modulado é definido por:

$$c^*(nT_s + kT) = \frac{1}{\sqrt{2^{SF}}} \left(e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}} \right) e^{-j2\pi [(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF} - k] \frac{k}{2^{SF}}}. \quad (2.10)$$

Percebe-se que na Equação 2.10 o termo $e^{-j2\pi \frac{k^2}{2^{SF}}}$ se refere ao símbolo de base. O restante do termo $e^{-j2\pi [(s(nT_s) + k) \bmod 2^{SF} - k] \frac{k}{2^{SF}}}$ é uma onda pura de frequência s . Podemos pensar neste termo como sendo um conjunto de ondas senoidais de frequência crescente que muda dependendo de s . O primeiro passo no receptor proposto por Vangelista (2017) é multiplicar o símbolo recebido r pelo símbolo de *down chirp* (processo de *dechirping*). O segundo passo é realizar a correlação com o banco de frequências que dependem de s .

Na verdade, essa operação pode ser realizada por uma Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta versão é computacionalmente mais eficiente e os resultados da FFT são os resultados da verificação de similaridade. Desta forma, podemos construir um receptor muito mais eficiente com menor consumo de energia e menores requisitos de *hardware*.

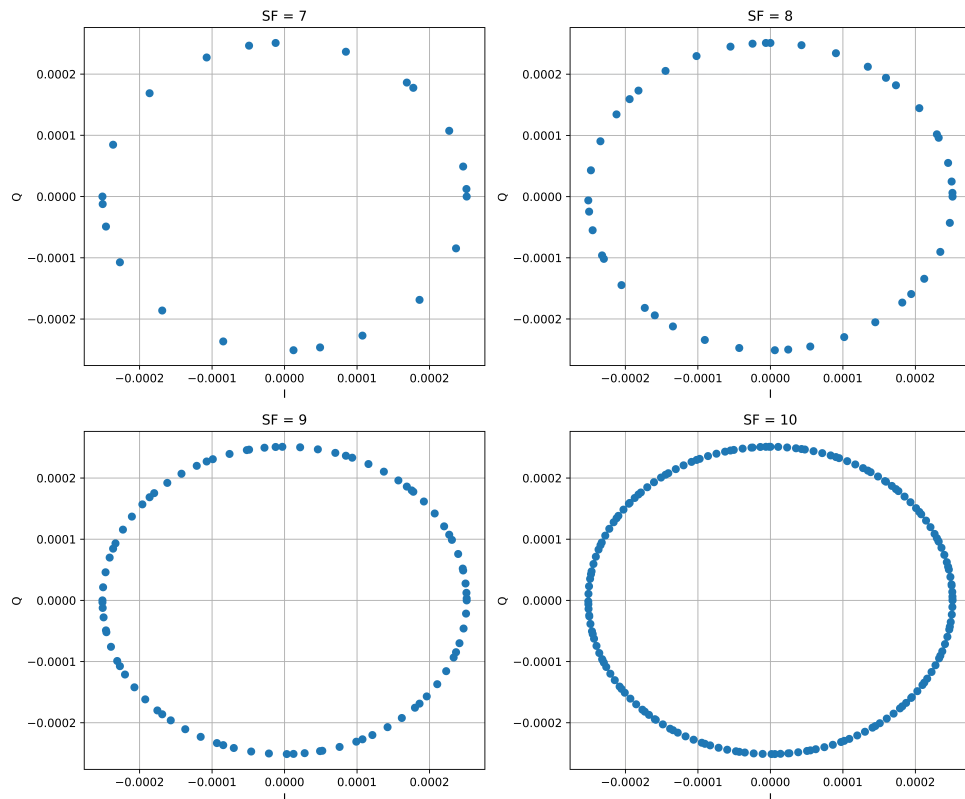
2.6.5 Representação bidimensional de símbolos LoRa

Um sinal LoRa pode ser representado em um espaço bidimensional (plano I-Q) onde a amplitude e a fase do sinal são plotadas nos eixos I (*In-Phase*) e Q (*Quadrature Phase*), respectivamente (Rahmadhani *et al.*, 2018). Cada símbolo LoRa gerado é, portanto, disposto nesse plano. Ao plotar os pontos da constelação, estamos distribuindo os símbolos LoRa em um gráfico de dispersão, onde a parte real do símbolo é plotada no eixo horizontal (I) e a parte imaginária no eixo vertical (Q) (Goldsmith, 2005).

Quando a função do pseudocódigo é chamada, ela gera um único símbolo LoRa de tamanho 2^{SF} , que é uma sequência de amostras complexas (números complexos). Essa sequência é então plotada no gráfico. A Figura 12 mostra a constelação de símbolos gerados pela modulação LoRa para um determinado fator de espalhamento (SF) a uma potência de -72 dBm. O padrão circular das constelações apresentadas na Figura 12 acontece porque, para cada símbolo LoRa gerado, a amplitude e a fase dos números complexos seguem um padrão cíclico que gera um sinal espiral no plano I-Q (Yegin *et al.*, 2020). Esse padrão cíclico é resultado da equação matemática usada para gerar os símbolos LoRa, que envolve uma exponencial complexa com uma frequência que varia ciclicamente (Vangelista, 2017).

A constelação de símbolos é circularmente simétrica em torno da origem e a densidade de pontos aumenta à medida que o fator de espalhamento aumenta. Isso ocorre porque,

Figura 12 – Constelações LoRa para diferentes fatores de espalhamento (SF) com potência de transmissão/recepção de -72 dBm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

quanto maior o fator de espalhamento, maior é a quantidade de símbolos gerados e, portanto, maior é a densidade de pontos na constelação (Vangelista, 2017; Waret *et al.*, 2018; Ameloot *et al.*, 2020). No contexto da modulação digital, a constelação de símbolos é utilizada para representar e analisar a qualidade do sinal transmitido. É possível avaliar, por exemplo, se há interferência no sinal ou distorção, comparando a constelação de símbolos do sinal recebido com a do sinal original (Garg, 2010).

Essa constelação é a representação gráfica dos símbolos LoRa em um plano I-Q (Yegin *et al.*, 2020). Cada ponto na constelação representa um símbolo LoRa único. A densidade dos pontos na constelação depende do SF usado na geração dos símbolos. Uma constelação de símbolos densa significa que há mais pontos (símbolos) no mesmo espaço, o que permite transmitir mais informações no mesmo intervalo de tempo. Por outro lado, uma constelação de símbolos menos densa significa que há menos pontos (símbolos) no mesmo espaço, o que permite transmitir menos informações no mesmo intervalo de tempo (Goldsmith, 2005; Waret *et al.*, 2018).

2.6.6 Colisões de pacotes LoRa

Colisões de pacotes ocorrem quando dois ou mais dispositivos transmitem dados simultaneamente na mesma frequência e no mesmo tempo. Em LoRa, a utilização de uma largura de banda estreita é uma das principais causas de colisões de pacotes (Pham *et al.*, 2020). Quando ocorre uma colisão, a mensagem enviada por um dispositivo pode ser perdida, o que compromete a comunicação.

Para lidar com as colisões de pacotes, o protocolo de acesso ao meio LoRaWAN (*LoRa Wide Area Network*) utiliza uma técnica de múltiplo acesso chamada “*Aloha*”, que permite que os dispositivos transmitam quando estiverem prontos, sem aguardar por um convite do receptor. Entretanto, a utilização do protocolo *Aloha* não garante a ausência de colisões de pacotes, especialmente em ambientes com grande número de dispositivos, o que pode afetar negativamente o desempenho da rede (Mohammadi; Farahani, 2021).

Os fatores de espalhamento em sistemas de comunicação sem fio LoRa referem-se à forma como os dados são modulados e transmitidos em frequências diferentes. O objetivo da utilização dos fatores de espalhamento em LoRa é aumentar a capacidade do sistema e melhorar a qualidade da comunicação em ambientes com interferências (Pham *et al.*, 2020). Em sistemas LoRa, existem diferentes fatores de espalhamento que podem ser usados, cada um com um nível de ortogonalidade diferenciado. Um fator de espalhamento menor resulta em um menor número de portadoras e, portanto, menos interferências entre canais (Ameloot *et al.*, 2020).

Vários estudos mostram que os fatores de espalhamento em sistemas LoRa não são ortogonais, mas sim quasi-ortogonais (Mahmood *et al.*, 2018; Mohammadi; Farahani, 2021). Isso significa que, embora os fatores de espalhamento sejam projetados para serem o mais ortogonais possível, há uma pequena interferência entre eles. Essa interferência é limitada e pode ser tratada pelo receptor através de técnicas de processamento de sinal, como filtragem e equalização. Os fatores de espalhamento quase-ortogonais em LoRa são usados, pois permitem um uso eficiente do domínio de frequência e aumentam a capacidade do sistema de comunicação sem fio. No entanto, essa quase-ortogonalidade limitada pode afetar o desempenho do sistema em ambientes com muita interferência.

A quasi-ortogonalidade entre os fatores de espalhamento em sistemas LoRa ajuda a reduzir a interferência entre eles e, portanto, pode levar a uma redução na probabilidade de colisões de pacotes. No entanto, a quasi-ortogonalidade não é perfeita e há ainda alguma interferência entre os fatores de espalhamento. Em sistemas LoRa, a utilização de fatores de

espalhamento distintos pode ajudar a minimizar a interferência entre os diferentes canais de comunicação, aumentando assim a eficiência e a qualidade da comunicação (Waret *et al.*, 2018; Yegin *et al.*, 2020).

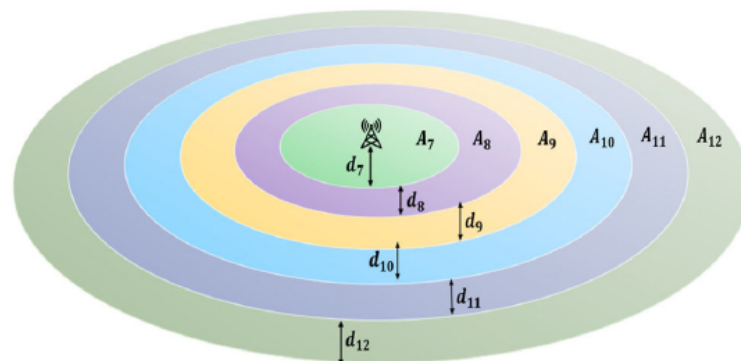
Portanto, é importante lembrar que a probabilidade de colisões de pacotes depende de diversos fatores, como a densidade de dispositivos na área de cobertura, o tamanho dos pacotes, o tempo de transmissão e o tempo de espera entre transmissões. Desta forma, podemos concluir que a utilização de fatores de espalhamento distintos é apenas uma das muitas variáveis que devem ser consideradas ao projetar e otimizar a comunicação em sistemas LoRa.

2.6.7 Métodos de distribuição de SFs entre dispositivos LoRa

Na literatura existem diferentes métodos que são utilizados para distribuir fatores de espalhamento entre dispositivos finais para tentar diminuir as colisões entre pacotes LoRa. Pelo menos três métodos de alocação estão entre os mais utilizados. São eles: alocação fixa, alocação aleatória e alocação baseada na distância (Maurya *et al.*, 2022).

Todos os métodos são baseados na existência de células LoRaWAN como representado na Figura 13. Cada zona da célula $z \in \{7, 8, 9, \dots, 12\}$ (anel concêntrico ao redor do gateway onde os nós finais compartilham o mesmo fator de espalhamento) é atribuída um fator de espalhamento específico $SF \in \{7, 8, \dots, 12\}$ com largura de zona $d_z \in \{d_7, d_8, \dots, d_{12}\}$. O gateway está localizado no centro da célula de raio $r = d_7 + d_8 + d_9 + d_{10} + d_{11} + d_{12}$. Vale destacar que os modelos mencionados acima são facilmente extensíveis para células com formato hexagonal distribuídas no espaço (Varsier; Schwoerer, 2017).

Figura 13 – Modelo de uma única célula LoRaWAN.



Fonte: Retirado de (Maurya *et al.*, 2022).

No método de alocação fixa, todos os dispositivos finais de uma zona são alocados com o mesmo fator de espalhamento. Nesse método, a probabilidade de haver colisões de

pacotes LoRa aumenta proporcionalmente à medida que dispositivos finais na mesma zona são adicionados. O método de alocação aleatória, por sua vez, não depende da distribuição de dispositivos finais na célula. Neste caso, não há zonas para alocação aleatória de fator de espalhamento em uma célula LoRaWAN, diferente do que é apresentado na Figura 13. Diferentes autores abordam algoritmos de distribuição de probabilidade uniforme para realizar o sorteio aleatório de fatores de espalhamento entre os dispositivos finais (Farhad *et al.*, 2020; Abeelee *et al.*, 2017).

O método de alocação baseada em distância distribui os fatores de espalhamento baseados na distância entre os dispositivos finais e o gateway. Dispositivos finais próximos ao gateway são alocados com menor fator de espalhamento e vice-versa. Os valores de SNR são mais baixos para os dispositivos finais que estão mais distantes do gateway. Dessa forma, esses dispositivos precisam de um fator de espalhamento maior para que tenha-se uma comunicação efetiva. Na alocação baseada em SNR, os fatores de espalhamento são distribuídos baseados nas suas relações sinal-ruído (Maurya *et al.*, 2022).

A potência do sinal de um dispositivo LoRa localizado longe do gateway é recebida com baixa potência devido a fenômenos de perda de percurso. A responsabilidade do gateway nessa situação é atribuir o menor fator de espalhamento para cada dispositivo final a fim de obter uma comunicação adequada. Isso só acontece quando estes dispositivos não atendem a um limite de SNR desejável (Abeelee *et al.*, 2017).

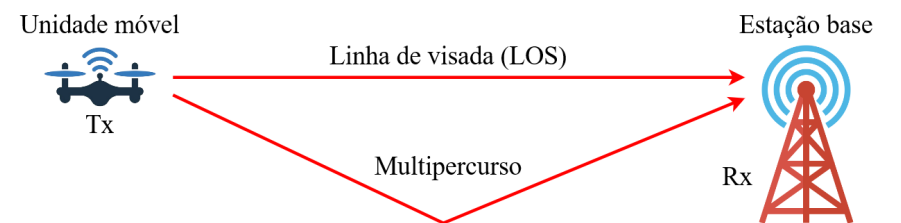
2.7 Desvanecimento

Os sinais transmitidos em um sistema de comunicação sem fio estão sujeitos a ruídos, interferência e outros fenômenos físicos (Stepanets *et al.*, 2018). Para modelar a propagação desses sinais, utilizamos um conjunto de modelos matemáticos que nos ajudam a compreender tais fenômenos. Assim, as principais características dos canais de comunicação sem fio são: perda de percurso (*path loss*), sombreamento (*shadowing*), desvanecimento (*fading*) e efeito *Doppler*. Estes fatores limitam significativamente o alcance, a taxa de dados e a confiabilidade da transmissão dos sinais (Naseem *et al.*, 2018; Garg, 2010).

Em redes sem fio, o desvanecimento refere-se à flutuação da potência do sinal transmitido em decorrência de várias variáveis. Qualquer objeto entre o transmissor ou receptor pode causar caminhos adicionais pelos quais o sinal viaja, como representado na Figura 14. Cada caminho experimenta um deslocamento de fase e atenuação diferentes.

No receptor, os sinais de todos os caminhos se combinam. Essas combinações podem resultar em interferência construtiva, destrutiva ou uma combinação de ambas (Goldsmith, 2005). A interação dos sinais varia dinamicamente à medida que tanto o transmissor quanto o receptor se movem, o que nos leva a empregar o termo “desvanecimento” para descrever os efeitos de um canal de múltiplos caminhos em constante mudança ao longo do tempo (Garg, 2010).

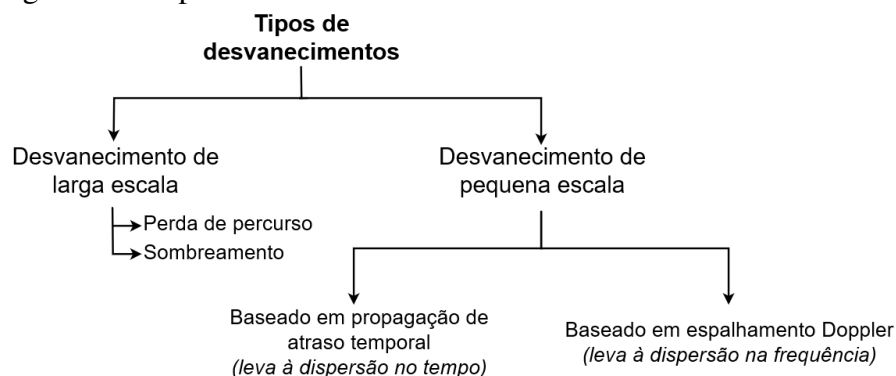
Figura 14 – Propagação do sinal de rádio em múltiplos caminhos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando as várias deficiências relacionadas ao canal de transmissão, a Figura 15 representa os dois tipos de desvanecimento existentes em sistemas de comunicação sem fio: desvanecimento de larga escala e desvanecimento de pequena escala (Stepanets *et al.*, 2018; Garg, 2010). É importante destacar na figura que a existência do desvanecimento baseado em propagação de atraso temporal não exclui totalmente a existência de desvanecimento baseado em espalhamento *Doppler*.

Figura 15 – Tipos de desvanecimentos.



Fonte: Adaptado de (Stepanets *et al.*, 2018).

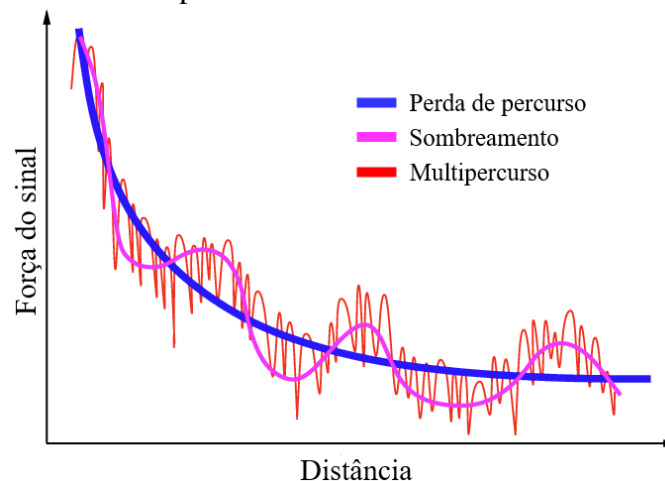
O desvanecimento em larga escala ocorre com a presença de obstáculos físicos entre transmissor e receptor (Belloni, 2004). Esse tipo de interferência causa uma redução significativa da intensidade do sinal porque a onda eletromagnética é sombreada ou bloqueada por esses obstáculos. Além disso, este desvanecimento está relacionado com grandes flutuações do sinal ao longo de grandes distâncias (várias centenas ou milhares de metros) (Garg, 2010; Stepanets *et al.*, 2018). Nesse contexto, encontram-se os fenômenos de perda de percurso e

sombreamento. O primeiro, conhecido como perda de percurso, refere-se à atenuação da potência de um sinal eletromagnético ao longo de sua trajetória de transmissão, desde o transmissor até o receptor. O segundo, denominado sombreamento, é ocasionado pela presença de obstáculos entre o transmissor e o receptor, os quais provocam uma diminuição na potência do sinal de transmissão (Goldsmith, 2005; Li *et al.*, 2019).

O desvanecimento de pequena escala está relacionado com flutuações rápidas da potência do sinal recebido em curtas distâncias e em curtos períodos de tempo (Garg, 2010; Stepanets *et al.*, 2018). Sua ocorrência se dá na escala da ordem do comprimento de onda da portadora devido à interferência construtiva e destrutiva dos múltiplos caminhos de sinal entre o transmissor e o receptor. Esse tipo de desvanecimento afeta praticamente todas as formas de comunicação sem fio e sua superação é uma necessidade para aumentar a eficiência do enlace de transmissão (Noreen *et al.*, 2017; Liando *et al.*, 2019).

A Figura 16 exemplifica os efeitos simultâneos dos desvanecimentos em larga escala e pequena escala. Ela ilustra como a atenuação do sinal de rádio em relação à distância da fonte de transmissão pode ser interpretada como a soma da perda de distância, sombreamento e efeitos de múltiplos percursos.

Figura 16 – Efeitos combinados de perda de percurso, sombreamento e desvanecimento por multipercurso.



Fonte: Adaptado de (Liu *et al.*, 2008).

2.7.1 Desvanecimento Rayleigh

O desvanecimento *Rayleigh* é um modelo probabilístico que assume que a amplitude do sinal recebido segue uma distribuição de *Rayleigh* (Goursaud; Gorce, 2015). Esse desva-

desvanecimento foi nomeado em homenagem ao físico britânico *Lord Rayleigh*, que o descreveu em seu trabalho sobre a propagação de ondas eletromagnéticas na atmosfera terrestre em 1887 (Goldsmith, 2005). Essa distribuição de probabilidade é importante para modelar e projetar sistemas de comunicação sem fio (Belloni, 2004). Ainda, essa distribuição é definida pela seguinte função de densidade de probabilidade (PDF):

$$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, \quad (2.11)$$

onde x é a amplitude do sinal e σ é o parâmetro de escala, que controla a largura da distribuição. A distribuição de *Rayleigh* é uma distribuição unimodal que é simétrica em relação ao valor médio, que é igual a $\sqrt{2\sigma^2/\pi}$ (Belloni, 2004).

Esse tipo de desvanecimento é frequentemente utilizado para modelar flutuações aleatórias de amplitude e fase dos sinais de rádio ao se propagarem em um meio que apresenta múltiplos obstáculos, como prédios, árvores e montanhas (VISWANATHAN, 2013). O desvanecimento *Rayleigh* é causado pela superposição de múltiplos sinais que se propagam em trajetórias diferentes, devido a reflexões, difrações e espalhamentos em direções diferentes, chegando ao receptor com diferenças de fase e amplitude entre eles (Waret *et al.*, 2018).

Como resultado, o sinal recebido sofre flutuações aleatórias de amplitude e fase, que podem causar perda de sinal, interferência e erros de transmissão (Ameloot *et al.*, 2020). Ainda, o desvanecimento *Rayleigh* pode ser mitigado com técnicas de diversidade, como a diversidade de espaço, tempo ou frequência, que consistem em enviar o sinal por diferentes caminhos ou em diferentes momentos de tempo ou frequências, a fim de aumentar a robustez do sinal recebido e reduzir a probabilidade de erros de transmissão (Goldsmith, 2005; Garg, 2010).

2.7.2 Desvanecimento Rice

Esse tipo de desvanecimento é um modelo probabilístico que assume que a amplitude do sinal recebido segue uma distribuição de *Rice* (Goursaud; Gorce, 2015). É chamado assim em homenagem ao estatístico britânico *Ronald A. Fisher*, que usou o pseudônimo “*Rice*” em alguns de seus trabalhos. A distribuição de *Rice* é uma distribuição de probabilidade contínua que é frequentemente usada para modelar o desvanecimento de sinais de rádio em sistemas de comunicação sem fio (Goldsmith, 2005). Essa distribuição é definida pela seguinte função de densidade de probabilidade (PDF):

$$f(x) = \frac{2x}{\sigma^2} e^{-(x^2+a^2)/(2\sigma^2)} I_0\left(\frac{ax}{\sigma^2}\right), \quad (2.12)$$

onde x é a amplitude do sinal, σ é o parâmetro de escala, que controla a largura da distribuição, e a é o parâmetro de intensidade, que representa a amplitude da componente determinística do sinal (VISWANATHAN, 2013). A função I_0 é a função modificada de *Bessel* do primeiro tipo e de ordem zero (Goldsmith, 2005).

Esse tipo de desvanecimento, que é uma extensão do modelo *Rayleigh*, ocorre quando o sinal transmitido tem uma componente determinística, como o sinal direto que chega ao receptor sem ser refletido, difratado ou espalhado (Xiao *et al.*, 2003). A componente determinística tem uma amplitude fixa, enquanto a amplitude total do sinal varia aleatoriamente devido às reflexões, difrações e espalhamentos adicionais (Goldsmith, 2005).

2.7.3 Modelo de Jakes

O modelo de *Jakes* é um tipo de modelo de canal de desvanecimento que é frequentemente utilizado em comunicações sem fio para simular os efeitos do desvanecimento multipercurso em um sinal de rádio (Archana *et al.*, 2020). Este modelo é baseado na suposição de que o canal sem fio pode ser aproximado pela soma de múltiplas componentes senoidais. Essas senoides representam os diferentes caminhos que o sinal percorre devido ao fenômeno do desvanecimento multipercurso. Por este motivo, a versão dispersa do sinal é designada como componente sem linha de visada (NLOS) (Xiao *et al.*, 2003).

Para gerar um canal de desvanecimento *Rayleigh*, primeiro precisamos especificar o desvio *Doppler* máximo, que é baseado na velocidade com que o transmissor e/ou receptor estão se movendo, denotado como v (Márquez *et al.*, 2020). Quando a velocidade é pequena em comparação com a velocidade da luz, o que sempre será o caso em comunicações sem fio, o desvio *Doppler* pode ser calculado da seguinte forma:

$$f_d = \frac{vf_c}{c}, \quad (2.13)$$

onde c é a velocidade da luz e f_c é a frequência da onda portadora (Goldsmith, 2005). Também determinamos quantas senoides (M) somar, e não existe uma resposta definitiva, pois isso depende do número de refletores no ambiente, algo que nunca conhecemos completamente.

Dessa forma, pelo modelo de *Jakes*, o desvanecimento total $R(t)$ causado por todos os refletores em um tempo específico (t) pode ser calculado como:

$$\begin{aligned} R(t) &= \frac{1}{\sqrt{2M}} \sum_{n=0}^{M-1} \left[e^{j(2\pi f_d \cos(\frac{2\pi n}{M})t + \varphi)} \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2M}} \sum_{n=0}^{M-1} \left[\cos \left(2\pi f_d \cos \left(\frac{2\pi n}{M} \right) t + \varphi \right) + j \sin \left(2\pi f_d \cos \left(\frac{2\pi n}{M} \right) t + \varphi \right) \right], \end{aligned} \quad (2.14)$$

onde $\frac{2\pi n}{M}$ representa a posição angular de cada onda refletida no ambiente e φ é o deslocamento de fase dos sinais recebidos de cada trajetória (Archana *et al.*, 2020).

Há várias suposições ao adotar o modelo de *Jakes*, e embora possam ser vistas como limitações, elas resultam em uma representação matemática simples, conforme demonstrado na Equação 2.14. A primeira premissa diz respeito ao espalhamento isotrópico, assumindo que as ondas de rádio se dispersam uniformemente em todas as direções (VISWANATHAN, 2013; Archana *et al.*, 2020).

A segunda premissa envolve um grande número de dispersores contribuindo para os componentes de multipercurso. Isso permite que o modelo utilize o teorema do limite central para aproximar a soma desses componentes como um processo gaussiano (VISWANATHAN, 2013; Archana *et al.*, 2020).

A terceira premissa assume que as fases dos sinais provenientes de diferentes trajetórias são aleatórias e distribuídas uniformemente entre 0 e 2π , refletindo a ideia de que os dispersores estão distribuídos aleatoriamente no espaço (VISWANATHAN, 2013; Archana *et al.*, 2020).

A quarta premissa sugere um desvanecimento plano (ou não seletivo em frequência) do modelo, implicando que a largura de banda do sinal é menor do que a largura de banda de coerência do canal. Em outras palavras, todos os componentes de frequência do sinal sofrem o mesmo nível de desvanecimento (VISWANATHAN, 2013; Archana *et al.*, 2020).

A quinta suposição afirma que o modelo assume que as propriedades estatísticas do processo de desvanecimento são constantes ao longo do tempo (estacionariedade) e que as médias de tempo e as médias do conjunto são as mesmas (ergodicidade) (VISWANATHAN, 2013; Archana *et al.*, 2020).

A última suposição apresenta que o modelo deve assumir uma determinada forma para o espectro *Doppler*, que descreve a distribuição dos desvios *Doppler* dos componentes

multipercursos. Especificamente, o modelo assume espectro de *Jakes*, que é uma curva em forma de sino centrada no deslocamento *Doppler* zero (VISWANATHAN, 2013; Archana *et al.*, 2020).

A distribuição *Rayleigh* é adequada para a ausência de linha de visada dominante (LOS) entre o transmissor e o receptor. Se existir uma linha de visada, a distribuição do envelope não será mais *Rayleigh*, mas do tipo *Rice* (Goldsmith, 2005). Dessa forma, considerando que a componente LOS chega ao receptor com ângulo $\frac{2\pi n}{M}$, fase φ e frequência *Doppler* f_d , o desvanecimento total $R(t)$ é calculado como:

$$\begin{aligned} R(t) &= \sqrt{\frac{K}{M(K+1)}} \sum_{n=0}^{M-1} \left[e^{j(2\pi f_d \cos(\frac{2\pi n}{M})t + \varphi)} \right] \\ &= \sqrt{\frac{K}{M(K+1)}} \sum_{n=0}^{M-1} \left[\cos\left(2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right)t + \varphi\right) + j \sin\left(2\pi f_d \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right)t + \varphi\right) \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

onde, K representa o fator de *Rice* dado como a razão entre a potência do componente LOS e a potência dos componentes dispersos (NLOS) (Archana *et al.*, 2020). Os cenários de melhor e pior caso para os canais de desvanecimento Rice estão associados aos valores de $K = +\infty$ e $K = 0$, respectivamente. Um canal de desvanecimento Rice com $K = +\infty$ é essencialmente um canal Gaussiano, onde há uma linha de visada (LOS) dominante, conforme representado na Equação 2.15. Por outro lado, um canal Rice com $K = 0$ dB representa um canal *Rayleigh*, no qual não há presença de linha de visada, conforme representado na Equação 2.14 (VISWANATHAN, 2013).

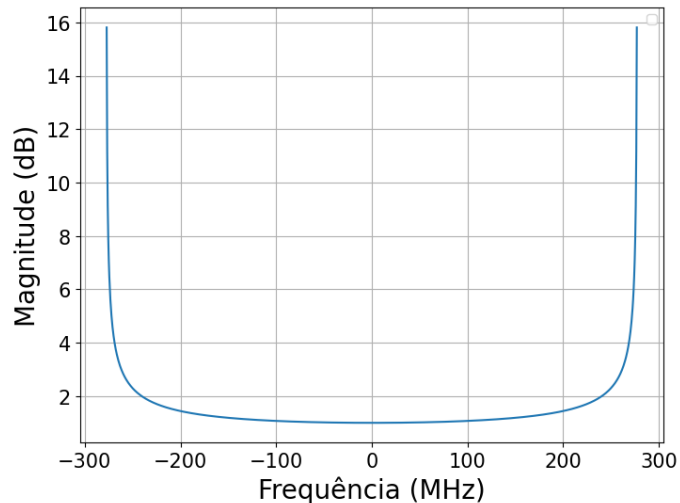
2.7.4 Espalhamento Doppler

Quando uma fonte sonora ou luminosa está se aproximando de um observador, as ondas parecem ter uma frequência mais alta do que quando a fonte está se afastando. Isso ocorre porque a distância entre as cristas das ondas diminui quando a fonte se aproxima e aumenta quando a fonte se afasta. Este fenômeno influencia a qualidade e a integridade do sinal transmitido principalmente em altas velocidades (Xiao *et al.*, 2003).

O espalhamento *Doppler* é uma medida do alargamento espectral causado pela taxa de variação temporal do canal de rádio. Dessa forma, quando um sinal senoidal puro de frequência f_c é transmitido, o espectro do sinal recebido, chamado de espectro *Doppler*, terá componentes na faixa de $f_c - f_d$ a $f_c + f_d$, onde f_d é o desvio *Doppler* (Naseem *et al.*, 2018). A

Figura 17 ilustra a curva do espalhamento *Doppler* para um desvio de 277,77 MHz, quando um objeto está se deslocando a uma velocidade de 300 km/h.

Figura 17 – Resposta em frequência do espalhamento *Doppler*.



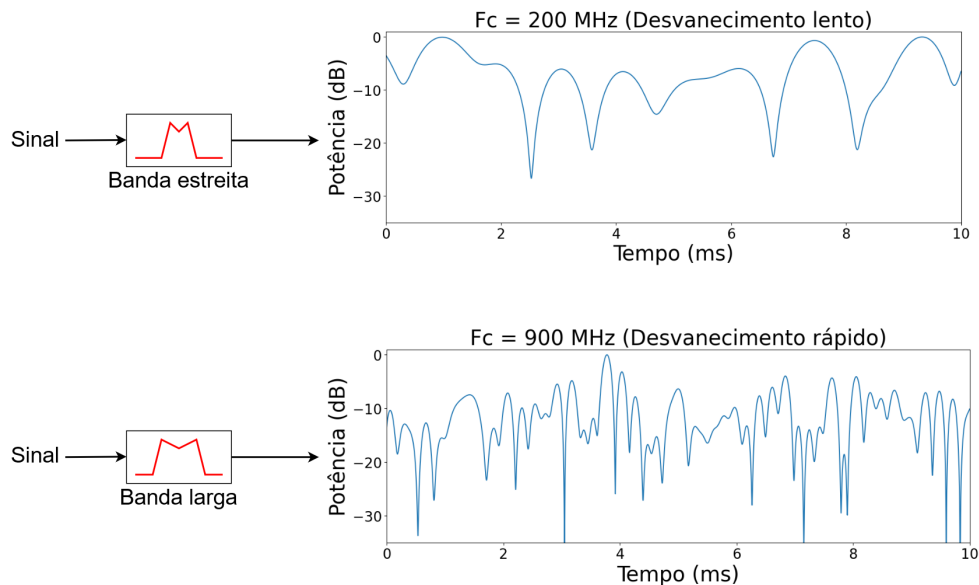
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como a velocidade influencia o espalhamento *Doppler*, a largura de banda também exerce sua influência. Na Figura 18, é exemplificado o envelope de desvanecimento *Rayleigh* para diferentes larguras de banda: uma estreita na parte superior e uma larga na parte inferior. É perceptível que a variação da potência do sinal é mais acentuada no caso de uma largura de banda mais ampla, indicando uma resposta ao impulso do canal que se altera rapidamente dentro da duração do símbolo, resultando em desvanecimento rápido. Por outro lado, ao utilizar uma largura de banda menor, a resposta ao impulso do canal muda a uma taxa muito mais lenta em comparação com a largura de banda do símbolo transmitido.

2.8 Técnicas de diversidade

Os canais de rádio estão sujeitos a desvanecimento, dispersão temporal e outras degradações específicas. Por esse motivo, técnicas de diversidade são empregadas para superar essas deficiências e melhorar a qualidade do sinal (Li *et al.*, 2019). O conceito básico de diversidade é que o receptor tem mais de uma versão do sinal transmitido disponível, e cada versão do sinal transmitido é recebida por meio de um ramo. Quando várias versões do mesmo sinal são recebidas por vários canais que exibem desvanecimento independentes, as chances de que todos os componentes de sinal sofram o mesmo efeito de desvanecimento são bastante reduzidas (Hoeller *et al.*, 2018).

Figura 18 – Envelope de desvanecimento *Rayleigh* para diferentes larguras de banda.

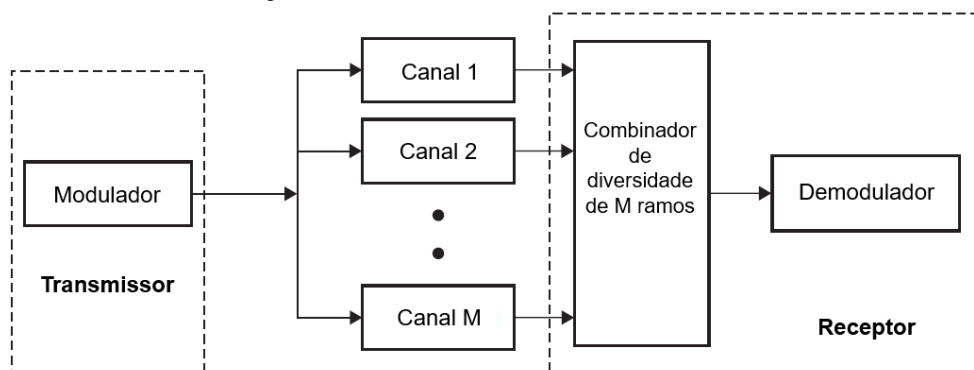


Fonte: Elaborado pelo autor.

Se considerarmos que a probabilidade de ter uma perda de comunicação devido ao desvanecimento em um canal é p e esta probabilidade é independente em todos os M ramos existentes, então a probabilidade de perder comunicação em todos os canais simultaneamente é p^M . Assim, se tivermos três ramos de desvanecimento independentes, a probabilidade de 10% de perder o sinal para um único ramo, por exemplo, é reduzida para 0,1% (Garg, 2010).

É ilustrado na Figura 19 o modelo de diversidade comumente utilizado em sistemas de comunicação. Cada um dos canais, mais o circuito receptor correspondente, é chamado de ramificação e as saídas dos canais são processadas e direcionadas para o demodulador por um combinador de diversidade (Goursaud; Gorce, 2015).

Figura 19 – Modelo de diversidade comumente utilizado em sistemas de comunicação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dois critérios são necessários para alcançar um alto grau de melhoria de um sistema

de diversidade. Primeiro, o desvanecimento em ramos individuais deve ter baixa correlação cruzada. Em segundo lugar, a potência média disponível de cada ramo deve ser praticamente igual (DU, 2020). Se a correlação cruzada for muito alta, ocorrerão desvanecimentos em cada ramo simultaneamente. Por outro lado, se os ramos têm baixa correlação, mas têm potências médias muito diferentes, então o sinal em um ramo mais fraco pode não ser útil mesmo que tenha menos desvanecimento do que os outros ramos (Song *et al.*, 2019).

Existem basicamente seis tipos de diversidades. São elas: diversidade espacial, diversidade em frequência, diversidade temporal, diversidade por polarização e diversidade em ângulo (Goursaud; Gorce, 2015). Neste trabalho será dado mais enfoque no tipo de diversidade espacial, pois este tipo específico de diversidade nos permite trabalhar com diversas configurações e arranjos de antenas.

2.8.1 Diversidade espacial de antena

O espaçamento adequado entre antenas é um fator importante para a aplicação da diversidade de recepção em sistemas de comunicação (Garg, 2010; Stepanets *et al.*, 2018). Em geral, o espaçamento mínimo entre as antenas é determinado pela distância necessária para que os sinais recebidos em cada antena sejam diferentes o suficiente para que o processamento conjunto possa ser efetivo. Isso é importante porque os sinais que chegam são cópias modificadas apenas por ruído gaussiano. No caso do LoRa, que opera em frequências de 915 MHz por exemplo, o comprimento de onda é de aproximadamente 33 cm (Garg, 2010).

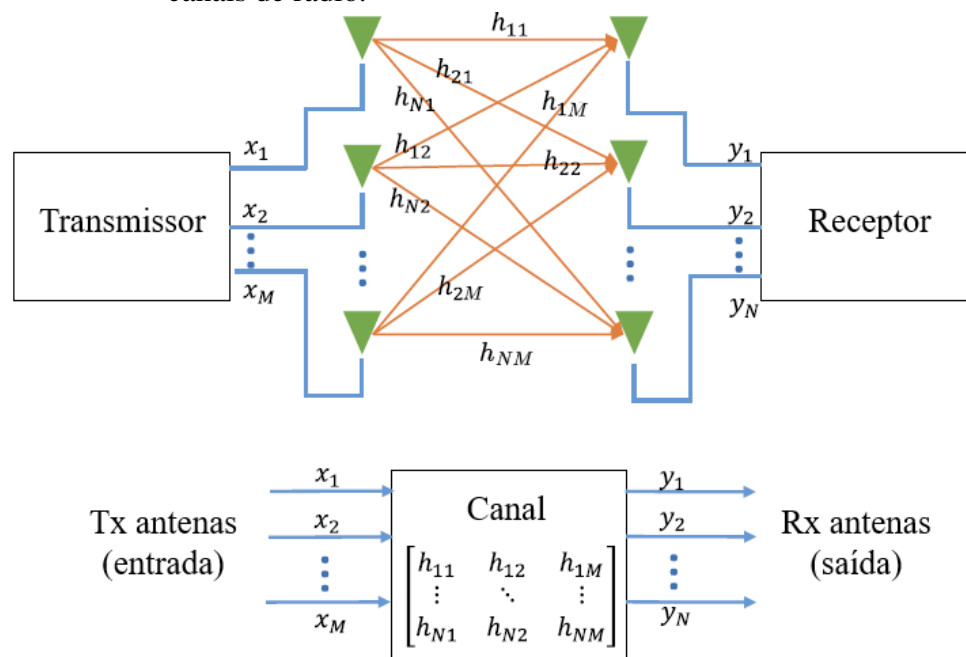
Isso significa que o espaçamento mínimo entre as antenas deve ser de pelo menos 16,5 cm, que é metade do comprimento de onda. No entanto, esse é um valor mínimo e pode não ser suficiente para uma boa diversidade de recepção. Na prática, o espaçamento ideal depende de vários fatores, como o ambiente de comunicação e a geometria das antenas (Garg, 2010; Goldsmith, 2005). Em geral, quanto maior o espaçamento entre as antenas, melhor será a diversidade de recepção, desde que as antenas estejam bem alinhadas e as reflexões e multipercurso não causem interferências indesejadas. No entanto, isso também aumenta a complexidade do sistema, já que é necessário um processamento conjunto mais sofisticado para combinar os sinais recebidos em cada antena. Portanto, é importante encontrar um equilíbrio entre o espaçamento ideal e a complexidade do sistema (Goldsmith, 2005; Goursaud; Gorce, 2015).

As técnicas de diversidade espacial enviam a mesma informação através de canais

independentes e não correlacionados para combater os efeitos de desvanecimento (Garg, 2010). Quando várias réplicas dos mesmos dados são enviadas através de canais com desvanecimento independente, a quantidade de desvanecimento sofrida por cada réplica será diferente (Goldsmith, 2005). Isso garante que, pelo menos, uma delas sofra menos desvanecimento em comparação às outras, aumentando assim a chance de receber adequadamente os dados transmitidos. Como resultado, espera-se uma melhora na confiabilidade de recepção dos dados em todo o sistema (VISWANATHAN, 2013; Song *et al.*, 2019).

A configuração do sistema pode conter M antenas no transmissor e N antenas na extremidade receptor, conforme ilustrado na Figura 20 (VISWANATHAN, 2013). Essa representação configura um modelo de canal denominado MIMO (*Multiple-input Multiple-output system*). Assim, a resposta do canal é expressa por uma matriz H . O caminho direto formado entre a antena 1 no transmissor e a antena 1 no receptor é representado pela resposta do canal h_{11} . A resposta do canal do caminho formado entre a antena 1 do transmissor e a antena 2 no receptor é expressa como h_{21} , e assim por diante. Dessa forma, a matriz de canais possui dimensão $N \times M$ (VISWANATHAN, 2013; Garg, 2010).

Figura 20 – Representação de sistemas MIMO e representação matricial de canais de rádio.



Fonte: Adaptado de (VISWANATHAN, 2013).

O vetor de símbolos recebidos y é expresso em termos da matriz de transmissão de canal H , o vetor de entrada x e o vetor de ruído n (Garg, 2010) como:

$$\vec{y} = H\vec{x} + \vec{n}, \quad (2.16)$$

onde cada elemento da Equação 2.16 é:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \dots & h_{NM} \end{bmatrix} \quad n = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Os sistemas de múltiplas antenas melhoram a eficiência espectral e oferecem enlaces de alta qualidade quando comparados aos tradicionais sistemas SISO (*Single-input Single-output system*) (Goldsmith, 2005). Muitos estudos teóricos, como Foschini (1996) e Telatar (1999), juntamente com estudos experimentais, como Tarokh *et al.* (1999) e Foschini *et al.* (1999), demonstraram uma grande melhoria de performance com o uso de sistemas com múltiplas antenas.

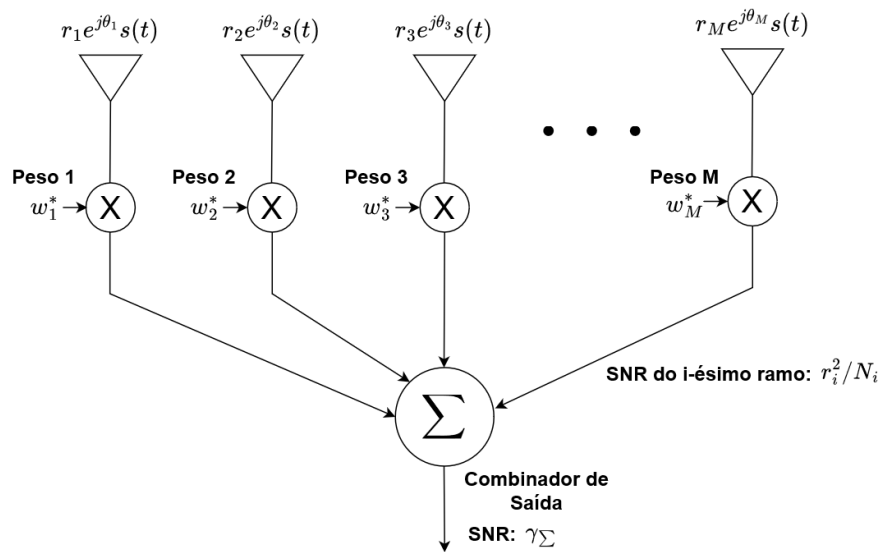
No jargão dos sistemas de múltiplas antenas, os sistemas de comunicação são amplamente categorizados de acordo com o número de antenas no transmissor (T_x) e no receptor (R_x). Estes são: SISO (*Single-input Single-output system*), SIMO (*Single-input Multiple-output system*), MISO (*Multiple-input Single-output system*) e MIMO (*Multiple-input Multiple-output system*). Chamamos de diversidade de transmissão quando o transmissor envia réplicas do mesmo sinal através de cada antena. Isso introduz redundância no sistema, possibilitando reduzir o desvanecimento e aumentar a qualidade da SNR no receptor (Goldsmith, 2005; VISWANATHAN, 2013). A diversidade de recepção, por sua vez, refere-se à recepção de uma transmissão com múltiplas antenas para fornecer diversidade contra efeitos de caminho (Sampson *et al.*, 2016).

Além das configurações de antena, existem dois tipos de configurações MIMO em relação à transmissão de dados pelos canais de transmissão (Sampson *et al.*, 2016). Com o objetivo de melhorar a confiabilidade do sistema, podemos optar por enviar os mesmos dados por diferentes caminhos de propagação. Esse processo é denominado de diversidade espacial ou simplesmente diversidade. Com o objetivo de melhorar a taxa de transmissão dos dados no sistema, podemos optar por colocar diferentes porções dos dados em diferentes caminhos de propagação (multiplexação espacial) (Tarokh *et al.*, 1999; Foschini *et al.*, 1999).

Na diversidade de recepção, os caminhos de desvanecimento independentes associados a múltiplas antenas são combinados para obter um sinal resultante que é então passado por

um demodulador padrão. A combinação pode ser feita de várias maneiras que variam em complexidade e desempenho. A maioria das técnicas de combinação são lineares: a saída do combinador é apenas uma soma ponderada dos diferentes caminhos ou ramificações de desvanecimento, conforme mostrado na Figura 21. A combinação de mais de um sinal de ramificação requer *co-fasing*, onde a fase θ_i do i -ésimo ramo é removida através da multiplicação por $w_i^* = a_i e^{-j\theta_i}$ onde $a_i \in \mathbb{R}$ (Goldsmith, 2005; Goursaud; Gorce, 2015).

Figura 21 – Representação de combinação de sinais no receptor.



Fonte: Adaptado de (Goursaud; Gorce, 2015).

Esta fase de remoção requer detecção coerente de cada ramo para determinar sua fase θ_i . Sem *co-phasing*, os ramos dos sinais não se somariam de forma coerente no combinador, de modo que a saída resultante ainda poderia apresentar um desvanecimento significativo devido à adição construtiva e destrutiva dos sinais em todos os ramos (Goldsmith, 2005).

Dados N sinais ruidosos recebidos, o combinador no receptor combina-os linearmente com fatores de ponderação $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ e produz o sinal combinado:

$$y = \sum_{k=1}^{k=M} w_k^* r_k = [w_1^* w_2^* \dots w_M^*] \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} = w^H r = w^H h s + w^H n, \quad (2.18)$$

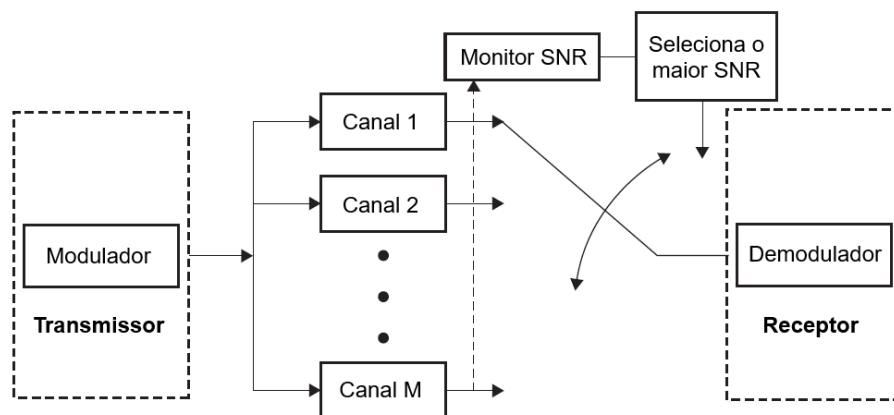
onde o sobrescrito H denota a transposição hermitiana (VISWANATHAN, 2013). A escolha dos fatores de ponderação w depende do tipo de técnica de combinação utilizada. Técnicas de

combinação de seleção, combinação de proporção máxima e combinação de ganho equivalente são esquemas de combinação bem conhecidos.

2.8.2 Combinador de seleção (SC)

Na combinação de seleção, o sinal recebido da antena que experimenta a SNR mais alta (ou seja, o sinal mais forte de N sinais recebidos) é escolhido para processamento no receptor (Goldsmith, 2005). Esse processo está representado na Figura 22. Como apenas uma ramificação é usada de cada vez, o combinador de seleção geralmente requer apenas um receptor que é comutado para o ramo ativo da antena. Com essa técnica, a saída do caminho do combinador tem uma relação sinal-ruído (SNR) igual à SNR máxima de todos os ramos.

Figura 22 – Representação da técnica de combinação por seleção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por padrão, o peso escolhido para o ramo de maior SNR é definido como $w_k = 1$ (VISWANATHAN, 2013). A saída do receptor para N ramos é representada por:

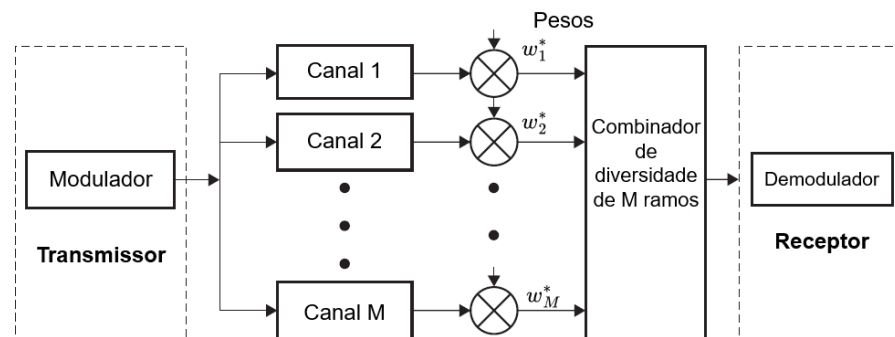
$$y = \sum_{k=1}^{k=N} w_k^* r_k = w_i^* r_i = r_i. \quad (2.19)$$

A combinação de seleção executa a detecção com base em apenas um sinal com a SNR mais alta. Portanto, é o esquema que oferece menor complexidade. No entanto, ao selecionar apenas um sinal entre os ramos recebidos, essa técnica não aproveita plenamente a diversidade. Para aproveitar a simplicidade do esquema, a combinação de seleção é geralmente seguida por uma técnica de detecção não coerente que não requer circuitos complexos (Goldsmith, 2005; Goursaud; Gorce, 2015).

2.8.3 Combinador de proporção máxima (MRC)

A técnica de seleção por combinação é a mais simples, onde o sinal recebido pela antena que apresenta a SNR mais alta é escolhido para ser processado no receptor. Portanto, essa técnica descarta $N - 1$ das N observações. Com relação à Figura 23, a técnica de combinação de proporção máxima (MRC) utiliza todas as N observações de sinais recebidos, as pondera e combina, de forma a maximizar a SNR na saída do combinador (VISWANATHAN, 2013).

Figura 23 – Representação da técnica de combinação de proporção máxima.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Exigindo o conhecimento do ganho do canal e estimativas de fase no receptor, os pesos são escolhidos como (Goldsmith, 2005):

$$w_k = \hat{h}_k = |\hat{h}_k| e^{j\angle \hat{h}_k}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (2.20)$$

Dessa forma, a saída do combinador é representado por:

$$y = \sum_{k=1}^{k=N} w_k^* r_k = \sum_{k=1}^{k=N} \hat{h}_k^* (h_k s + n_k) = (h_1 \hat{h}_1^* + h_2 \hat{h}_2^* + \dots + h_N \hat{h}_N^*) s + \text{ruído}. \quad (2.21)$$

O processamento do MRC resulta na média ponderada dos sinais recebidos, o que faz com que a SNR de saída geral seja igual à soma dos SNRs de todos os sinais de recepção individuais, produzindo assim o ganho de diversidade máxima possível de N . Essa é a SNR máxima alcançável para todos os esquemas de diversidade de recepção possíveis (Goldsmith, 2005).

2.8.4 Combinador de ganho equivalente (EGC)

A técnica de combinação de ganho equivalente é semelhante àquela apresentada na técnica de MRC representada na Figura 23. A diferença para o EGC é que a combinação dos sinais é realizada com pesos iguais. A técnica MRC requer correspondência de magnitude e fase do canal, o que pode levar às magnitudes flutuarem significativamente (Goursaud; Gorce, 2015). Na combinação de ganho equivalente, apenas a fase do canal é cancelada. Dessa forma, os pesos são escolhidos da seguinte maneira:

$$w_k = e^{j\angle\hat{h}_k}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (2.22)$$

onde h_k é a informação de fase do canal (Telatar, 1999). Se assumirmos uma estimativa perfeita de fases $\angle\hat{h}_k = \angle h_k$, a saída do combinador EGC pode ser descrita como:

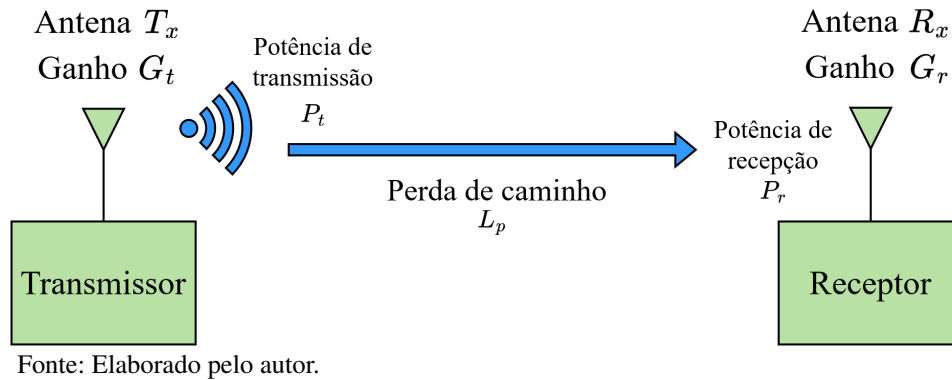
$$y = \sum_{k=1}^{k=N} w_k^* r_k = \sum_{k=1}^{k=N} e^{-j\angle\hat{h}_k} (|h_k| e^{j\angle h_k} s + n_k) = (h_1 + h_2 + \dots + h_N) s + \text{ruído}. \quad (2.23)$$

2.9 Orçamento de custos em um *link* de comunicação sem fio

Um orçamento de *link* ou *link budget*, é uma contabilidade de todos os ganhos e perdas do transmissor para o receptor em um sistema de comunicação (Garg, 2010). Os orçamentos de *link* identificam a direção de um *link* sem fio. Por isso, a maioria dos sistemas de comunicação é bidirecional, exigindo orçamentos separados para os *uplink* e *downlink* (VISWANATHAN, 2013). O “resultado” do orçamento do *link* indicará aproximadamente qual o nível de sinal-ruído que o receptor deve ter (Goldsmith, 2005). A Figura 24 representa o diagrama de um *link* sem fio genérico composto por um transmissor T_x e um receptor R_x .

Para um sistema específico, a potência de transmissão é conhecida; normalmente, é definida no transmissor. No entanto, para descobrirmos a potência de recepção, é necessário estabelecer quatro parâmetros: potência de transmissão (P_t), ganho da antena transmissora (G_t), ganho da antena receptora (G_r) e distância entre T_x e R_x (L_p) (Ma *et al.*, 2020). Esta última configuração determina a quantidade de redução de energia do sinal ao ser transmitido ao longo do seu trajeto. A potência de transmissão de um transmissor é determinada pelos amplificadores que o compõem, sendo expressa em watts, dBW ou dBm (Rawat *et al.*, 2021). Antenas podem ser de dois tipos: omnidirecionais, onde sua potência é irradiada em todas as direções; ou direcionais,

Figura 24 – Representação de um *link* sem fio genérico entre transmissor e receptor.



cuja potência é irradiada em uma direção específica (Hoeller *et al.*, 2018). Assim, o ganho das antenas é expresso em dB.

A FSPL (Perda de Percurso de Espaço Livre) descreve a redução da potência de um sinal à medida que este se move ao longo de uma distância sem obstáculos, como o ar ou o vácuo (Goldsmith, 2005). A equação de transmissão de Friis, que é utilizada para descrever esse fenômeno, serve para calcular a potência recebida entre duas antenas separadas por uma distância d , quando operando em uma frequência f ou comprimento de onda λ . Em sua forma geral, ela é representada por $FSPL = (4\pi d/\lambda)^2$ (Wong; Pan, 2008). No entanto, para gerar orçamentos de *link*, é necessário utilizar a mesma equação convertida em dB na forma:

$$FSPL_{dB} = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 144,55. \quad (2.24)$$

Finalmente, para calcular a potência de sinal P_r no receptor, é necessário somar todos os ganhos e perdas e usar seguinte equação:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p. \quad (2.25)$$

Uma antena isotrópica é uma antena teórica que irradia energia de forma uniforme em todas as direções, tanto vertical quanto horizontalmente, com a mesma intensidade (Clerckx; Oestges, 2013). Esta antena possui um ganho de 0 dB no espaço esférico ao seu redor e possui uma eficiência de 100% (Ma *et al.*, 2020). Como estamos considerando esse modelo de antena no sistema, ambos os ganhos de antena G_t e G_r da Equação 2.25 são iguais a zero.

Depois de termos determinado a potência do sinal recebido, precisamos agora determinar a potência do ruído recebido para calcularmos a SNR. Esse ruído, frequentemente

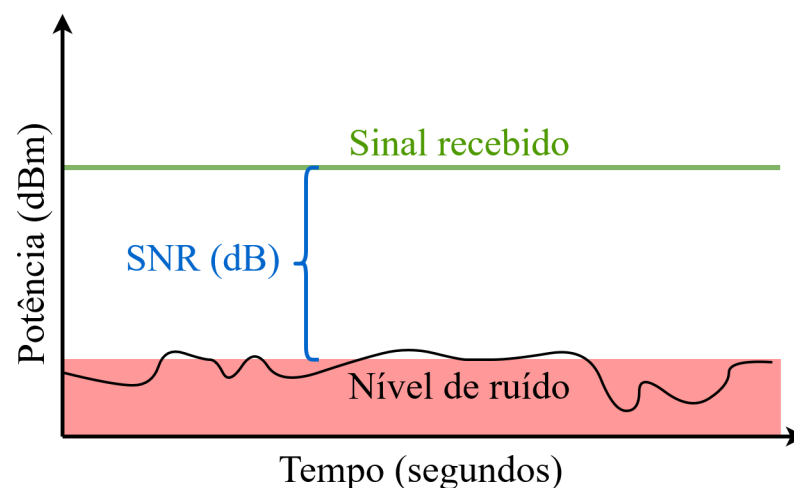
descrito como térmico, é um fenômeno associado à natureza aleatória das flutuações de energia da temperatura (Kar; Chandra, 2015). Trata-se de um tipo de ruído que ocorre em todos os circuitos elétricos, gerado a partir da excitação térmica dos componentes. É causado pelo movimento aleatório de elétrons dentro de um dispositivo, o que causa variações na corrente elétrica (Belloni, 2004).

A intensidade do ruído térmico P_n é uma medida da variação da energia térmica de um sistema em equilíbrio térmico com o ambiente. A constante de *Boltzmann*, denotada por “ k ”, é uma constante física fundamental que relaciona a energia térmica de um sistema à sua temperatura T (Goldsmith, 2005). A equação que expressa essa relação representa a variação da energia térmica de um sistema em função de sua temperatura (kT) e da largura de banda (B), sendo expressa como:

$$P_n = 10 \log_{10} \left(\frac{kBT}{1 \text{ mW}} \right). \quad (2.26)$$

Uma vez que já possuímos as duas relações, podemos calcular a SNR através da razão entre P_r e P_n , em escala linear, ou simplesmente por meio da subtração de ambos valores na escala de decibel. A Figura 25 representa um exemplo em que a potência do sinal recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indication*) é maior do que a potência do ruído de referência no receptor. Neste caso, dizemos que a SNR é positiva. No entanto, também pode acontecer o processo inverso, configurando, neste caso, uma SNR negativa. Os valores típicos de SNR do LoRa estão entre -20 dB e +10 dB (Márquez *et al.*, 2020).

Figura 25 – Representação do cálculo da SNR do sinal recebido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, são apresentados os trabalhos que se assemelham a esta pesquisa em algum aspecto e servem como base ou como referência para a mesma. Uma visão geral do assunto é apresentada ao leitor sobre a literatura obtida, bem como uma descrição breve de cada um dos trabalhos. Os tópicos deste capítulo estão organizados nos quatro principais aspectos de pesquisa deste trabalho: utilização de Veículos aéreos não tripulados (VANTs) para coleta e envio de dados; técnicas para melhoria de desempenho na entrega de pacotes LoRa; organização de células em espaço geográfico; e técnicas de agrupamento para alocação de dispositivos IoT. Por fim, alguns critérios de comparação entre a proposta da dissertação e os trabalhos relacionados também são apresentados.

3.1 Utilização de VANTs para coleta e envio de dados

VANTs, comumente chamados de drones, são veículos que podem voar e operar sem a necessidade de um piloto (Angrisani *et al.*, 2019). Inicialmente reservados para fins militares, os VANTs são agora comercialmente disponíveis e seus preços relativamente baixos os tornam atraentes para uma ampla variedade de aplicações em diversos cenários. No âmbito do consumidor, os VANTs são amplamente utilizados para capturar imagens e vídeos aéreos, enquanto no setor comercial, suas aplicações são variadas, incluindo mapeamento de áreas geográficas, entrega de produtos, logística, coleta de dados, monitoramento de safras e vigilância (Rahmadhani *et al.*, 2018).

Os VANTs estão cada vez mais sendo empregados em diversas aplicações, incluindo prevenção de crimes, monitoramento climático, operações de busca e salvamento, patrulhamento fronteiriço e marítimo, além da vigilância de incêndios florestais. Em situações de desastre, como terremotos, inundações ou incêndios florestais, os VANTs desempenham um papel crucial ao apoiar as operações de socorro, localizar vítimas e estabelecer uma rede de *backhaul* em caso de falta ou interrupção das instalações de comunicação (Saraereh *et al.*, 2020).

Em alguns trabalhos relevantes na utilização de VANTs para monitoramento ambiental, alguns autores utilizaram VANTs como gateways de recepção LoRa, enquanto que outros empregaram nós LoRa como transmissores. Como nó LoRa, os VANTs devem ser equipados com *hardware* que possa agregar dados provenientes de vários sensores, como temperatura, umidade, acelerômetro, magnetômetro e gás carbônico. Em seguida, os dados do sensor devem ser

transmitidos por um módulo LoRa através do protocolo LoRaWAN. Esse *hardware* é composto por um módulo e uma placa compatível com LoRa, uma bateria e sensores relacionados. O *hardware* deve ser leve o suficiente para respeitar os limites do peso máximo de decolagem (Angrisani *et al.*, 2019).

Vários tipos de dispositivos foram utilizados por pesquisadores em VANTs para funcionar como nós LoRa. O trabalho de Angrisani *et al.* (2019), por exemplo, propôs um sistema inovador de monitoramento de qualidade do ar baseado em VANTs e tecnologias IoT. O objetivo era fornecer uma solução escalável e flexível para o monitoramento de qualidade do ar em áreas urbanas. Para realizar o estudo, os autores utilizaram VANTs equipados com sensores de qualidade do ar, que coletavam dados em tempo real sobre a concentração de poluentes na atmosfera. Os dados eram transmitidos para uma plataforma IoT central, que analisava e apresentava os dados em tempo real para os usuários. Os resultados mostraram que o sistema proposto pode fornecer uma solução escalável e flexível para o monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas, permitindo a detecção de fontes de poluição e a identificação de áreas com altos níveis de poluição. Além disso, o sistema também pode fornecer informações importantes para as autoridades locais na tomada de decisões para planejar ações de mitigação da poluição. Os autores concluíram que o sistema proposto tem potencial para se aplicar em diferentes cenários de monitoramento de qualidade do ar, como em áreas urbanas, rurais e industriais, e pode fornecer dados valiosos para melhorar a saúde pública e a qualidade de vida das pessoas.

Os autores do artigo Rahmadhani *et al.* (2018) propuseram um sistema de comunicação híbrido que utiliza tanto a rede celular quanto a tecnologia LoRaWAN para enviar informações sobre a localização e o status dos VANTs durante serviços de entrega, permitindo uma comunicação contínua entre os VANTs e a estação terrestre. A ideia é que, se a conexão celular falhar, o sistema LoRaWAN possa ser usado como uma alternativa para garantir que os dados de telemetria sejam entregues. Para avaliar a eficácia do sistema, os autores realizaram experimentos em um ambiente simulado, utilizando uma plataforma de VANT comercial equipada com um módulo LoRaWAN e uma estação terrestre equipada com um gateway LoRaWAN. Os resultados mostraram que o sistema híbrido melhorou significativamente a taxa de sucesso da entrega de pacotes em comparação ao uso exclusivo da rede celular, além de ser mais eficiente em termos de consumo de energia, prolongando a vida útil da bateria dos VANTs. Os testes de voo realizados em áreas urbanas e suburbanas, com e sem obstáculos, mostraram que o uso do LoRaWAN como sistema de comunicação secundário aumentou significativamente a taxa de

entrega de pacotes do VANT (98,7%) em relação aos testes realizados sem o uso do LoRaWAN (82,3%), além de melhorar a estabilidade da conexão entre o VANT e a estação terrestre em áreas com obstáculos. Os autores concluíram que o LoRaWAN pode ser uma opção viável para aumentar a confiabilidade na entrega de dados de telemetria em áreas urbanas e suburbanas.

Em Saraereh *et al.* (2020), os autores propuseram a utilização de VANTs equipados com dispositivos LoRa para criar redes de comunicação de longo alcance em cenários de gerenciamento de desastres. O objetivo era avaliar a viabilidade e a eficácia desta solução para fornecer uma rede de comunicação de emergência confiável e eficiente em áreas afetadas por desastres naturais. Para realizar o estudo, os autores utilizaram VANTs equipados com dispositivos LoRa para criar redes de comunicação em duas áreas de teste, uma urbana e outra rural. Eles mediram a qualidade do sinal de comunicação, a taxa de transferência de dados e a eficiência do consumo de energia do sistema. Os resultados mostraram que as redes de comunicação de VANTs LoRa podem ser utilizadas para estabelecer comunicação de emergência em áreas afetadas por desastres naturais, como terremotos, incêndios e inundações. A rede LoRa mostrou uma boa qualidade do sinal em distâncias de até 10 km, com uma taxa de transferência de dados de até 50 kbps. Além disso, a rede LoRa consumiu menos energia do que outras tecnologias de comunicação de emergência, como as redes celulares e as redes de satélite. Os autores concluíram que a utilização de VANTs equipados com dispositivos LoRa pode fornecer uma solução eficaz de rede de comunicação de emergência em áreas afetadas por desastres naturais, com baixo consumo de energia e alta eficiência de transferência de dados.

3.2 Técnicas para aumento de desempenho na entrega de pacotes LoRa

A principal técnica utilizada no estado da arte para aumentar a recepção de pacotes LoRa é a utilização de técnicas de diversidade. Como exemplo, para melhorar o desempenho de transmissão de redes LoRa, os autores de Hoeller *et al.* (2018) propuseram uma análise do desempenho de redes LoRa com diversidade temporal e de antena para melhorar a eficiência e a confiabilidade na transmissão de dados. Para realizar o estudo, os autores implementaram um modelo de canal de comunicação para simular as condições do ambiente urbano e avaliar o desempenho da rede. O modelo incluiu informações sobre o tamanho e a disposição dos edifícios, bem como a presença de obstáculos e interferência de outras fontes de rádio. Foram realizados testes variando os parâmetros de tempo e antena e medindo a taxa de entrega de pacotes, a qualidade do sinal e a eficiência energética. Os resultados mostraram que a utilização

de técnicas de diversidade temporal e de antena pode melhorar significativamente a taxa de entrega de pacotes e a qualidade do sinal em redes LoRa em cenários urbanos, em comparação com redes que utilizam somente uma antena ou somente diversidade temporal. Além disso, os resultados mostraram que o uso da diversidade de antena e temporal aumentou significativamente o desempenho da rede LoRa, elevando a taxa de entrega de pacotes em até 20% e melhorando a qualidade do sinal em cenários de alta interferência. Assim, os autores concluíram que a utilização da diversidade temporal e de antena pode ser uma técnica eficaz para aprimorar o desempenho de redes LoRa e torná-las mais adequadas para aplicações críticas, como monitoramento e transmissão de dados em ambientes urbanos e rurais.

No trabalho de Magrin *et al.* (2017), os autores propuseram avaliar o desempenho de redes LoRa em cenários de cidades inteligentes. O objetivo principal era verificar a viabilidade da utilização desta tecnologia em ambientes urbanos densamente povoados, onde existe uma grande quantidade de dispositivos interconectados. Para realizar a avaliação, os autores organizaram células hexagonais que representam uma área urbana e implantaram gateways LoRa em pontos estratégicos dentro dessa área, para receber os sinais dos dispositivos finais. Para tal, eles realizaram uma análise de desempenho em termos de cobertura, consumo de energia e confiabilidade, considerando diferentes densidades de tráfego. A avaliação foi realizada por meio de simulações de rede em um ambiente urbano realista, com diferentes densidades de tráfego de dispositivos IoT. Os resultados mostraram que a tecnologia LoRa é viável para implantação em cidades inteligentes, com capacidade para lidar com altas densidades de tráfego. Além disso, foi observado que a taxa de entrega de pacotes é afetada pela densidade de dispositivos IoT, mas se mantém acima de 95% em densidades de até 2 dispositivos por metro quadrado. Em relação ao consumo de energia, foi verificado que o uso da tecnologia LoRa permite uma economia significativa em comparação a outras tecnologias sem fio, como Wi-Fi e *Bluetooth*. A confiabilidade da rede LoRa também foi avaliada, e os resultados mostraram que a tecnologia é capaz de lidar com uma taxa de perda de pacotes de até 5%. De modo geral, os resultados indicaram que a tecnologia LoRa é uma opção viável e promissora para a implementação de redes de IoT em cenários de cidades inteligentes, permitindo uma cobertura mais ampla, maior economia de energia e uma confiabilidade satisfatória.

Os autores do artigo Song *et al.* (2019) propuseram a utilização da técnica de macrodiversidade baseada em combinação de recepção máxima (MRC) para melhorar o desempenho de redes LoRa em termos de taxa de entrega de pacotes e eficiência espectral. O objetivo era avaliar

a eficácia desta técnica em comparação com outras técnicas de diversidade já utilizadas em redes LoRa. Para isso, os autores desenvolveram um modelo analítico para avaliar o desempenho da técnica MRC em redes LoRa, considerando diferentes cenários de tráfego e configurações de rede. Eles também realizaram simulações para validar o modelo e comparar o desempenho da técnica MRC com outras técnicas de diversidade. Os resultados mostraram que a técnica MRC obteve melhor desempenho em relação às outras técnicas de diversidade de recepção em cenários de alta interferência. Além disso, os autores observaram que a utilização de múltiplas antenas em células hexagonais pode aumentar a cobertura e a capacidade da rede. Dessa forma, o estudo indicou que a técnica de diversidade de recepção MRC é uma solução eficiente para melhorar o desempenho de redes de acesso aleatório de longo alcance em cenários urbanos, e que a utilização de múltiplas antenas em células hexagonais pode ser uma estratégia adicional para otimizar ainda mais o desempenho da rede.

3.3 Organização de células em espaço geográfico

A distribuição de células em um sistema de comunicação celular é um fator crítico para o desempenho da rede. Por isso, muitos trabalhos têm simplificado a distribuição de células em formatos circulares. Esta configuração permite analisar o desempenho das redes LoRaWAN assumindo uma densidade constante de nós dentro da área de cobertura do gateway. Os modelos clássicos que existem nesta configuração permitem avaliar o desempenho da rede. Por exemplo, o trabalho de Duda e Heusse (2019) examina o desempenho de LoRaWAN em diferentes configurações de células circulares.

A representação de modelos de monitoramento de grandes áreas por meio de células em formato circular pode gerar problemas de sobreposição. Para mitigar esses efeitos, a utilização de células em formato hexagonal para distribuição no espaço geográfico tem sido abordada em alguns trabalhos da literatura. O uso deste formato se mostra eficiente para cobrir regiões de forma homogênea e simplificar a representação dos modelos.

Como exemplo, no artigo Varsier e Schwoerer (2017) os autores propuseram uma análise da capacidade de rede da tecnologia LoRaWAN em cenários de aplicação de medição inteligente. O objetivo principal foi avaliar as capacidades da rede LoRaWAN em termos de densidade de dispositivos, *throughput* e cobertura em áreas urbanas. Para isso, foram realizados experimentos em laboratório e simulações com o uso de modelos matemáticos. Os resultados mostraram que a capacidade da rede LoRaWAN para suportar dispositivos IoT em cenários

de medição inteligente é limitada, principalmente devido às limitações de largura de banda e capacidade de processamento. Além disso, os autores também utilizaram células hexagonais para modelar a cobertura da rede, demonstrando que essa abordagem pode ser útil para entender a densidade e o desempenho dos dispositivos. As células hexagonais foram organizadas em uma grade regular, com cada célula representando uma área de cobertura de um gateway LoRaWAN. O tamanho da célula hexagonal foi determinado pelo alcance do sinal LoRaWAN e pelo número de dispositivos que poderiam ser atendidos pelo gateway dentro da célula. Os autores também consideraram a interferência entre as células e a capacidade do gateway de lidar com o tráfego de dados gerado pelos dispositivos dentro da célula. De acordo com os autores, a utilização de células hexagonais pode ser uma ferramenta útil para a análise da capacidade da rede LoRaWAN, pois permite avaliar a densidade de dispositivos e a cobertura da rede com maior precisão, bem como identificar possíveis interferências entre células adjacentes. Em suma, o estudo contribui para a compreensão dos limites de capacidade da tecnologia LoRaWAN em cenários de medição inteligente e destaca a importância de abordagens analíticas precisas para a planejamento e implementação de redes IoT.

Já os autores de Yu *et al.* (2017) propuseram um estudo sobre a viabilidade da tecnologia LoRaWAN para aplicações de cidades inteligentes. O objetivo do estudo era avaliar o desempenho da rede LoRaWAN em diferentes cenários urbanos e fornecer informações úteis para o planejamento de redes LoRaWAN em cidades inteligentes. Para realizar o estudo, os autores implantaram um sistema de teste LoRaWAN em um ambiente urbano e mediram a taxa de entrega de pacotes em diferentes cenários, incluindo áreas urbanas densas e áreas rurais. Eles também utilizaram modelos de células hexagonais para avaliar o desempenho da rede em diferentes densidades de tráfego. Cada célula foi alocada a um nó central e cobriu uma área específica. Os nós centrais atuaram como gateways, que foram conectados a um servidor na nuvem, permitindo a comunicação entre os dispositivos finais e o servidor. O tamanho e a potência de transmissão de cada célula hexagonal foram otimizados para maximizar a cobertura da rede e minimizar a interferência entre as células adjacentes. Os autores também realizaram simulações para avaliar a eficácia da rede LoRaWAN em diferentes cenários de aplicação, incluindo medições de campo para validar as simulações. Os resultados do estudo mostraram que a tecnologia LoRaWAN pode ser viável para aplicações de cidades inteligentes em áreas urbanas com densidade moderada, mas podem surgir desafios em áreas urbanas densas, devido à interferência eletromagnética e à propagação do sinal. Os modelos de células hexagonais demonstraram que o desempenho da

rede LoRaWAN pode ser afetado pela densidade de tráfego e pelo tamanho da célula. Além disso, os autores concluíram que o uso de gateways com múltiplas antenas pode melhorar significativamente o desempenho da rede LoRaWAN em áreas urbanas densas.

Gopal e Prabhakar (2020) propuseram um método híbrido para melhorar a escalabilidade e confiabilidade em redes LoRa. O objetivo dos autores é aumentar a taxa de dados e a confiabilidade das redes LoRa, além de reduzir a sobrecarga computacional nos gateways. Os autores realizaram a proposta de uma abordagem híbrida combinando técnicas de divisão de células hexagonais e diversidade de antena. Para isso, eles organizaram as células hexagonais em sub-regiões menores, chamadas de “microcélulas”, o que permitiu aumentar a capacidade de transmissão de dados e reduzir a interferência entre os dispositivos. Além disso, a técnica de diversidade de antena foi implementada para melhorar a qualidade do sinal e reduzir as taxas de erro. Os resultados obtidos pelos autores mostram que a abordagem híbrida proposta pode melhorar significativamente o desempenho das redes LoRa. A utilização das microcélulas hexagonais por si só já proporcionou um aumento significativo na taxa de entrega de pacotes em comparação com a utilização da rede sem divisão em células hexagonais. Além disso, a implementação da técnica de diversidade de antena possibilitou uma redução nas taxas de erro e, conseqüentemente, uma melhora na qualidade do sinal. Ainda, os resultados mostraram que o método híbrido proposto melhorou significativamente a escalabilidade, confiabilidade e velocidade computacional da rede LoRa. A taxa de sucesso na entrega de pacotes aumentou em mais de 10%, enquanto a taxa de perda de pacotes foi reduzida em mais de 50%. Além disso, o tempo de espera para confirmação de pacotes foi reduzido em até 40%. Os resultados também mostraram que a criação de células hexagonais com tamanhos diferentes pode ser uma solução eficaz para melhorar a escalabilidade da rede LoRa.

3.4 Técnicas de agrupamento para alocação de dispositivos IoT

Os autores de Alablani e Alenazi (2020) propuseram um método de implantação de sensores IoT em cidades inteligentes, denominado EDTD-SC (“*Evaluated Delaunay Triangulation-based Deployment for Smart Cities*”). O objetivo era otimizar a implantação dos sensores em termos de cobertura e custo, utilizando uma abordagem de agrupamento para dividir a cidade em áreas menores e assim facilitar a alocação dos dispositivos. O estudo foi realizado na cidade de *Riyadh*, na Arábia Saudita, e utilizou a tecnologia LoRaWAN para a comunicação dos sensores. Essa tecnologia foi escolhida por sua baixa taxa de transmissão e longo alcance, o que

permite a cobertura de grandes áreas com um número reduzido de dispositivos. Eles aplicaram o algoritmo k-médias para identificar áreas de alta densidade e agrupá-las em clusters. Em seguida, eles propuseram um modelo matemático para determinar o número ideal de sensores em cada cluster e sua localização ótima. Além disso, os autores utilizaram a técnica de divisão da cidade em áreas hexagonais para facilitar a alocação dos dispositivos IoT. Eles aplicaram a técnica conhecida como mosaico de grade hexagonal (*hexagonal grid tessellation*) para criar uma malha hexagonal na cidade saudita. Essa técnica consiste em criar uma grade de hexágonos que cobre toda a cidade, e cada hexágono tem um tamanho definido. Os autores utilizaram o software *ArcGIS* para gerar a malha hexagonal e definir o tamanho dos hexágonos. A divisão em hexágonos foi escolhida por ser uma forma regular que permite uma cobertura mais uniforme da cidade, além de facilitar a alocação dos dispositivos IoT. A malha hexagonal resultante foi utilizada como base para a aplicação do algoritmo k-médias e a definição da localização ótima dos dispositivos em cada cluster. Os resultados mostraram que a estratégia proposta pode reduzir significativamente o número de sensores necessários para cobrir a cidade, enquanto ainda mantém uma cobertura confiável e eficiente. Além disso, os autores compararam a estratégia proposta com outros métodos de implantação de sensores e mostraram que sua abordagem é superior em termos de eficiência e economia. Desta forma, os autores mostraram que o método de agrupamento baseado no k-médias, combinado com a tecnologia LoRaWAN, pode ser uma ferramenta útil para a implantação de sensores IoT em cidades inteligentes, reduzindo os custos e aumentando a eficiência da rede.

No artigo Bilen *et al.* (2021), os autores propuseram uma estratégia de agrupamento baseada em k-médias personalizada para redes *ad hoc* aeronáuticas, com o objetivo de melhorar a eficiência da rede, aumentar a capacidade e reduzir a interferência e o atraso de transmissão. Para realizar o estudo, os autores utilizaram um modelo de simulação de rede *ad hoc* aeronáutica e aplicaram a estratégia de agrupamento personalizada baseada em k-médias para dividir a rede em clusters com topologia hexagonal. Em seguida, os clusters foram alocados em diferentes altitudes de acordo com suas necessidades de comunicação, criando um modelo de camada física de várias altitudes. Os resultados mostraram que a estratégia proposta aumentou significativamente a eficiência da rede, aumentando a capacidade de transmissão em até 45% em comparação com outras estratégias de agrupamento. Além disso, a abordagem personalizada de k-médias permitiu a criação de clusters com formatos e tamanhos variados, para atender às necessidades específicas de diferentes áreas da rede *ad hoc* aeronáutica. Em suma, os autores propuseram uma estratégia

de agrupamento baseada em k-médias personalizado para redes *ad hoc* aeronáuticas, que pode melhorar a eficiência da rede, aumentar a capacidade e reduzir a interferência e o atraso de transmissão. A abordagem utilizou células hexagonais e alocação de clusters em diferentes altitudes para criar um modelo de camada física de várias altitudes. Os resultados mostraram que a abordagem personalizada de k-médias pode ser eficaz para redes *ad hoc* aeronáuticas.

Os autores do artigo Stellin *et al.* (2020) propuseram uma arquitetura de rede baseada em VANTs equipados com gateways LoRa para prover conectividade em áreas remotas, usando uma malha Wi-Fi. O objetivo do estudo era investigar a possibilidade de se utilizar uma malha Wi-Fi para fornecer conectividade entre os VANTs que atuam como gateways LoRa e dispositivos IoT terrestres, permitindo a coleta de dados em locais remotos, como florestas e oceanos. Para realizar o estudo, os autores utilizaram um conjunto de VANTs equipados com gateways LoRaWAN e um conjunto de dispositivos, como sensores de temperatura, umidade e pressão atmosférica. Os VANTs funcionavam como gateways LoRa, o que significa que eles eram capazes de receber dados dos dispositivos IoT terrestres. Para que os VANTs pudessem compartilhar os dados com os servidores, foi necessário criar uma rede Wi-Fi em malha. Esta conexão permitiu que os VANTs se comunicassem com a internet e enviassem os dados para a nuvem. Os autores também sugeriram um método de agrupamento baseado em k-médias para otimizar a implantação dos VANTs e a conectividade dos dispositivos IoT terrestres. Eles dividiram a área de interesse em células hexagonais e atribuíram VANTs para cada célula com base na cobertura de sinal. A análise dos dados obtidos mostrou que a estratégia adotada apresentou um desempenho satisfatório em termos de conectividade em ambientes remotos, superando a eficiência observada na implantação aleatória de dispositivos de rede. Além disso, a combinação dessas tecnologias permitiu uma comunicação mais robusta e confiável em comparação ao uso exclusivo da comunicação LoRaWAN.

Em (ElSabaá *et al.*, 2022), os pesquisadores exploraram avanços na conectividade usando tecnologias LPWAN, com foco especial em LoRaWAN. O experimento, realizado em *Birmingham*, Reino Unido, usou medições reais com dispositivos comerciais para avaliar o desempenho do LoRa na identificação e monitoramento de objetos. Eles propuseram um modelo de atenuação de canal para estimar a perda de sinal em áreas urbanas, comparando-o a modelos empíricos e refinando-o para um ajuste ideal. Além disso, sugeriram abordagens que utilizam o agrupamento de regiões geográficas por meio do algoritmo k-médias, resultando em melhorias na recepção de sinais LoRa, observando uma diminuição entre 4% e 18%.

A Tabela 1 exibe um sumário dos critérios de comparação entre os trabalhos relacionados e a proposta desta dissertação. Os critérios foram: (i) Utilizou VANT como dispositivo final ou gateway?; (ii) Utilizou alguma técnica de diversidade específica?; (iii) Propôs a utilização de células hexagonais no espaço?; (iv) Utilizou alguma técnica de combinação no receptor?; (v) Utilizou alguma técnica de agrupamento?.

A análise dos trabalhos apresentados na tabela revela algumas tendências distintas. Em relação ao uso de VANTs, observa-se que 2 trabalhos empregaram VANTs como dispositivo final (ED), enquanto outros 2 utilizaram VANTs como gateway (GT), e 9 trabalhos optaram por não fazer uso de VANTs. No que diz respeito às técnicas de diversidade, 5 trabalhos incorporaram essas técnicas em suas metodologias, contrastando com 8 trabalhos que não as aplicaram. Quanto à adoção de células hexagonais, 6 trabalhos optaram por essa abordagem, enquanto 7 trabalhos não a utilizaram. Em relação às técnicas de combinação, 2 trabalhos empregaram o MRC e 1 trabalho utilizou o EGC, enquanto 10 trabalhos não fizeram uso de nenhuma técnica de combinação. Por fim, no que tange às técnicas de agrupamento, 4 trabalhos as implementaram, enquanto 9 trabalhos escolheram não adotar essa abordagem em suas pesquisas.

Em relação às técnicas de combinação, alguns trabalhos utilizaram a técnica MRC, que consiste em selecionar o sinal de maior potência dentre os sinais recebidos pelas antenas, enquanto outros utilizaram a técnica EGC, que combina todos os sinais recebidos pelas antenas de forma igualitária. Já a dissertação proposta utilizará a técnica MRC, pois estudos mostram que ela é mais eficiente para combinação de sinais em geral. É importante destacar que apenas alguns trabalhos utilizaram técnicas de agrupamento, que consistem em agrupar regiões geográficas específicas para melhor gerenciamento da rede.

Por fim, a proposta desta dissertação apresenta um conjunto abrangente de técnicas para aprimorar a conectividade em ambientes remotos. Isso envolve a utilização de VANTs como dispositivos finais, diversidade de antenas, técnicas de combinação de sinal e agrupamento, além de abranger a área de interesse por meio de células hexagonais. Essa abordagem mais abrangente tem o potencial de produzir resultados superiores em termos de desempenho e conectividade, se comparada aos trabalhos relacionados.

Tabela 1 – Comparação entre os trabalhos relacionados e o proposto (Legenda: ED = VANT como dispositivo final, GT = VANT como gateway).

Trabalhos	VANTs	Técnicas de Diversidade	Células Hexagonais	Técnicas de Combinação	Técnicas de agrupamento
(Angrisani <i>et al.</i> , 2019)	Sim (ED)	Não	Não	Não	Não
(Rahmadhani <i>et al.</i> , 2018)	Sim (ED)	Não	Não	Não	Não
(Saraereh <i>et al.</i> , 2020)	Sim (GT)	Sim	Não	Não	Não
(Hoeller <i>et al.</i> , 2018)	Não	Sim	Não	Sim (MRC)	Não
(Magrin <i>et al.</i> , 2017)	Não	Sim	Não	Não	Não
(Song <i>et al.</i> , 2019)	Não	Sim	Não	Sim (EGC)	Não
(Varsier; Schwoerer, 2017)	Não	Não	Sim	Não	Não
(Yu <i>et al.</i> , 2017)	Não	Não	Sim	Não	Não
(Gopal; Prabhakar, 2020)	Não	Sim	Sim	Sim (MRC)	Não
(Alablani; Alenazi, 2020)	Não	Não	Sim	Não	Sim
(Bilen <i>et al.</i> , 2021)	Não	Não	Sim	Não	Sim
(Stellin <i>et al.</i> , 2020)	Sim (GT)	Não	Sim	Não	Sim
(ElSabaa <i>et al.</i> , 2022)	Não	Não	Não	Não	Sim
Proposta do autor	Sim (ED)	Sim	Sim	Sim (MRC)	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados a definição dos cenários de teste, a organização dos componentes da rede, e as configurações que visam melhorar a recepção de pacotes LoRa utilizados na detecção de incêndios florestais. Além disso, são detalhados os métodos e técnicas utilizados na execução dos experimentos, assegurando uma compreensão clara dos procedimentos adotados.

4.1 Seleção do local de estudo para simulações

A escolha do ambiente para realização dos testes envolveu uma série de fatores relacionados à identificação de incêndios florestais em uma região de conservação ambiental. Nesse sentido, as unidades de conservação de Altamira, localizadas no estado do Pará, mostraram-se uma opção ideal por diversas razões. A principal razão reside em sua vasta extensão territorial, comparável à de países europeus, e em sua extensa cobertura de mata. O município abrange 183.041,69 km², destacando-se como uma região de considerável importância para o monitoramento ambiental (Balée *et al.*, 2020). Ainda, a região de Altamira é caracterizada por uma topografia complexa, o que dificulta o acesso às áreas afetadas pelos incêndios (XAVIER, D. M. .; PEREIRA JUNIOR, A., 2021). Além disso, a região é caracterizada por uma grande biodiversidade, o que reforça a necessidade de preservação e conservação do ecossistema local (Carvalho *et al.*, 2016).

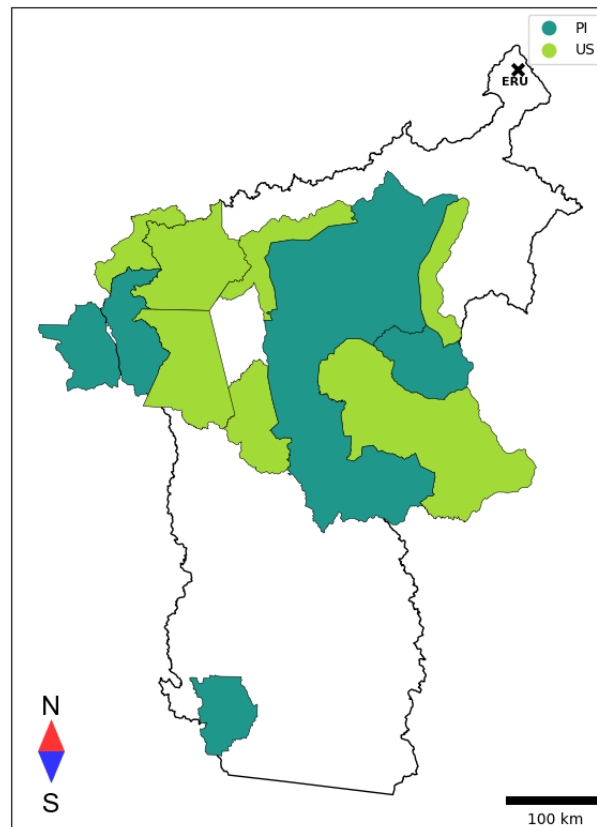
Para realizar o monitoramento da região, foi distribuída uma malha de células hexagonais ao longo das áreas de conservação. Essa estrutura possibilita a identificação e análise de áreas específicas na região, auxiliando na identificação de eventuais focos de incêndio e contribuindo para a tomada de decisões quanto às ações de combate e prevenção.

É apresentado na Figura 26 o mapa do município de Altamira com as regiões de conservação destacadas em diferentes cores, representando diferentes categorias de conservação: PI (Proteção Integral) e US (Uso Sustentável). As regiões de proteção integral aparecem em tons mais escuros, indicando uma proteção mais restritiva e limitadora do uso humano, enquanto as regiões de uso sustentável são representadas em tons mais claros, indicando uma proteção mais flexível e compatível com o uso humano.

Ainda em relação à mesma figura, observamos a presença de um componente da rede denominado Estação de Recepção Urbana (ERU), situado na cidade de Altamira. Com

pouco mais de 126.200 habitantes, é a cidade mais importante às margens do rio Xingu, um dos maiores afluentes do rio Amazonas, sendo reconhecida por sua posição estratégica na região amazônica e por ser um importante centro urbano na área (Balée *et al.*, 2020).

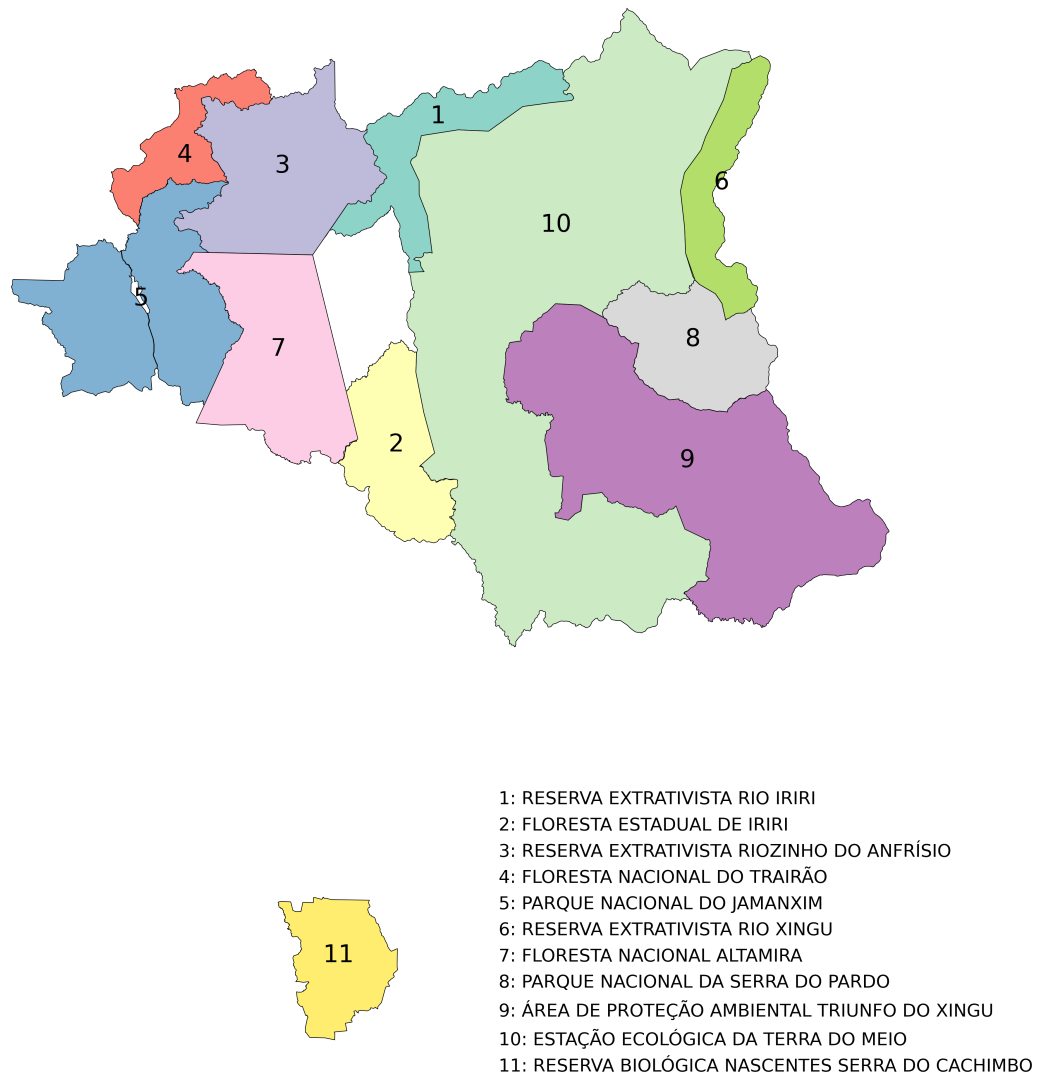
Figura 26 – Unidades de conservação sobre a cidade de Altamira-PA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 27 é representado o mapa das unidades de conservação destacadas, numeradas de 1 a 11 e nomeadas na legenda localizada na parte inferior direita da figura. O conjunto dessas unidades totaliza uma área de 109.538,46 km². As 11 unidades de conservação abrangem diferentes tipos de vegetação, como a Floresta Nacional de Altamira e a Área de Proteção Ambiental do Tapajós, que possuem principalmente a vegetação de floresta tropical (Balée *et al.*, 2020; XAVIER, D. M. .; PEREIRA JUNIOR, A., 2021). Já a Estação Ecológica do Jari é caracterizada por florestas ombrófilas densas e a Área de Proteção Ambiental do Jamanxim possui vegetação de cerrado e floresta tropical. O relevo também pode variar entre as diferentes áreas de conservação, sendo que algumas são compostas por terrenos planos e outras possuem relevo acidentado (BRAGA JUNIOR, Euclides de Oliveira, 2018).

Figura 27 – Mapeamento das 11 áreas de conservação.



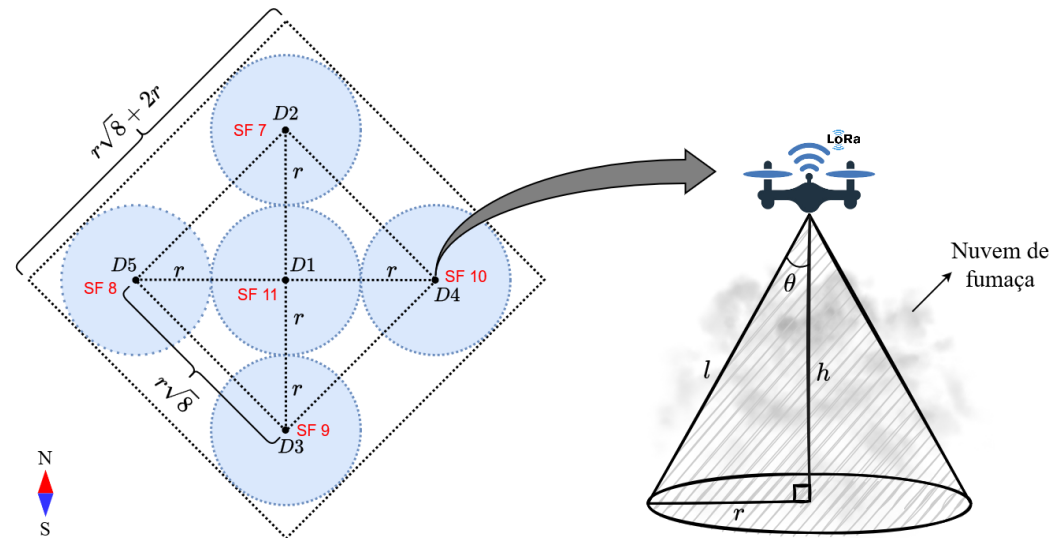
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Enxame de VANTs

O enxame é definido como um grupo de VANTs encarregado de explorar uma área de monitoramento em busca de fumaça. A configuração estratégica de cinco VANTs, exemplificada na Figura 28, destaca a formação de cones de detecção de fumaça. Cada VANT, quando observado de cima, ocupa o centro de uma circunferência que define a base do cone, com raio r . Além disso, os VANTs operam em altitudes de h , utilizando sensores ópticos com ângulo θ para identificar fumaça. Essa disposição ocorre de forma estratégica, abrangendo pontos cardeais como norte, sul, leste e oeste. A área de monitoramento de cada VANT corresponde à base do cone associado. O VANT central desempenha um papel essencial na geometria do

enxame, garantindo que nenhum ponto crítico seja negligenciado, o que otimiza a eficácia da operação de monitoramento.

Figura 28 – Visão lateral e superior do enxame de VANTs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

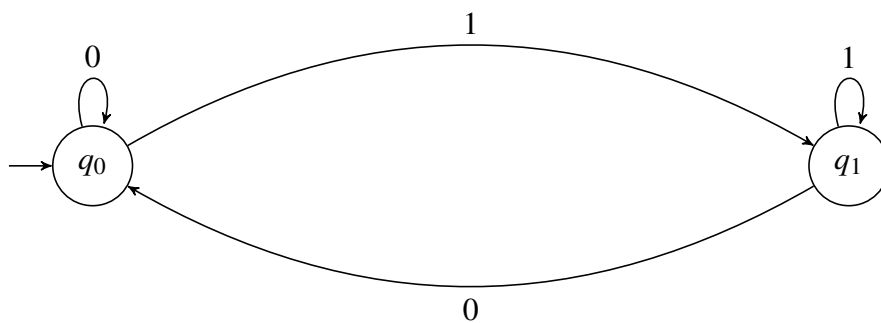
A quasi-ortogonalidade entre os fatores de espalhamento em sistemas LoRa desempenha um papel fundamental na mitigação de interferências e na redução de colisões de pacotes. No contexto do enxame, a utilização de diferentes fatores de espalhamento por cada VANT é essencial para minimizar interferências e prevenir perdas de pacotes, evitando impactos adversos na detecção de incêndios. Para efetuar a alocação dos fatores de espalhamento entre os VANTs, optou-se pelo método de alocação aleatória, implementado por meio de uma distribuição uniforme e assegurando-se que um mesmo SF não seja alocado para mais de um VANT. A cada novo foco de incêndio identificado, uma nova alocação é realizada entre SFs de 7 a 11.

Na Figura 29 é representado um autômato finito determinístico que modela o comportamento do enxame de VANTs durante suas operações de monitoramento. O enxame possui dois estados distintos: q_0 e q_1 , cada um representando diferentes condições operacionais. No estado q_0 , o sistema está em um estado de varredura e coleta de dados, indicando que está ativamente monitorando o ambiente em busca de sinais de fumaça em movimento retilíneo uniforme (MRU). Quando não há presença de fumaça, simbolizada pelo símbolo 0, o sistema permanece nesse estado.

No entanto, quando o sistema detecta a presença de fumaça, representada pelo símbolo 1, ele transita para o estado q_1 . Nesse estado, o enxame fica com velocidade zero em relação ao solo e passa a receber e transmitir dados do ambiente para os gateways responsáveis.

Esses dados fornecem informações essenciais para compreender as condições ambientais e a gravidade do incidente. Nesse estado, o sistema permanece enquanto a fumaça estiver presente. Assim que a fumaça não é mais detectada, o sistema retorna ao estado q_0 , retomando sua operação normal de varredura e coleta de dados. Essa transição de estados entre q_0 e q_1 reflete a capacidade do sistema de adaptar seu comportamento com base nas condições ambientais, priorizando a detecção e resposta à presença de fumaça quando necessário.

Figura 29 – Representação da máquina de estados do enxame durante atividade de monitoramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os tipos de dados coletados e transmitidos aos gateways no estado q_1 do enxame são ilustrados na Figura 30. Durante a simulação, os dados de GPS, como latitude e longitude, são obtidos a partir da posição cartesiana do VANT no espaço. O registro de tempo (*timestamp*) é obtido a partir do relógio do sistema do computador no qual o simulador está em execução. A direção do vento e a intensidade da fumaça são determinadas por valores aleatórios que variam de 0 a 360 graus e de 0 a 10, respectivamente. Esses conjuntos de dados são modulados via LoRa e transmitidos para os gateways dos agrupamentos sobrevoados quando o enxame está no estado q_1 .

No estado q_0 , o enxame concentra-se na coleta de dados relacionados exclusivamente à posição espacial, como latitude, longitude e *timestamp*. Essa abordagem é adotada com o objetivo de permitir que o VANT se localize automaticamente no ambiente, possibilitando a identificação do agrupamento sobre o qual está sobrevoando em qualquer momento. Uma discussão mais aprofundada sobre esse conceito será apresentada mais adiante.

4.3 Células hexagonais, gateways e agrupamentos

No intuito de propiciar uma cobertura uniforme das áreas de conservação, evitar lacunas e abranger todos os pontos críticos, propõe-se uma divisão geográfica em células

Figura 30 – Representação dos dados de coleta para um VANT do enxame no estado q_1 .

```

1  {
2    "dadosGps": {
3      "latitude": -23550,
4      "longitude": -46633,
5      "timestamp": 1641496200
6    },
7    "vetorVento": {
8      "direcao": 180
9    },
10   "intensidadeFumaca": {
11     "valor": 3.5
12   }
13 }

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

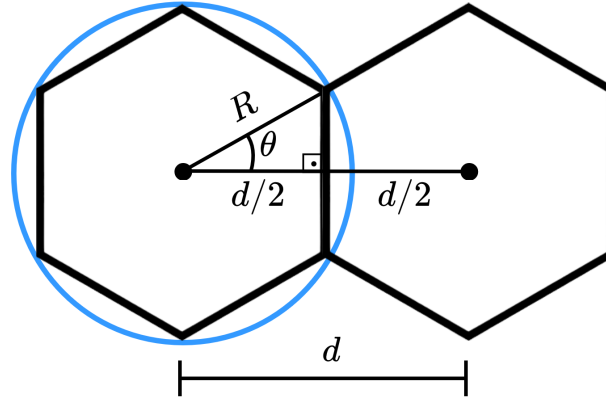
hexagonais. Cada uma dessas células abrange uma área específica, tendo um gateway LoRa posicionado no centro de cada uma delas. A escolha pelo formato hexagonal é vantajosa, pois otimiza a distribuição eficiente dos gateways, garantindo uma cobertura homogênea. Além disso, essa disposição em células hexagonais oferece flexibilidade e escalabilidade, permitindo uma expansão fácil da rede conforme necessário. Ainda, esse tipo de disposição minimiza sobreposições e lacunas proporcionando uma rede de monitoramento mais equitativa e eficaz nas áreas de conservação.

A Figura 31 ilustra a disposição geométrica entre duas células adjacentes, cada uma com um gateway posicionado no centro. A circunferência em azul representa a área de cobertura do gateway, com raio R . Considerando que o hexágono inscrito é regular, o ângulo θ é de 60° . Utilizando relações trigonométricas, podemos estabelecer que a distância entre gateways vizinhos é dada por $d = R\sqrt{3}$. Dessa forma, a área total (A_t) de cobertura de uma única célula hexagonal coincide com a área de cobertura do gateway LoRa e é calculada por meio da seguinte relação:

$$A_t = \frac{3R^2\sqrt{3}}{2}. \quad (4.1)$$

Para abranger uma extensa área de monitoramento, as unidades de conservação, como ilustrado na Figura 32, foram estrategicamente divididas em 336 células hexagonais, cobrindo uma área total de 109.538,46 km² do território. Nesse caso, cada gateway tem sua área de cobertura delimitada por uma circunferência com um raio de aproximadamente 10,76

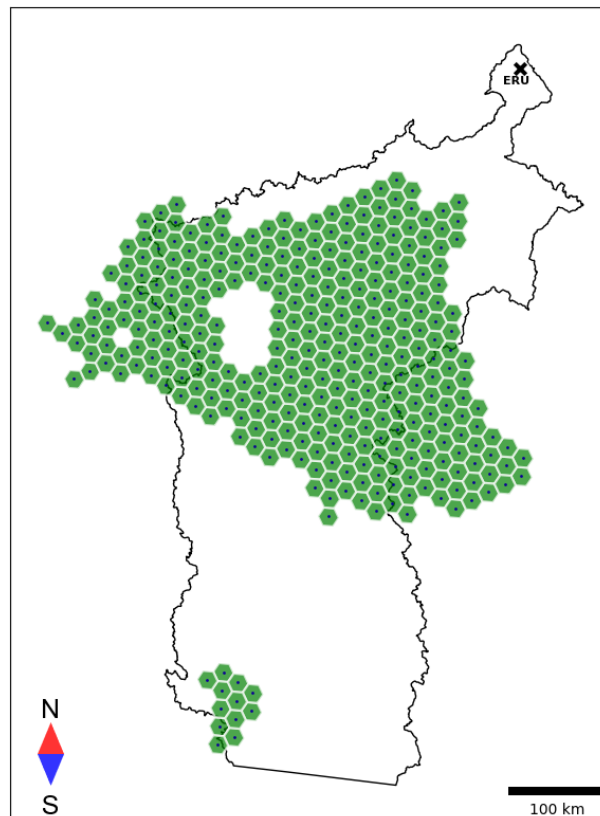
Figura 31 – Representação geométrica da distância entre gateways de células adjacentes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

quilômetros. Essa medida fracionada foi escolhida para assegurar uma cobertura integral das unidades de conservação. Vale destacar que esse alcance aproximado de 10 quilômetros de raio é uma distância frequentemente empregada em gateways LoRa tradicionais.

Figura 32 – Distribuição das células hexagonais ao longo das unidades de conservação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, os gateways são organizados em grupos ou clusters, sendo que a estruturação desses clusters pode ou não envolver o uso de algoritmos de agrupamento. A utilização desses algoritmos não é obrigatória para o funcionamento do sistema, mas pode ser aplicada com o propósito de aprimorar a estimação dos pacotes LoRa recebidos. Em termos de comunicação, nenhum gateway estabelece conexão com outro gateway, seja dentro do mesmo agrupamento ou entre agrupamentos distintos.

Na arquitetura proposta, os gateways desempenham uma função central na coleta, processamento e transmissão de dados. Cada célula hexagonal, que inclui um gateway central, serve como ponto de convergência para os dados coletados pelos VANTs em seus respectivos grupos. Inicialmente, quando os VANTs detectam fumaça em modo estacionário, eles enviam pacotes de dados para os gateways. Posteriormente, esses pacotes são demodulados nos gateways locais dentro do grupo em que o VANT está sobrevoando. Após isso os gateways combinam os sinais recebidos, modulam o sinal resultante e os encaminham para outro componente da rede.

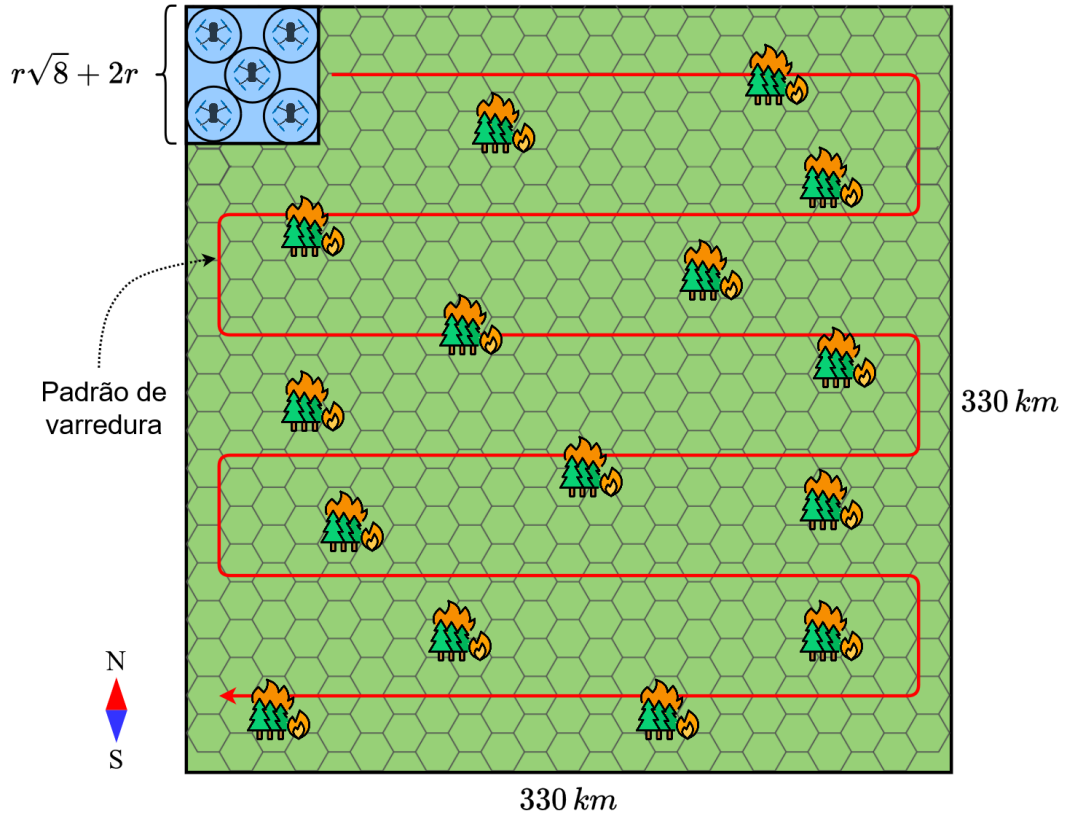
Os gateways na configuração da região de monitoramento são equipados com antenas colocalizadas, as quais são utilizadas para combinar os sinais LoRa enviados pelo enxame de VANTs, proporcionando benefícios significativos em termos de qualidade e confiabilidade da comunicação. Esta disposição faz uso de múltiplas antenas para estabelecer braços de diversidade, reduzindo os efeitos de desvanecimento e melhorando a robustez contra interferências. Para garantir uma combinação precisa dos sinais, é necessário que a distância entre as antenas seja igual à metade do comprimento de onda da portadora.

4.4 Gerenciamento de varredura do enxame

Um dos principais desafios na identificação de focos de incêndio por meio de VANTs está relacionado ao gerenciamento da varredura que eles realizam no ambiente em que operam. Dessa forma, diversas variáveis estão envolvidas nesse contexto, tais como a altura em que os VANTs voam, o raio de detecção de fumaça, a velocidade do enxame, o padrão de varredura, a intensidade dos incêndios, entre outros.

Com o intuito de estimar o tempo necessário para que um enxame complete uma varredura completa sobre as unidades de conservação, foi realizada uma aproximação geométrica da área total de monitoramento, como ilustrado na Figura 33. Nessa representação, um quadrado com lados medindo 330 quilômetros foi considerado, totalizando uma área de 108.900 km², que corresponde a uma aproximação da área a ser monitorada em ambiente real.

Figura 33 – Exemplo de padrão de varredura realizado por um enxame de VANTs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apenas para fins de comparação, supondo um ângulo de incidência dos sensores de fumaça (θ) dos VANTs de 45° , raio de detecção de fumaça (r) de 500 m e altitude igual a 500 m (h), a área quadrada varrida pelo enxame possui um lado de 2.414,21 metros. Se o enxame se mover de forma coordenada a uma velocidade constante de 100 km/h ao longo do trajeto em vermelho da Figura 33, levaria aproximadamente 19 dias para completar uma varredura total da região, considerando apenas 1 enxame. Essa duração prolongada pode ser problemática por vários motivos.

Primeiramente, durante esse extenso intervalo de tempo, focos de fumaça podem surgir e se propagar na região sem serem detectados, aumentando substancialmente o risco de incêndios não identificados. Além disso, a resposta rápida a incidentes de incêndio é fundamental para mitigar danos extensos e controlar efetivamente a situação. Com quase três semanas necessárias para cobrir toda a área, há um risco considerável de atrasos significativos na resposta aos incêndios, o que pode resultar em danos maiores e dificuldades adicionais no controle do fogo. Outro ponto a considerar é que, dependendo da velocidade de propagação dos incêndios e das condições meteorológicas, áreas críticas podem ser afetadas antes que a varredura seja concluída, comprometendo a eficácia das medidas de prevenção e resposta.

Portanto, seria necessário considerar estratégias alternativas para reduzir o tempo necessário para abranger toda a área, seja aumentando o número de enxames de VANTs, otimizando rotas de varredura por meio de algoritmos específicos ou ajustando as variáveis de configuração do enxame, como velocidade, raio de detecção de fumaça, entre outros. Uma abordagem combinada dessas opções também pode ser eficaz.

Por exemplo, se for dobrado o valor da velocidade de varredura do enxame para 200 km/h, o tempo necessário para varrer a área total será reduzido pela metade, aproximadamente 9 dias e meio. Se a quantidade de enxames for aumentada para dois, mantendo a mesma velocidade de varredura em 200 km/h, levaria pouco mais de 4 dias e meio para varrer toda a área. Com 10 enxames operando na mesma velocidade de varredura de 200 km/h, a área seria coberta em pouco menos de 1 dia. Se considerarmos 20 enxames, mantendo a mesma velocidade de varredura de 200 km/h, então levaríamos menos de meio dia para varrer completamente a área.

Neste exemplo, apenas as características variáveis do enxame são consideradas através do padrão de varredura estabelecido. É importante ressaltar que o foco desta dissertação não reside em investigar a melhor configuração para o padrão de varredura dos enxames. Em vez disso, estamos concentrados em propor uma arquitetura que visa detectar focos de incêndios florestais por meio da tecnologia LoRa com uso de VANTs, ao mesmo tempo em que buscamos aprimorar a qualidade do enlace de comunicação entre VANTs e gateways.

4.5 Estrutura de rede e funções das estações LoRa

A infraestrutura proposta para a rede demanda um processamento eficaz dos dados provenientes dos gateways dentro de um mesmo agrupamento, incluindo operações como coleta, processamento e distribuição dos dados. Assim, é necessário a presença um elemento centralizador que coordene essas operações. A Estação de Processamento Central (EPC) desempenha esse papel, assegurando transparência, escalabilidade e confiabilidade no roteamento dos dados. Equipadas com *hardware* dedicado, as EPCs são projetadas exclusivamente para funções relacionadas a captura e processamento de pacotes LoRa, incluindo recepção, decodificação e roteamento.

A Estação de recebimento urbana (ERU) é uma estação LoRa situada na cidade e conectada à internet. Sua função primordial é captar os dados provenientes das EPCs e encaminhá-los para um servidor de aplicação por meio de uma infraestrutura de comunicação dedicada. Essa operação possibilita a notificação imediata da equipe responsável por lidar com

ocorrências de incêndio. É importante ressaltar que nesta dissertação não nos aprofundamos em aspectos específicos da ERU, tais como a demodulação e o processamento dos dados recebidos. Além disso, optou-se por não explorar a camada de aplicação do sistema, responsável pelo gerenciamento dos alertas direcionados ao usuário, uma vez que a prioridade está focada na melhoria de outra parte da arquitetura de rede proposta.

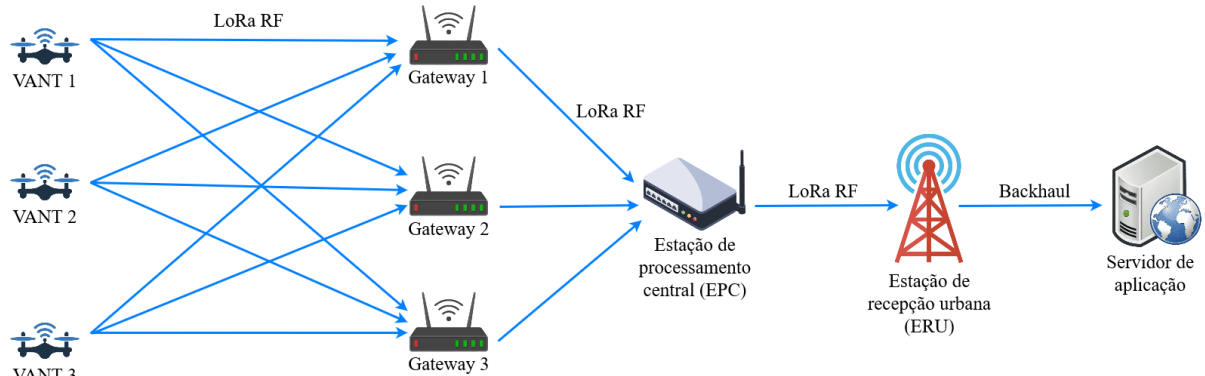
Nosso foco de melhoria concentra-se no link de comunicação LoRa estabelecido entre os VANTs e os gateways, conforme ilustrado na Figura 34, onde é estabelecido um canal de comunicação LoRa entre a EPC e os gateways. O aprimoramento dessa conexão é influenciado por vários fatores, como a distribuição espacial dos gateways e o número de antenas de recepção empregadas.

Os gateways podem ser equipados com antenas receptoras para combinar os sinais enviados pelo enxame. Em um cenário onde o canal de comunicação é AWGN, as antenas receptoras possuem ruído térmico independente com média $\mu = 0$ e variância $\sigma^2 = N_0/2$, onde N_0 representa a densidade espectral de potência do ruído branco aditivo (Garg, 2010).

Ao receber múltiplas cópias dos sinais enviados pelos VANTs, cada gateway combina os sinais recebidos com o mesmo SF. Isso significa que, por exemplo, se um gateway possui duas antenas receptoras e recebe sinais com diferentes fatores de espalhamento, ele combinará as cópias dos sinais para cada SF separadamente, resultando em um único sinal combinado para cada SF. Em seguida, o sinal combinado é encaminhado para a EPC utilizando o mesmo SF usado na recepção. A EPC, por sua vez, processa um total de $5M$ sinais, onde M representa o número total de gateways presentes no agrupamento. Dessa forma, para cada par de VANT e gateway, é estabelecido um sistema SIMO multicliente. Nessa configuração, o VANT atua como o transmissor, equipado com uma única antena de transmissão, enquanto os gateways desempenham o papel de receptores, contando com múltiplas antenas de recepção.

Quando se considera a comunicação entre enxame e gateways, o canal LoRa se comporta de maneira semelhante ao AWGN. Isso se deve à ausência de movimento relativo entre eles, resultando em frequência *Doppler* igual a zero. Da mesma forma, ao se referir à comunicação entre os gateways e EPC, a natureza do canal LoRa também se assemelha ao AWGN. Em ambos os canais, não são observados fenômenos de desvanecimento de pequena escala, mas sim desvanecimento de longa escala. Isso significa que a comunicação pode sofrer variações significativas ao longo do tempo, porém sem os efeitos abruptos e imprevisíveis associados ao desvanecimento de curto alcance.

Figura 34 – Representação da arquitetura de rede proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Algoritmo 1 destaca o papel da EPC em três etapas de processamento: recebimento de pacotes dos gateways, seleção de dados com base na SNR e encaminhamento dos pacotes selecionados para a ERU. A segunda etapa nos possibilita estabelecer métricas de desempenho para avaliar o enlace de comunicação entre o enxame e os gateways.

Algoritmo 1: Etapas de processamento de pacotes LoRa na EPC.

Entrada: N - número de gateways.

Saída : Envio de pacotes LoRa para ERU.

```

1 início
2   para  $i \leftarrow 1$  até  $N$  faça
3     para  $j \leftarrow 7$  até 11 faça
4       Receber pacote LoRa com SF  $j$ ;
5       ArmazenarPacoteRecebido(Demodulação(pacote recebido));
6     fim
7   fim
8   para cada SF faça
9     pacote_snr_max  $\leftarrow$  EncontrarPacotecomMaiorSNR(SF);
10    ArmazenarPacote(pacote_snr_max);
11  fim
12  EnviarPacotesParaERU(Modular(Lista de Pacotes Filtrados));
13 fim

```

Para avaliar a eficácia da comunicação entre o enxame e os gateways, são empregadas duas métricas de desempenho: a relação sinal-ruído (SNR) e a taxa de erro de bits (BER). A SNR é uma medida que indica o quanto a potência do sinal é superior à potência do ruído em um canal específico. A BER é uma métrica que indica a quantidade de bits que são corrompidos ou perdidos durante a transmissão de um sinal digital. No entanto, a relação entre SNR e BER é inversa, o que implica que conforme a SNR aumenta, a BER diminui, e vice-versa.

Entretanto, a relação precisa entre SNR e BER é influenciada por diversos fatores, como o esquema de modulação, o esquema de codificação, a largura de banda e as características do canal de comunicação.

4.6 Características do simulador

Foi desenvolvido simulador em *Python* para apoiar a implementação da arquitetura proposta. Esse simulador permitiu a realização de testes em uma variedade de cenários, desde a simulação de focos de incêndio até análises de desempenho, incluindo a modelagem da coleta e transmissão de pacotes LoRa entre os elementos da rede. Notavelmente, o simulador foi desenvolvido integralmente, pois não foram encontradas soluções de código aberto que simulam condições realistas de incêndios florestais com uso do LoRa. Essa lacuna motivou a criação do simulador, representando assim uma contribuição significativa para a área. Para oferecer suporte ao desenvolvimento, incorporamos a biblioteca *Geobr*, disponibilizada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)¹. Com o intuito de promover a transparência e facilitar o acesso aos interessados, o código fonte do simulador está disponível no GitHub².

4.6.1 Algoritmos de agrupamentos implementados

A distribuição de gateways em uma grande área de conservação ambiental requer uma organização espacial cuidadosa. Diferentes abordagens podem ser consideradas, desde agrupamentos uniformes até técnicas mais avançadas e sofisticadas. Inicialmente, foram formuladas duas propostas: uma baseada no agrupamento dinâmico de gateways utilizando a técnica de k-médias, e outra que opta pelo agrupamento uniforme, dividindo os gateways em grupos de igual tamanho.

Embora o agrupamento uniforme possa parecer adequado à primeira vista, a escolha pelo agrupamento dinâmico é motivada pela necessidade de uma resposta adaptativa às mudanças no ambiente. Essa hipótese é fundamentada na natureza dinâmica do ambiente, onde diversos fatores contribuem para variações que influenciam a comunicação e o desempenho da rede. Entre esses fatores, destacam-se a presença de obstáculos físicos resultantes do relevo da região, variações na posição do enxame e a imprevisibilidade da ocorrência de incêndios florestais.

Através da análise de desempenho, é possível avaliar empiricamente a eficácia do

¹ <https://github.com/ipeaGIT/geobr>

² <https://github.com/mattsousaa/LoRaWildfireSimulator>

agrupamento dinâmico em comparação com o agrupamento uniforme. Esse estudo comparativo pode oferecer uma interessante percepção prévia sobre como a dinâmica do ambiente influencia a seleção da estratégia de organização espacial dos gateways.

4.6.1.1 Agrupamento uniforme de gateways

A primeira funcionalidade relacionada à organização espacial dos gateways implementada no simulador é descrita pelo Algoritmo 2, o qual adota uma abordagem de agrupamento uniforme. Esse algoritmo descreve um procedimento para dividir um conjunto de coordenadas de X gateways em K grupos, onde cada grupo G_i contém M gateways. Inicialmente, o conjunto X é dividido aleatoriamente em K grupos de tamanho M a partir de um centróide aleatório. Após ordenar os hexágonos de acordo com os ângulos em relação ao ponto central, para cada grupo, selecionamos M gateways, formando assim os agrupamentos desejados.

Algoritmo 2: Agrupamento uniforme de gateways.

Entrada: $X = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ = Conjunto de coordenadas dos gateways,
 $C = \{c_1, c_2\}$ = Conjunto de coordenadas do centróide aleatório,
 K = Número de grupos ,
 $M = K/336$ = Número de gateways por grupo.

Saída : Quantidade de gateways associados a cada grupo.

1 **início**

2 | Inicialize um centróide aleatório C ;

3 | Divida aleatoriamente o conjunto X em K grupos de tamanho M em torno de C ;

4 | **para** cada grupo G_i **faça**

5 | | Selecione M gateways do conjunto K_i ;

6 | **fim**

7 **fim**

Nesse contexto, em termos visuais, os agrupamentos podem exibir uma distribuição aparentemente aleatória, já que o algoritmo inicia dividindo o conjunto de gateways em grupos a partir de um centróide aleatório. Isso pode resultar em agrupamentos que não seguem um padrão geométrico específico.

4.6.1.2 Agrupamento dinâmico de gateways

A segunda funcionalidade implementada envolve a aplicação do algoritmo de agrupamento dinâmico k-médias, conforme representado pelo Algoritmo 3. Esse algoritmo é aplicado para dividir o conjunto de coordenadas dos gateways em K grupos distintos. Inicialmente, o al-

goritmo seleciona aleatoriamente K centróides a partir do conjunto de coordenadas dos gateways. Cada ponto é então atribuído ao centróide mais próximo, utilizando a distância euclidiana como medida de proximidade. Posteriormente, os centróides são atualizados iterativamente. Para cada centróide, ele é recalculado como a média das coordenadas dos pontos atribuídos a ele na etapa anterior. Este processo é repetido até que um critério de convergência seja alcançado. Comumente, o critério de convergência envolve a estabilização dos centróides, ou seja, quando a diferença entre os centróides em iterações consecutivas é menor que um determinado limiar ou quando um número máximo de iterações é atingido.

Algoritmo 3: Agrupamento dinâmico de gateways.

Entrada: $X = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ = Conjunto de coordenadas dos gateways,
 K = Número de grupos.

Saída: Quantidade de gateways associados a cada grupo.

1 **início**

2 | Inicialize K centróides C aleatoriamente a partir do conjunto X ;

3 | Inicialize G atribuições de grupos para cada coordenada do conjunto X ;

4 | Associe cada coordenada do conjunto X aos centroides C ;

5 | **repetir**

6 | **para** cada coordenada x_i **faça**

7 | Atribua x_i ao centróide mais próximo: $G[i] \leftarrow \arg \min_j \|x_i - C_j\|$;

8 | **fim**

9 | **para** cada centróide C_j **faça**

10 | Atualize o centróide como a média dos pontos atribuídos: $C_j \leftarrow \frac{1}{|G_j|} \sum_{i \in G_j} x_i$;

11 | Atualize as coordenadas associadas ao centróide C_j ;

12 | **fim**

13 | **até que** critério de convergência seja atingido;

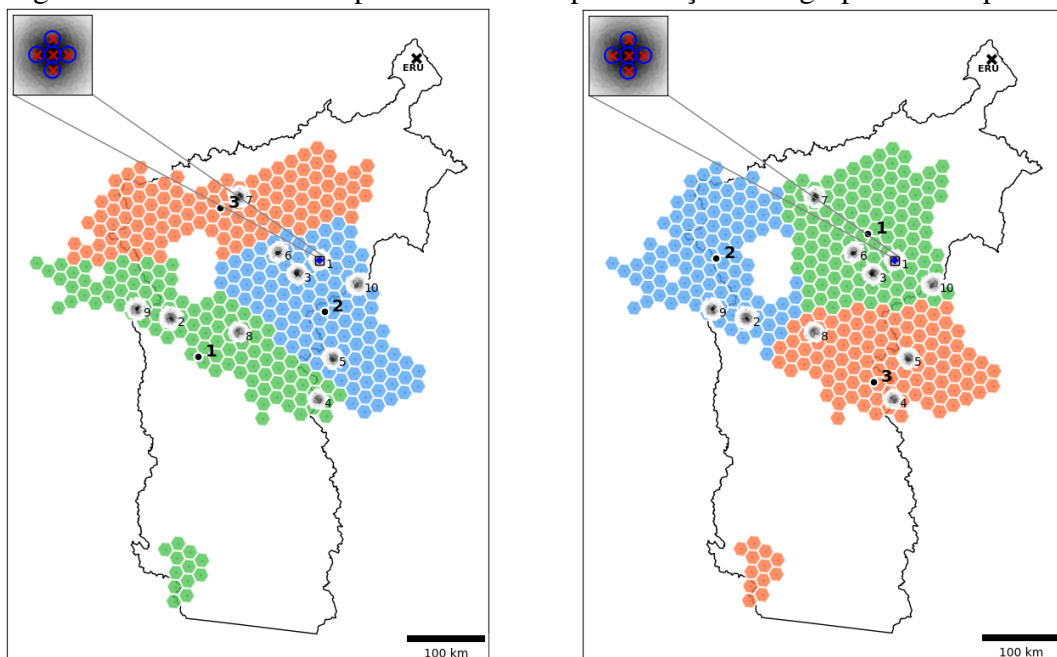
14 **fim**

Essencialmente, o algoritmo dessa funcionalidade opera de forma iterativa para ajustar a posição dos centróides e a alocação dos gateways aos grupos, com o objetivo de formar grupos coesos e distintos. Como resultado, espera-se que o algoritmo forneça uma divisão dos gateways em grupos, onde cada grupo representa uma região espacialmente coesa, com os gateways dentro de um grupo exibindo similaridades em termos de proximidade espacial. Visualmente, espera-se que os grupos formem distribuições geometricamente uniformes, refletindo uma separação clara e uma variância intra-grupo mínima.

Na Figura 35 é ilustrado a grade hexagonal sobre as unidades de conservação de Altamira, representando o exemplo de dois casos de teste. A cor de cada hexágono indica a associação do seu gateway a um grupo, com o centróide destacado pelos números em negrito

correspondendo às EPCs. Foram simulados 10 focos de incêndio na área monitorada, identificados numericamente de 1 a 10. Essas simulações foram realizadas através de algoritmos de estimação de densidade do núcleo (KDE), um método estatístico não paramétrico comumente utilizado para estimar densidades de probabilidade. O KDE tem sido amplamente empregado na simulação de incêndios florestais em diferentes áreas geográficas. No canto superior esquerdo das duas imagens, destaca-se o enxame em estado estático, executando a coleta e transmissão de dados relacionados ao foco de incêndio 1.

Figura 35 – Casos de teste para ambas as implementações de agrupamento espacial.



(a) Agrupamento uniforme

(b) Agrupamento dinâmico

4.6.2 Autolocalização dos VANTs no espaço

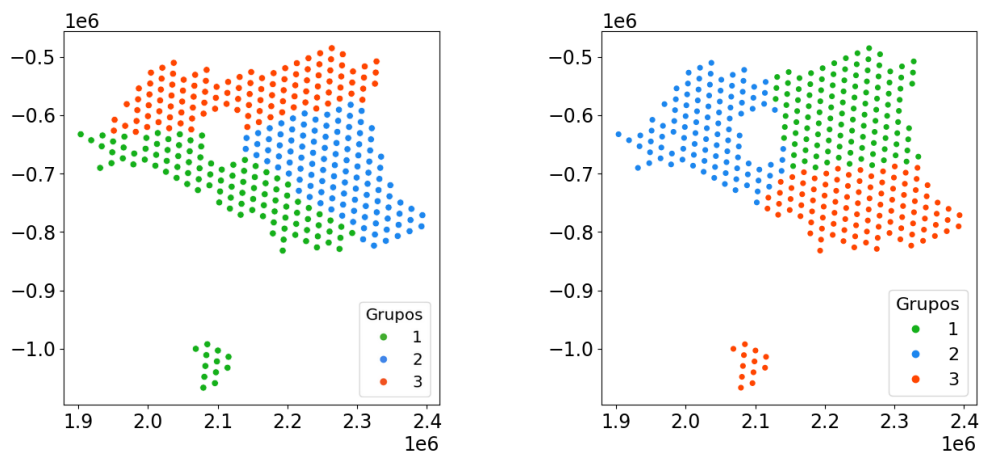
A autolocalização espacial dos VANTs é um processo que permite que um VANT determine sua posição geográfica em tempo real. Este processo é especialmente útil quando um VANT detecta fumaça, permitindo-lhe identificar não apenas sua própria localização, mas também a qual grupo de gateways está sobrevoando naquele momento.

O algoritmo kNN (*K-Nearest Neighbors*) é uma técnica simples de classificação que atribui uma classe a um novo ponto com base na classe mais comum entre seus k vizinhos mais próximos (Bholowalia; Kumar, 2014). Isso é útil quando queremos classificar algo com base

em características semelhantes de outros pontos já classificados. No contexto dos VANTs e sua localização em relação aos gateways, essa técnica pode ser aplicada de maneira eficaz.

Os gateways são agrupados com base em sua localização, e cada grupo é associado a um tipo específico de agrupamento, seja uniforme ou dinâmico, conforme ilustrado na Figura 36. Quando um VANT precisa determinar sua localização e também identificar o grupo de gateways que está sobrevoando, ele pode usar o modelo kNN previamente treinado. Durante o treinamento desse modelo, as posições geográficas dos gateways são utilizadas para definir as classes. Ou seja, cada grupo de gateways é uma classe no modelo kNN.

Figura 36 – Atribuição de gateways aos tipos de agrupamentos estabelecidos.



(a) Agrupamento uniforme

(b) Agrupamento dinâmico

Quando um VANT detecta fumaça, por exemplo, ele precisa rapidamente identificar sua localização e o grupo específico de gateways que está sobrevoando. Para fazer isso, ele consulta os dados do módulo GPS acoplado. Em seguida, o modelo kNN é usado para determinar a qual grupo de gateways essa posição pertence, com base nas posições geográficas dos gateways armazenadas durante o treinamento. Essa identificação do grupo é essencial para que o VANT possa se conectar à frequência específica atribuída ao conjunto de gateways correspondente.

Todo esse processo é representado pelo Algoritmo 4. Primeiramente, o algoritmo recebe um conjunto de amostras de treinamento, cada uma com uma posição geográfica e seu rótulo correspondente, que é o ID do grupo sobrevoado pelos VANTs. O algoritmo também recebe o número de vizinhos próximos (k) a serem considerados e a métrica de distância a ser usada. Em seguida, para cada amostra de treinamento, o algoritmo calcula a distância entre a posição do VANT (representada pela amostra de teste) e a amostra de treinamento. Com base

nessas distâncias, k vizinhos mais próximos do VANT são selecionados. Por fim, o algoritmo determina o rótulo majoritário entre esses k vizinhos e retorna o ID do grupo correspondente, que é então usado para a autolocalização do VANT.

Algoritmo 4: Processo de autolocalização de VANTs no espaço.

Entrada: $X =$ Conjunto de amostras de treinamento $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$,
 $k =$ Número de vizinhos próximos,
 $d(x, y) =$ Métrica de distância,
 $x =$ Amostra de teste (posição do VANT).

Saída: ID do grupo sobrevoado.

```

1 início
2   para cada amostra de treinamento  $(x_i, y_i) \in X$  faça
3     Calcule a distância entre  $x$  e  $x_i$ ;
4   fim
5   Seja  $N \subseteq X$  o conjunto de treinamento com as  $k$  menores distâncias  $d(x, x_i)$ ;
6   retorne o rótulo majoritário das amostras em  $N$ ;
7 fim

```

4.6.3 Definição das métricas de desempenho

Para avaliar a confiabilidade do sistema proposto, foi essencial integrar ao simulador uma funcionalidade de *benchmark*, permitindo a análise do desempenho da rede. Para alcançar tal objetivo, foi necessária a realização de uma série de simulações computacionais. Conforme mencionado anteriormente, essa funcionalidade considera a análise de duas métricas de desempenho: BER e SNR.

O simulador, por sua vez, determina a SNR entre o transmissor e o receptor através do cálculo do orçamento de link, conforme discutido na Seção 2.9. Por exemplo, para calcular o RSSI do sinal recebido pelos gateways, é utilizado a Equação 2.24 para calcular a perda de potência do sinal ao longo do caminho, e o resultado é subtraído da potência de transmissão do sinal. Com base nesse resultado, podemos calcular a SNR do sinal a partir da relação entre a potência do sinal e a potência do ruído, proporcionando uma medida da qualidade do sinal em relação ao ruído presente no ambiente.

A BER é uma métrica que, conforme indicado na Equação 4.2, representa a proporção de bits recebidos incorretamente em relação ao número total de bits transmitidos. Nesse contexto, estamos interessados em determinar a BER dos dados enviados pelos VANTs no momento da detecção de fumaça. Aqui, os dados são combinados nos gateways através de diversidade

espacial e enviados para a EPC. Se o aumento do número de antenas nos gateways resultar em um aumento na SNR e uma diminuição na BER na EPC, isso indica que a inclusão de antenas melhorou substancialmente a qualidade da comunicação entre o enlace LoRa entre VANTs e os gateways. Caso contrário, se não houver uma melhoria significativa na SNR e na BER mesmo com o aumento do número de antenas nos gateways, isso sugere que a adição de antenas pode não ter impacto positivo no enlace de comunicação entre VANTs e gateways.

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados recebidos}}{\text{Número total de bits transmitidos}}. \quad (4.2)$$

O total de bits transmitidos por um VANT varia conforme o coeficiente de espalhamento. O cálculo é realizado multiplicando-se 10^{20} pelo valor do coeficiente de espalhamento SF. A Tabela 2 mostra a quantidade de bits enviados por cada VANT ao identificar um foco de incêndio, cada um alocado com um SF distinto, de 7 a 11. O SF 12 foi reservado exclusivamente para EPCs e ERU, não sendo usado em VANTs. Isso é estratégico devido à grande distância entre eles, exigindo uma comunicação confiável. O total de símbolos enviados por cada VANT foi de 10^{20} , enquanto o total de pacotes enviados foi de 2×10^{19} . Cada pacote contém 5 símbolos com os seguintes dados: latitude, longitude, *timestamp*, direção do vento e intensidade de fumaça. A quantidade total de bits enviados pelo enxame em um único foco de incêndio é de $4,5 \times 10^{21}$.

Tabela 2 – Total de bits enviados por VANT.

Fator de espalhamento do VANT	Total de bits enviados
7	7×10^{20}
8	8×10^{20}
9	9×10^{20}
10	1×10^{21}
11	$1,1 \times 10^{21}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Parâmetros de simulação e configuração dos experimentos

A variedade de configurações descritas na Tabela 3 impacta diretamente nos resultados da simulação, refletindo a influência de diferentes parâmetros especificados para assegurar a fidelidade na representação das condições simuladas. Essas configurações definem um conjunto de análises para avaliar o desempenho do sistema diante de uma ampla gama de cenários e condições operacionais.

Tabela 3 – Descrição dos parâmetros de simulação para diferentes categorias.

Categorias	Parâmetros de simulação
Unidades de conservação	Área total: 109.538,46 km ² ; raio de cobertura das células: 10,76 km; configuração de grupos: 3, 8, 12; número de focos de incêndios: 10.
Enxame	Quantidade de VANTs: 5; distância entre VANTs (r): 500 m; ângulo de incidência dos sensores de CO ₂ : 45°; altura em relação ao solo: 500 m; potência de transmissão: 1 dBm; número de antenas omnidirecionais: 5 (uma por VANT); quantidade de símbolos enviados: 10 ²⁰ (cem quintilhões de símbolos por VANT).
Gateways	Quantidade de gateways: 336; distância entre gateways vizinhos: 18,63 km; altura em relação ao solo: ≤ 500 m; número de antenas omnidirecionais: 1, 2, 3; combinação de sinais por soma simples.
EPCs	Número de antenas omnidirecionais: uma.
Rede LoRa	Largura de banda: 125 kHz, faixa de frequência: 915 MHz a 928 MHz, potência de ruído térmico nos gateways e EPC: -120 dBm, fatores de espalhamento disponíveis: 7, 8, 9, 10, 11.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4 é apresentado uma síntese da abordagem experimental empregada. O método de agrupamento adotado refere-se à forma como os gateways foram organizados em grupos. Dois métodos foram considerados nos experimentos: agrupamento dinâmico e agrupamento uniforme. O número de focos de incêndio monitorados indica quantos focos estão sob vigilância durante os experimentos, sendo um fator crucial que influencia a carga de trabalho do sistema de monitoramento e a quantidade de dados a serem processados. A variedade de configurações de agrupamento refere-se à diversidade de configurações de grupos testadas, sendo exploradas três variedades: 3, 8 e 12 grupos. O número de antenas de recepção corresponde à quantidade de antenas instaladas em cada gateway. Nos experimentos, foram considerados três níveis distintos de antenas, variando de 1 a 3. Dessa forma, 180 experimentos foram conduzidos para explorar diversas combinações entre esses fatores, permitindo uma análise abrangente do desempenho do sistema em diferentes cenários e condições.

Tabela 4 – Configuração dos experimentos.

Métricas	Taxa de erro de bits (BER) e Relação sinal-ruído (SNR).
Configuração	Foram conduzidos 180 experimentos, explorando combinações entre os tipos de agrupamentos empregados, a quantidade de focos de incêndio monitorados, o número de grupos testados e o número de antenas existentes nos gateways.
Carga de trabalho	A cada foco de incêndio, enviam-se 10 ²⁰ de símbolos por VANT, totalizando 5×10^{20} símbolos transmitidos pelo enxame para cada ocorrência.
Resultados	BER total e variação de SNR nas EPCs.

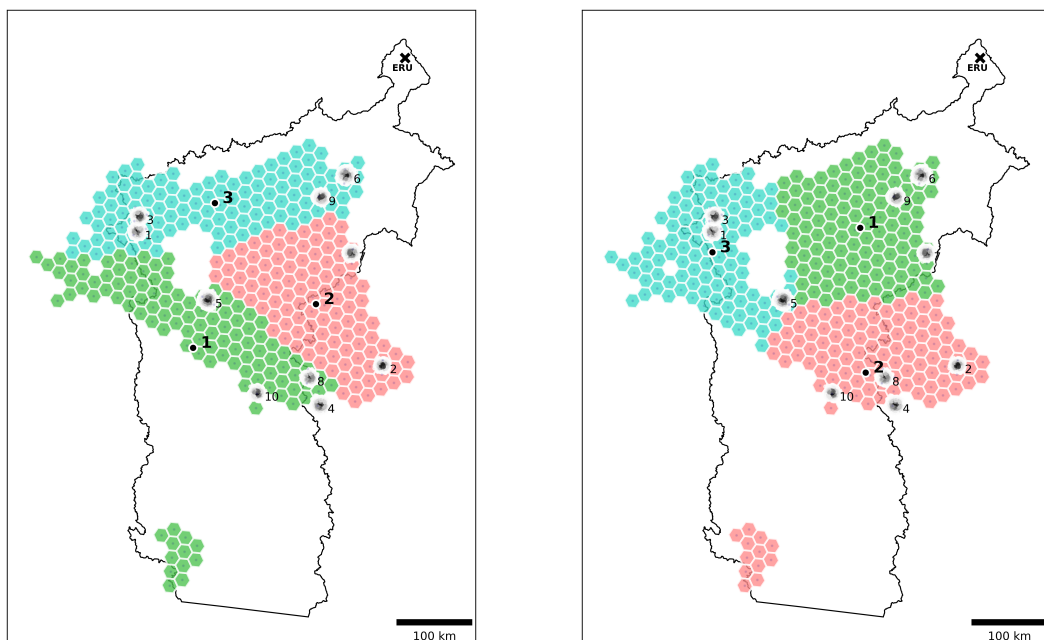
Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, estão os três cenários de configuração dos grupos estabelecidos para testes, acompanhados da distribuição de fumaça ao longo da região de monitoramento.

4.7.1 1ª configuração de teste: divisão da região em 3 grupos

Na Figura 37 é ilustrada a configuração inicial dos grupos estabelecidos para os testes. Nessa configuração, a região foi dividida em três grupos utilizando dois algoritmos de agrupamento espacial: um uniforme e outro não uniforme. No agrupamento uniforme, representado pela Figura 37a, a região foi dividida em três grupos, cada um contendo a mesma quantidade de células hexagonais. Por outro lado, no agrupamento dinâmico, representado pela Figura 37b, foi utilizada a técnica de agrupamento espacial k-médias, resultando em uma distribuição diferenciada de gateways em cada grupo.

Figura 37 – Visualização dos 3 grupos e da distribuição dos focos de incêndios.



(a) Agrupamento uniforme

(b) Agrupamento dinâmico

Fonte: Elaborado pelo autor.

No centro de cada célula hexagonal estão os gateways, enquanto no centro de cada agrupamento está localizada a EPC, marcada e numerada em negrito, e na extremidade do mapa, indicada por um X, está a ERU. Ao longo das áreas de monitoramento, foram distribuídos 10 focos de incêndio, numerados de acordo com a ordem de detecção realizada pelo enxame.

A Tabela 5 apresenta a quantidade de gateways para os 3 grupos no agrupamento dinâmico. No agrupamento uniforme, cada grupo possui um total de 112 gateways.

Tabela 5 – Relação da quantidade de gateways para agrupamento dinâmico com 3 grupos.

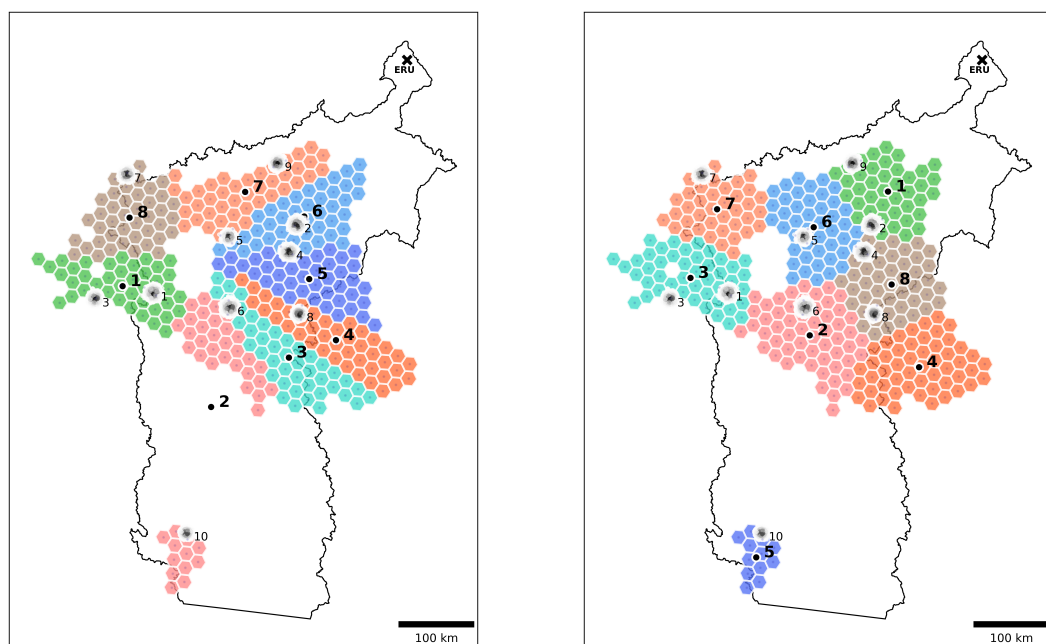
Identificador do grupo	Quantidade de gateways
1	117
2	115
3	104

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.2 2ª configuração de teste: divisão da região em 8 grupos

Na Figura 38 é ilustrado o caso de teste para a divisão da região em 8 grupos ao longo das unidades de conservação. Novamente, a região é dividida utilizando algoritmos de agrupamento uniforme e dinâmico. O agrupamento uniforme é representado na Figura 38a, enquanto o agrupamento dinâmico é mostrado na Figura 38b. A configuração dos incêndios neste cenário é diferente do caso anterior e estão enumerados sequencialmente.

Figura 38 – Visualização dos 8 grupos e da distribuição dos focos de incêndios.



(a) Agrupamento uniforme

(b) Agrupamento dinâmico

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6 apresenta a relação entre a quantidade de gateways para 8 grupos no agrupamento dinâmico. No agrupamento uniforme, cada grupo possui um total de 42 gateways.

Tabela 6 – Relação da quantidade de gateways para agrupamento dinâmico com 8 grupos.

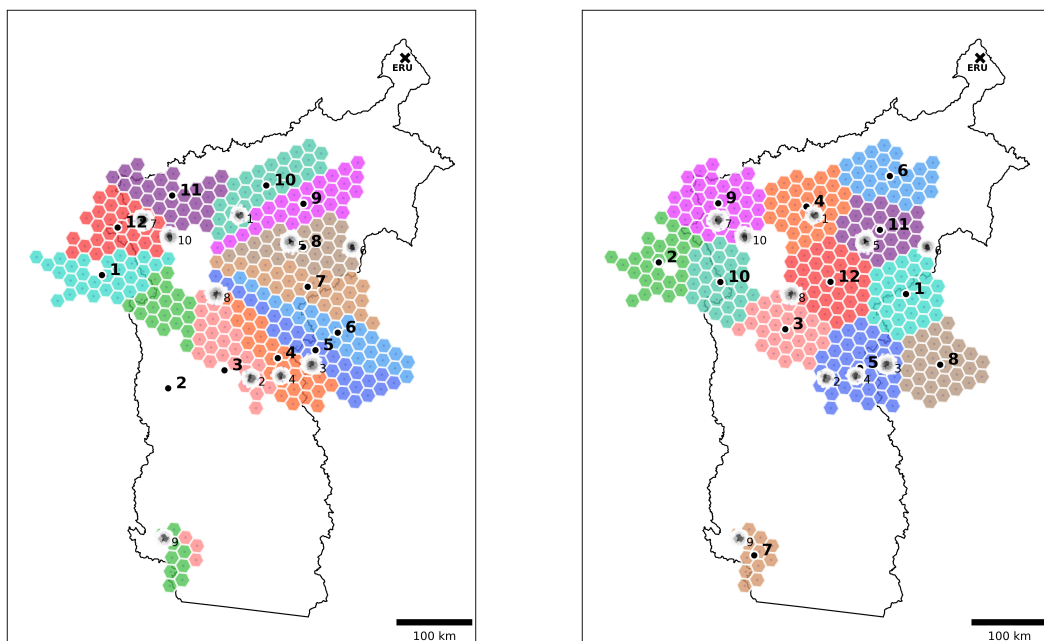
Identificador do grupo	Quantidade de gateways
1	41
2	56
3	47
4	52
5	12
6	44
7	39
8	45

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7.3 3ª configuração de teste: divisão da região em 12 grupos

A última configuração de teste envolve a divisão da região em 12 grupos, conforme mostrado na Figura 39. Na Figura 39a, os grupos são distribuídos ao longo da região através do agrupamento uniforme de células hexagonais. A Figura 39b ilustra o caso de teste realizado utilizando o algoritmo k-médias, o qual resultou em uma divisão não uniforme de grupos. A distribuição de incêndios ao longo das regiões de conservação de Altamira também é distinta das configurações dos casos de teste 1 e 2.

Figura 39 – Visualização dos 12 grupos e da distribuição dos focos de incêndios.



(a) Agrupamento uniforme

(b) Agrupamento dinâmico

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 exibe a relação entre a quantidade de gateways para 12 grupos no agrupamento dinâmico. No agrupamento uniforme, cada grupo possui um total de 28 gateways.

Tabela 7 – Relação da quantidade de gateways para agrupamento dinâmico com 12 grupos.

Identificador do grupo	Quantidade de gateways
1	30
2	26
3	28
4	30
5	36
6	26
7	12
8	30
9	34
10	27
11	25
12	32

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.8 Ambiente de desenvolvimento do simulador

Em estudos que envolvem processos de modelagem e simulação computacional, a escolha de um ambiente de desenvolvimento apropriado é de suma importância. Nesse contexto, decidimos empregar o *Google Colaboratory* (conhecido comumente como *Google Colab*) como nosso ambiente de desenvolvimento do simulador e de suas funcionalidades.

Além disso, a plataforma impõe CAPTCHAs (Testes Públicos de *Turing* Completamente Automatizados para Diferenciar Computadores de Humanos) de forma imprevisível, requerendo uma resposta rápida para verificar a identidade do usuário como humano. Se não forem respondidos imediatamente, o algoritmo interrompe a operação, resultando na perda completa dos resultados gerados. Por este motivo, decidiu-se realizar os testes no computador pessoal com as seguintes especificações:

1. **Processador:** Intel Core I7-11700 16MB 4,8GHz
2. **Memória:** 64 GB (2x32GB), 3200MHz, DDR4
3. **Placa de vídeo:** NVidia GeForce RTX 4070 Ti, 12GB

A realização completa dos testes, abrangendo todos os cenários estipulados, levou aproximadamente 13 dias.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são abordamos os resultados obtidos a partir de experimentos computacionais que simulam a transmissão de símbolos LoRa por um conjunto de cinco VANTs em cenários de identificação de 10 focos de incêndio florestal espalhados pelas unidades de conservação de Altamira. Nos experimentos, assumiu-se que todos os VANTs do conjunto detectaram a presença de fumaça. Os resultados abrangem tanto a BER quanto a variação da SNR nas EPCs, considerando diferentes números de antenas nos gateways. Os resultados apresentados nesta seção estão disponíveis no repositório do simulador.

5.1 Validação da curva de simulação com diferentes configurações de antenas de recepção

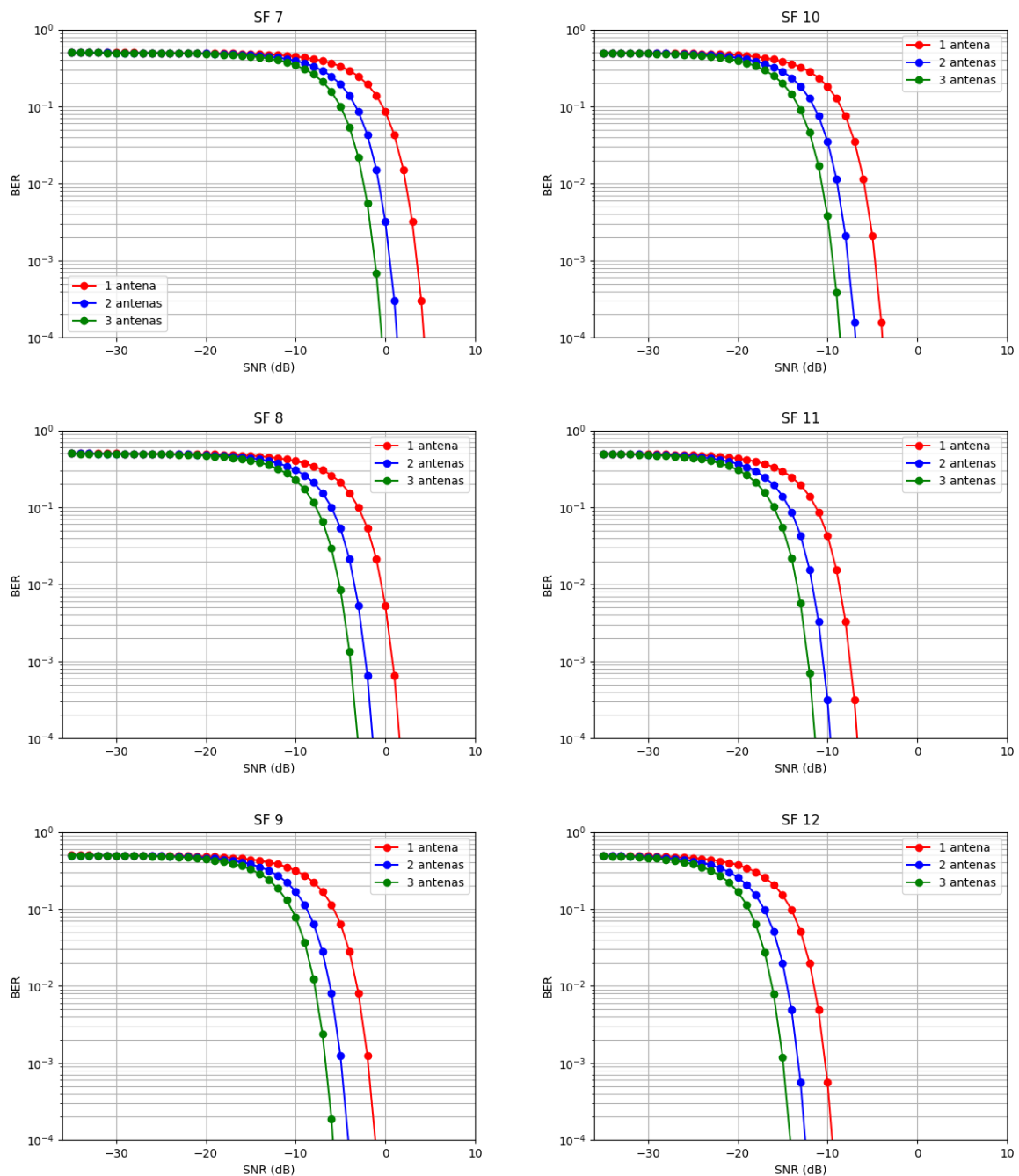
As curvas apresentadas na Figura 40 validam o desempenho do simulador conforme o estudo de Márquez *et al.* (2020). Cada gráfico mostra a relação entre a BER e a SNR para diferentes fatores de espalhamento (SF), com configurações de uma, duas e três antenas de recepção. O experimento em questão simula a transmissão de sinais entre um transmissor e um receptor LoRa, permitindo a avaliação do desempenho do sistema com a inclusão de um modelo de canal AWGN.

Primeiramente, ao observar o deslocamento das curvas em relação à variação do número de antenas, nota-se claramente que à medida que o número de antenas aumenta, as curvas de BER deslocam-se de forma consistente para a esquerda, indicando melhorias em lidar com SNRs baixas. Por exemplo, para um SF igual a 8 e uma BER de 10^{-2} , a SNR necessária é significativamente menor com 3 antenas (em torno de $-5,2$ dB) do que com 1 antena (em torno de $-0,5$ dB). Este padrão de deslocamento à esquerda independe do fator de espalhamento.

Os fatores de espalhamento também impactam as curvas de BER. À medida que o SF aumenta, as curvas de BER para cada configuração de antena tendem a se mover ligeiramente para a esquerda. Isso significa que, com valores mais altos de SF, o sistema é capaz de manter uma BER mais baixa para uma dada SNR. Esse comportamento já era esperado, pois um SF mais alto aumenta o tempo de símbolo, permitindo uma maior dispersão do sinal e, conseqüentemente, uma maior resistência ao ruído e interferências. Para SFs baixos, como 7 e 8, é necessária uma SNR mais alta para alcançar uma BER baixa. Em contrapartida, para SFs mais altos, como 11 e 12, o sistema pode operar eficientemente em SNRs mais baixas.

Comparando as diferentes configurações de antenas, para qualquer valor de SF, a

Figura 40 – Gráficos de BER vs SNR para LoRa com diferentes fatores de espalhamento e número de antenas receptoras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

curva de BER para três antenas é sempre melhor (mais à esquerda) do que para duas antenas, que por sua vez é melhor do que para uma antena. Isso corrobora a tese de que a diversidade espacial melhora significativamente a robustez do sistema contra o ruído e a interferência. Para SF 7, a diferença entre 1 e 3 antenas é muito mais pronunciada em SNRs mais baixas (por exemplo, em torno de -20 dB), onde a BER para 1 antena é muito maior do que para 3 antenas. Esse efeito se torna menos pronunciado à medida que o SF aumenta; no entanto, a vantagem de ter mais

antenas permanece evidente.

Os resultados dos gráficos mostraram que, para alcançar uma BER de 10^{-1} , com um fator de espalhamento SF 7, por exemplo, a SNR necessária para uma antena foi cerca de -5 dB, enquanto para duas antenas foi aproximadamente -2 dB, e para três antenas foi cerca de 0 dB. Essas diferenças na SNR correspondem a ganhos de 3 dB e 5 dB, alinhando-se com os ganhos teóricos de 3 dB para duas antenas e $4,7$ dB para três antenas. Portanto, os resultados experimentais confirmam que o ganho de um sistema com N antenas de recepção em relação a um sistema com uma única antena é aproximadamente igual a $10 \log_{10}(N)$ (Mohammadnia-Avval *et al.*, 2011; Sankar, 2012).

5.2 Variação da SNR em função da distância entre gateways e VANTs

Foi realizada uma simulação com o objetivo de analisar a SNR resultante da transmissão de um VANT do enxame operando entre duas células hexagonais adjacentes. Cada célula possui um gateway localizado em seu centro, denominados de gateway A e gateway B. O experimento visa entender a variação da SNR nos gateways à medida que o VANT se move conforme mostrado na Figura 41a.

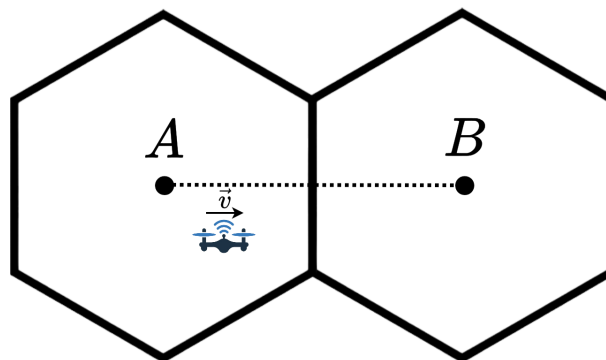
A Figura 41b apresenta a análise da SNR para um VANT enquanto percorre os $18,63$ quilômetros de distância entre os dois gateways. Observamos que, à medida que o VANT se distancia do gateway A, a SNR diminui devido ao aumento das perdas de percurso livre. Este decaimento na qualidade do sinal é claramente visto na curva de SNR que mostra valores altos próximos ao gateway A e uma redução progressiva conforme o VANT avança em direção ao gateway B.

Inversamente, a SNR em relação ao gateway B apresenta um aumento à medida que o VANT se aproxima. Esta melhoria é atribuída à redução da distância ao segundo gateway, diminuindo a perda de percurso livre e melhorando a qualidade do sinal recebido. Este padrão é observado na curva de SNR para o gateway B que começa com níveis mais baixos quando o VANT está mais próximo ao gateway A e aumenta à medida que se aproxima de B.

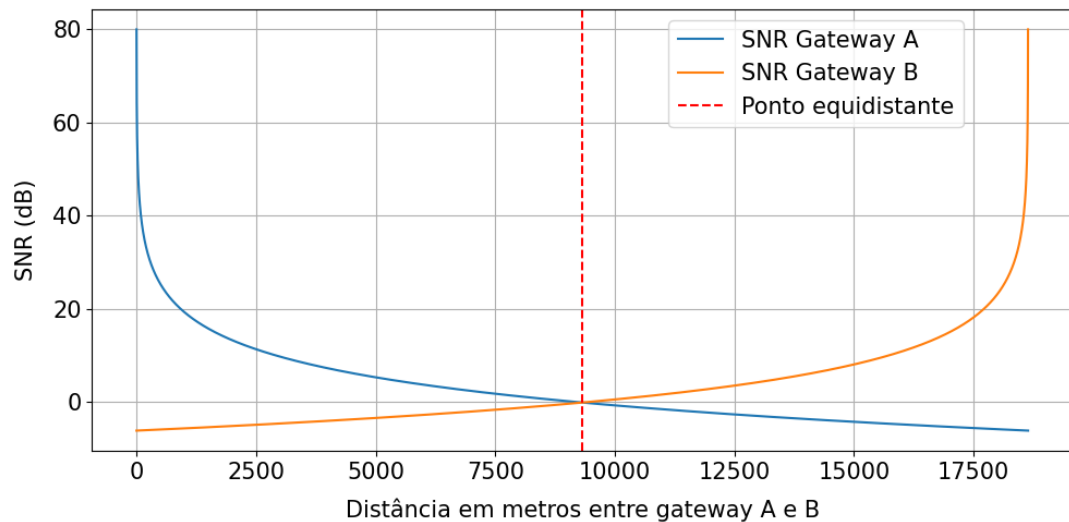
Um aspecto crítico desta análise é o ponto equidistante entre os gateways, onde o VANT está à mesma distância de ambos. Teoricamente, isso resulta em valores idênticos de SNR em ambos os lados, assumindo as mesmas condições de transmissão e ambiente. Este padrão de variação da SNR é consistente não apenas entre gateways A e B, mas também para qualquer par de gateways em células hexagonais adjacentes. Cada célula hexagonal, com seu próprio gateway

central, demonstra um comportamento similar de SNR à medida que o VANT se desloca de um gateway para outro.

Figura 41 – Variação da SNR em função da distância entre os gateways A e B. A curva azul representa a SNR no gateway A, enquanto a curva laranja representa a SNR no gateway B. A linha tracejada vermelha indica o ponto equidistante entre os dois gateways.



(a) Deslocamento de VANT entre os gateways A e B.



(b) Variação da SNR em função da distância entre os gateways A e B.

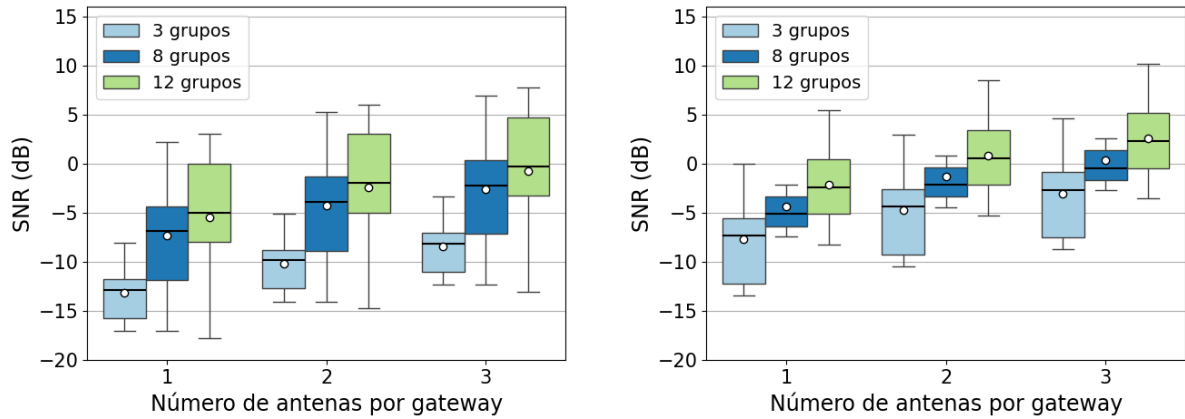
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Análise de variação na SNR

Os boxplots da Figura 42 se referem à SNR captada pelas EPCs para diferentes configurações de agrupamento, variando o número de grupos e quantidade de antenas nos gateways. Cada boxplot mostra a mediana (linha central), os quartis de 25% e 75%, o intervalo interquartil (caixa), os valores mínimos e máximos (linhas verticais) e médias (círculos brancos).

As medições revelaram que a SNR dos experimentos situou-se bem próximo do intervalo típico de -20 dB a 10 dB, alinhando-se com os valores comuns de SNR associados ao LoRa.

Figura 42 – Variações de SNR para diferentes configurações de agrupamento.



(a) Variação de SNR para agrupamento uniforme. (b) Variação de SNR para agrupamento dinâmico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1 Influência do número de antenas por gateway na SNR

A análise dos gráficos da Figura 42 evidencia uma melhoria significativa na SNR à medida que o número de antenas por gateway aumenta. Essa tendência é perceptível em todas as configurações de grupo e destaca o papel da diversidade de antenas na qualidade da comunicação. A adição de antenas contribui para um aumento na diversidade de recepção, resultando em uma melhoria significativa na detecção.

Para quantificar essa influência, foi observado que duas antenas nos gateways resultam em uma melhoria na qualidade do sinal de aproximadamente 3 dB em relação à configuração com apenas uma antena por gateway. Ainda mais notável é o aumento na qualidade do sinal ao se adotar três antenas por gateway, que promove um aumento de cerca de 4,7 dB comparado à configuração com uma única antena.

5.3.2 Impacto do número de grupos na SNR

Analisando a variação da SNR em diferentes esquemas de agrupamento, podem ser extraídas diversas conclusões que ampliam a compreensão sobre a influência desses parâmetros na qualidade do sinal recebido. Primeiramente, ao serem examinados os resultados do agrupamento uniforme, conforme mostrado na Figura 42a, identificamos uma tendência consistente de

melhoria na SNR à medida que aumentamos o número de antenas nos gateways e a quantidade de grupos. Isso sugere que configurações com mais antenas e grupos têm uma capacidade aprimorada de receber sinais de maneira precisa e confiável.

Por exemplo, ao serem comparadas configurações com uma única antena e diferentes números de grupos, observamos uma melhoria na SNR à medida que mais grupos são introduzidos. Da mesma forma, ao manter fixo o número de grupos e aumentar o número de antenas, notou-se uma melhoria geral na SNR. Isso indica que tanto o aumento de grupos quanto o aumento do número de antenas desempenharam papéis fundamentais na melhoria da SNR.

Adicionalmente, ao serem comparadas configurações com o mesmo número de grupos, mas diferentes números de antenas, percebe-se que um maior número de antenas nos gateways resulta em uma SNR mais elevada. Isso ressalta a importância da diversidade espacial na otimização da qualidade do sinal recebido.

Entretanto, ao serem analisadas as configurações de agrupamento dinâmico, observam-se padrões ligeiramente diferentes. Novamente, há uma melhoria na SNR à medida que o número de antenas e grupos aumenta, sendo essa melhoria ainda mais significativa do que no agrupamento uniforme.

Por exemplo, ao serem comparadas configurações com uma antena e o mesmo número de grupos nos dois métodos de agrupamento, percebe-se que o agrupamento dinâmico tende a proporcionar uma SNR ligeiramente superior. A média de ganho para uma antena com agrupamento dinâmico é de $-7,72$ dB, enquanto que para uma antena com agrupamento uniforme temos uma média de $-13,15$ dB. Isso sugere que o agrupamento dinâmico em relação às condições em tempo real pode levar a uma melhor utilização dos recursos disponíveis e, conseqüentemente, a uma melhoria na qualidade do sinal recebido.

5.3.3 Comparação entre estratégias de agrupamento dinâmico e uniforme

Ao avaliar as estratégias de agrupamento dinâmica versus uniforme, percebe-se uma ligeira vantagem na abordagem dinâmica, que parece adaptar-se melhor às condições variáveis do canal e às necessidades específicas de cada grupo. Esta estratégia, ao ajustar dinamicamente a alocação de recursos, melhora a SNR de forma mais eficiente, resultando em uma qualidade de sinal superior, especialmente perceptível em sistemas com maior número de antenas e grupos. O agrupamento dinâmico proporcionou, portanto, um maior potencial para melhoria da comunicação em ambientes severos.

5.3.4 *Implicações práticas*

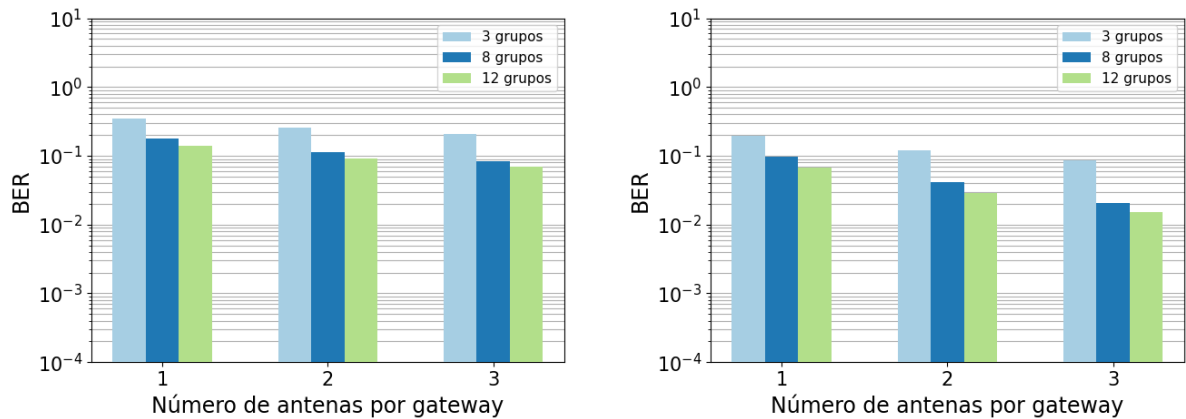
As melhorias na SNR têm implicações diretas na qualidade e confiabilidade das comunicações. Em cenários práticos, como operações de VANTs em missões críticas, uma alta SNR é fundamental para favorecer a integridade dos dados transmitidos. A capacidade de manter uma SNR elevada em diversos cenários operacionais é fundamental para mitigar perdas de dados, diminuir erros de comunicação e garantir o sucesso operacional. A estratégia de aumentar o número de antenas e grupos, juntamente com a implementação de uma alocação dinâmica, emerge como uma prática recomendável para aprimorar sistemas de comunicação em aplicações que demandam alta confiabilidade e eficácia.

5.4 **Análise da BER**

Na Figura 43 é apresentado dois gráficos de barras que ilustram a BER total registrada nas EPCs para os 10 focos de incêndio em cada caso. No caso do agrupamento uniforme, conforme representado na Figura 43a, onde temos 3 grupos e uma antena, a taxa de erro de bit total é de 34,67%. Quando aumentamos para duas antenas, a taxa de erro de bit total diminui para 18,1%, indicando uma melhoria na qualidade da transmissão. E com três antenas, a taxa de erro de bit total é ainda menor, atingindo 14,13%. No caso de 8 grupos, a taxa de erro de bit total com apenas uma antena é de 26,02%. Isso indica que, mesmo com mais grupos, a presença de apenas uma antena resulta em uma transmissão com uma quantidade relativamente alta de erros de bits. No entanto, ao adicionar duas antenas, a taxa de erro de bit total diminui para 11,39%, e com três antenas, a taxa de erro de bit total é ainda menor, alcançando 9,18%. Finalmente, no cenário de 12 grupos, a taxa de erro de bit total com uma única antena é de 20,81%. Com duas antenas, essa taxa diminui para 8,27%, e com três antenas, alcança-se a taxa de erro de bit de 6,96%.

No caso do agrupamento dinâmico, conforme representado na Figura 43b, no caso de 3 grupos e uma antena, observa-se que a taxa de erro de bit total com uma única antena é de 19,59%. No entanto, ao adicionar mais antenas, a taxa de erro de bit total diminui consideravelmente. Com duas antenas, a taxa cai para 9,68%, e com três antenas, é ainda menor, atingindo 6,74%. Ao considerarmos o cenário com 8 grupos, a tendência se mantém consistente. Com apenas uma antena, a taxa de erro de bit total é de 12,18%, o que já representa uma melhoria significativa em relação ao cenário anterior de 3 grupos. No entanto, ao aumentarmos o número

Figura 43 – Resultados de BER nas EPCs.



(a) BER total para agrupamento uniforme.

(b) BER total para agrupamento dinâmico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

de antenas para 2 e 3, observamos uma queda ainda mais acentuada na taxa de erro de bit total, alcançando valores de 4,09% e 2,85%, respectivamente. Por fim, no caso de 12 grupos, vemos uma tendência semelhante. Com uma única antena, a taxa de erro de bit total é de 8,67%, indicando uma melhoria significativa em relação aos cenários anteriores com menos grupos. Com duas antenas, essa taxa diminui para 2,03%, e com três antenas, alcançamos a menor taxa de erro de bit total neste cenário, com 1,51%.

5.4.1 Influência do número de antenas por gateway

Para o agrupamento uniforme, observamos que a BER diminui consistentemente à medida que o número de antenas por gateway aumenta. No agrupamento dinâmico, a redução da BER com o aumento do número de antenas por gateway também é evidente, embora com uma diferença ligeiramente menor em comparação ao agrupamento uniforme. Apesar de as reduções serem similares, o agrupamento dinâmico apresenta uma leve vantagem em termos de redução da BER para o mesmo número de antenas por gateway. A presença de múltiplas antenas viabiliza a diversidade, diminuindo a probabilidade de erros devido a interferências, que são bastante comuns e severas em comunicações sem fio.

5.4.2 Variação entre configurações de grupos

Os dados mostram uma tendência interessante relacionada ao número de grupos. Nota-se que a configuração com 12 grupos exibe consistentemente uma menor BER em comparação com os grupos menores de 3 e 8, em todas as quantidades de antenas por gateway

independente do tipo de agrupamento utilizado. No agrupamento dinâmico, por exemplo, enquanto a BER em gateways com três antenas e 12 grupos aproxima-se de 10^{-2} , a mesma configuração com apenas 3 grupos apresenta valores mais altos, perto de 10^{-1} . Este padrão sugere que uma segmentação em um maior número de grupos pode ser benéfica.

5.4.3 Comparação entre as estratégias de alocação dinâmica e uniforme

A comparação das estratégias de alocação dinâmica e uniforme revela vantagens significativas para a abordagem dinâmica, especialmente quando mais antenas estão envolvidas. Por exemplo, em configurações de três antenas, a alocação dinâmica mostra uma melhoria clara na BER, atingindo níveis abaixo de 4% mesmo em configurações de 8 grupos, enquanto a alocação uniforme tende a apresentar valores ligeiramente superiores nesse mesmo cenário.

5.4.4 Implicações Práticas

As implicações práticas dessas descobertas são profundas para o planejamento e operação de redes de comunicação que utilizam VANTs, especialmente em cenários que exigem alta confiabilidade e eficiência. Aumentar o número de antenas por gateway, optar por uma segmentação em um maior número de grupos e implementar uma estratégia de alocação dinâmica são medidas que podem contribuir substancialmente para a redução da BER. Estas estratégias são particularmente valiosas em ambientes severos e dinâmicos, onde a comunicação sem falhas é uma questão crucial. Por exemplo, em aplicações de monitoramento ambiental ou operações de resposta a emergências, em que os VANTs desempenham papéis críticos, garantir uma comunicação robusta pode significar a diferença entre o sucesso e o fracasso da missão.

5.5 Impacto dos fatores de espalhamento na BER total do sistema

Outro ponto relevante a ser considerado é a contribuição individual dos fatores de espalhamento na BER para cada situação. Assim, a Tabela 8 apresenta o número total de bits enviados em cada SF para cada combinação de número de antenas por gateway e grupo da Figura 43. O total de bits enviados para a coleta de 10 focos de incêndio foi de $4,5 \times 10^{22}$.

Na Figura 44 é ilustrado um mapa de calor que representa diferentes configurações de agrupamento uniforme. Neste mapa, as BERs são indicadas nas EPCs, levando em conta os fatores de espalhamento e o número de antenas presentes nos gateways. Tons mais escuros

Tabela 8 – Quantidade de bits enviados por SF.

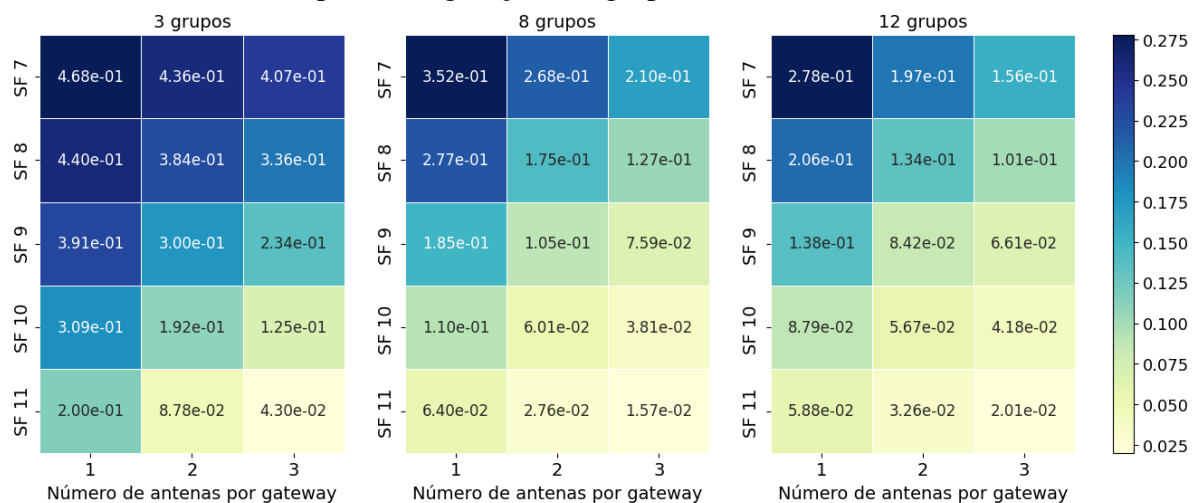
Coefficiente de espalhamento	Total de bits enviados
7	7×10^{21}
8	8×10^{21}
9	9×10^{21}
10	1×10^{22}
11	$1,1 \times 10^{22}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

indicam uma BER mais alta, sugerindo uma maior taxa de bits recebidos incorretamente, enquanto tons mais claros indicam uma BER menor, denotando uma menor taxa de bits recebidos incorretamente. Esses valores na prática representam a porcentagem de bits errados para cada VANT de acordo com o SF atribuído e o total de bits enviados.

Ao analisar este mapa de calor, nota-se que o SF de 7 está fortemente correlacionado com uma BER mais alta, enquanto um SF de 11 está associado a uma BER mais baixa. A configuração que resultou na maior BER foi encontrada em 3 grupos, com um SF de 7 e uma antena por gateway, resultando em uma BER de aproximadamente 46,8%, o que é muito elevada. Por outro lado, a menor BER, cerca de 1,57%, foi observada na configuração com 8 grupos, utilizando um SF de 11 e 3 antenas por gateway. Independentemente do número de grupos formados, para cada SF, a BER diminuiu à medida que mais antenas foram adicionadas nos gateways.

Figura 44 – Mapa de calor representando a BER para cada SF durante a coleta dos 10 focos de incêndio para configuração de agrupamento uniforme.

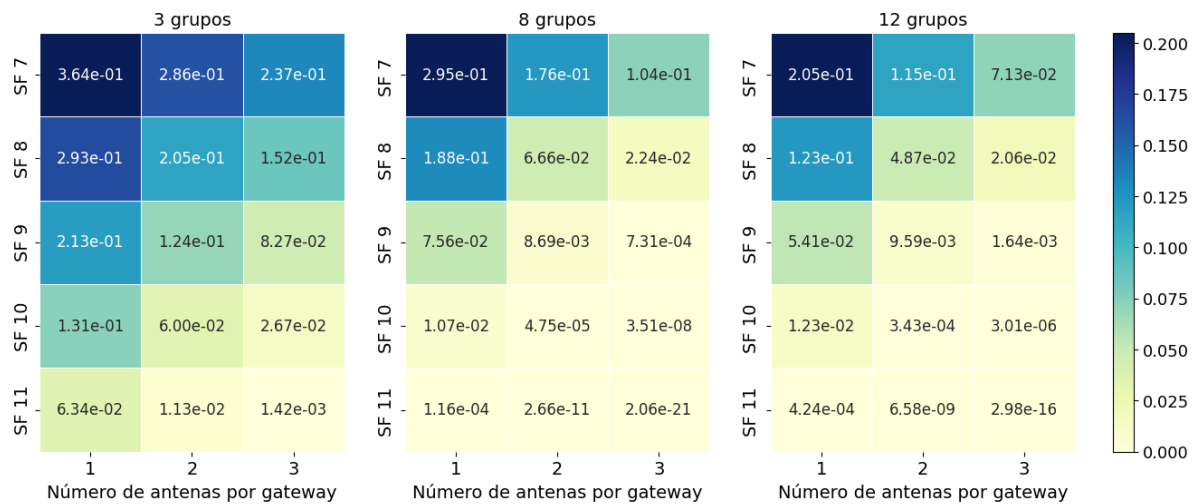


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 45 segue o mesmo raciocínio da Figura 44, porém aplicado ao agrupamento dinâmico. No caso do agrupamento dinâmico, a BER mais alta foi de aproximadamente 36,4%,

registrada quando foram utilizados 3 grupos com SF 7 e uma antena por gateway. Por outro lado, uma BER na ordem de 10^{-21} foi observada ao utilizar 8 grupos com SF 11 e três antenas por gateway. Esse nível de BER aponta uma transmissão de dados extremamente confiável, onde os erros são praticamente inexistentes.

Figura 45 – Mapa de calor representando a BER para cada SF durante a coleta dos 10 focos de incêndio para configuração de agrupamento dinâmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nas simulações refletem a teoria subjacente ao espalhamento espectral utilizado pelo LoRa. Em ambos os mapas de calor, é possível observar como a BER varia com o aumento do número de antenas por gateway e com diferentes fatores de espalhamento. Este comportamento é refletido nos resultados das simulações, onde fatores de espalhamento maiores (SF 10 e SF 11) apresentaram uma BER significativamente menor. Além disso, o aumento no número de antenas por gateway e no número de grupos contribuiu para uma recepção e processamento dos sinais melhorados, confirmando a teoria de que uma maior diversidade espacial e uma melhor distribuição dos grupos reduzem a BER e otimizam a SNR.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, investigamos a eficácia da tecnologia LoRa na detecção e notificação de incêndios florestais em áreas remotas. O foco principal residiu em desenvolver uma topologia de detecção de incêndios que melhorasse a taxa de sucesso na entrega de pacotes LoRa, utilizando veículos aéreos não tripulados (VANTs) como múltiplos transmissores e implementando uma arquitetura de rede que incorpora a diversidade espacial de recepção. Com base em extensas campanhas de simulação computacional, pudemos avaliar o desempenho do sistema proposto. A pesquisa também examinou a viabilidade de agrupamentos espaciais de gateways em ambientes geográficos diversos. Neste capítulo, agrupamos as principais descobertas e conclusões obtidas ao longo de toda essa jornada de investigação.

6.1 Considerações finais

No início deste estudo, foram definidos alguns objetivos específicos. Primeiramente, propusemos a utilização de VANTs como múltiplos transmissores para detecção de fumaça proveniente de incêndios florestais. Para isso, adotamos não apenas um VANT, mas uma associação de 5 VANTs em grupo, que denominamos enxame. Dessa forma, o primeiro objetivo específico foi alcançado com sucesso. A implementação de um único enxame de VANTs mostrou-se eficaz na detecção de fumaça, permitindo uma cobertura ampla e flexível, essencial para a detecção rápida e confiável de focos de incêndio.

Outro objetivo específico foi proposição de uma arquitetura de rede que incorpore a diversidade espacial de recepção para mitigar os efeitos do desvanecimento e melhorar a confiabilidade da comunicação. Este objetivo específico também foi atingido, pois a arquitetura proposta resultou em uma melhoria significativa na relação sinal-ruído (SNR) e na redução da taxa de erro de bit (BER). A configuração com maior número de antenas e a implementação de agrupamentos dinâmicos de gateways mostraram-se especialmente eficazes.

Investigamos ainda o uso de agrupamentos espaciais de gateways em ambientes com grande dimensão espacial como forma de aprimorar a recepção de alertas de incêndios. A investigação confirmou que tanto o agrupamento uniforme quanto o dinâmico são eficazes para melhorar a SNR e a BER. No entanto, o agrupamento dinâmico em particular, apresentou vantagens adicionais ao se adaptar às condições do ambiente.

Os resultados das simulações confirmaram a eficácia das estratégias implementadas,

evidenciando melhorias significativas na comunicação e na detecção de incêndios florestais. Além disso, a redução da perda de pacotes e o aumento da qualidade dos sinais recebidos culminaram na concretização do objetivo geral: propor uma topologia de detecção de incêndios florestais a fim de melhorar a taxa de sucesso na entrega de pacotes LoRa. As inovações propostas, incluindo o uso de VANTs, a arquitetura de rede com diversidade espacial, e os agrupamentos de gateways, demonstraram ser soluções viáveis e efetivas, confirmando a validade e a relevância das abordagens adotadas para a melhoria da detecção e comunicação de alertas de incêndio.

As questões de pesquisa definidas no escopo do trabalho foram respondidas da seguinte maneira:

(i) **Como podemos integrar de forma eficaz a tecnologia LoRa para garantir uma detecção rápida e confiável de incêndios florestais em reservas ambientais dispersas?**

A integração eficaz foi alcançada através da implementação de um enxame de VANTs como múltiplos transmissores, combinados com uma arquitetura de rede que utiliza a diversidade espacial de recepção e agrupamentos de gateways. Essa configuração permitiu uma detecção rápida e confiável de incêndios, abrangendo grandes áreas de forma eficiente.

(ii) **Como essa integração pode melhorar significativamente a resposta emergencial e a preservação dos ecossistemas em áreas vulneráveis?**

A integração das tecnologias mencionadas resultou em uma comunicação mais confiável, reduzindo a perda de pacotes e melhorando a qualidade dos sinais recebidos. Isso proporcionou uma maior confiabilidade no sistema de alertas, permitindo uma resposta emergencial mais rápida e eficaz, contribuindo assim para a preservação dos ecossistemas em áreas vulneráveis.

O avanço desses estudos e a conquista de novas melhorias e benefícios não devem se encerrar aqui. Há ainda muito a ser explorado em trabalhos futuros. Cabe lembrar que o código-fonte está disponibilizado publicamente, conforme apresentado na Seção 4.6. Dessa forma, a reprodutibilidade dos resultados é facilitada, assim como a participação colaborativa de outros pesquisadores. A seguir, apontamos algumas possibilidades de trabalhos futuros.

6.2 Trabalhos futuros

Em perspectiva para futuras pesquisas, propõe-se a avaliação da eficácia de diversas técnicas de agrupamento espacial, comparando seus resultados com aqueles obtidos pelo agrupamento uniforme e dinâmico. Essa análise proporcionará uma compreensão mais abrangente das

alternativas disponíveis. Ademais, planeja-se investigar a integração de múltiplos enxames no contexto de monitoramento, com o intuito de aprofundar a compreensão das dinâmicas coletivas entre essas unidades autônomas. Essas investigações detêm o potencial de aprimorar ainda mais a eficiência e adaptabilidade do sistema, ampliando as oportunidades de melhoria na recepção de pacotes LoRa.

Outras áreas que merecem atenção em pesquisas futuras incluem a análise do impacto de diferentes condições ambientais nas performances de SNR e BER. A variação em fatores como densidade da vegetação e topografia pode influenciar significativamente os resultados, e uma compreensão mais detalhada desses impactos pode levar a melhorias adicionais no sistema.

Alternativamente, sugere-se a exploração mais aprofundada da viabilidade dos algoritmos de varredura no contexto do enxame de VANTs, visando um refinamento contínuo na identificação das fumaças originadas pelos incêndios florestais. A realização de testes que englobem uma maior diversidade de enxames de VANTs, combinada à experimentação com um aumento substancial no número de VANTs por enxame, emerge como um caminho instigante a ser trilhado.

Finalmente, é importante trazer à luz questões de escalabilidade e viabilidade econômica das soluções propostas. A implementação em larga escala de sistemas baseados em VANTs e LoRa deve ser avaliada sob a perspectiva de custos e benefícios, garantindo que as soluções sejam práticas e sustentáveis em longo prazo. Dessa forma, as possibilidades futuras delineadas nesta pesquisa prometem não apenas aprimorar a eficiência dos sistemas existentes, mas também pavimentar o caminho para inovações que moldarão positivamente o futuro da detecção e combate a incêndios florestais.

REFERÊNCIAS

- ABEELE, F. Van den; HAXHIBEQIRI, J.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. Scalability analysis of large-scale lorawan networks in ns-3. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 4, n. 6, p. 2186–2198, 2017.
- ALABLANI, I.; ALENAZI, M. Edtd-sc: An iot sensor deployment strategy for smart cities. **sensors**, MDPI, v. 20, n. 24, p. 7191, 2020.
- AMELOOT, T.; TORRE, P. V.; ROGIER, H. Lora base-station-to-body communication with simo front-to-back diversity. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, IEEE, v. 69, n. 1, p. 397–405, 2020.
- ANDRADE, B. O.; BONILHA, C. L.; OVERBECK, G. E.; VÉLEZ-MARTIN, E.; ROLIM, R. G.; BORDIGNON, S. A. L.; SCHNEIDER, A. A.; ELY, C. V.; LUCAS, D. B.; GARCIA, E. N. *et al.* Classification of south brazilian grasslands: Implications for conservation. **Applied Vegetation Science**, Wiley Online Library, v. 22, n. 1, p. 168–184, 2019.
- ANGRISANI, L.; AMODIO, A.; ARPAIA, P.; ASCIOLLA, M.; BELLIZZI, A.; BONAVOLONTÀ, F.; CARBONE, R.; CAPUTO, E.; KARAMANOLIS, G.; MARTIRE, V. *et al.* An innovative air quality monitoring system based on drone and iot enabling technologies. In: **IEEE. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)**. [S. l.], 2019. p. 207–211.
- ARCHANA, K.; NAVEEN, B.; SRILATHA, K. Ber analysis of alamouti and silver space time block coded 2x2 mimo systems using rayleigh and dent channel models. **Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)**, v. 11, n. 3, p. 1571–1578, 2020.
- AUGHEY, R. J. Applications of gps technologies to field sports. **International journal of sports physiology and performance**, Human Kinetics, Inc., v. 6, n. 3, p. 295–310, 2011.
- BACHA, C. J. C. As unidades de conservação do brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Editora Cubo, v. 30, n. 4, p. 339–358, 2020.
- BAGUR, J. **GPS NMEA 0183 Messaging Protocol 101**. 2023. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/gps-nmea-data-101/>. Acesso em: 04 abr. 2023.
- BALÉE, W.; OLIVEIRA, V. Honorato de; SANTOS, R. dos; AMARAL, M.; ROCHA, B.; GUERRERO, N.; SCHWARTZMAN, S.; TORRES, M.; PEZZUTI, J. Ancient transformation, current conservation: Traditional forest management on the iriri river, brazilian amazonia. **Human Ecology**, Springer, v. 48, p. 1–15, 2020.
- BARMPOUTIS, P.; PAPAIOANNOU, P.; DIMITROPOULOS, K.; GRAMMALIDIS, N. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 22, p. 6442, 2020.
- BELLONI, F. Fading models. **Postgraduate Course in Radio Communications**, p. 1–4, 2004.
- BENCHERIF, H.; BÈGUE, N.; PINHEIRO, D. K.; PREEZ, D. J. D.; CADET, J.; LOPES, F. J. d. S.; SHIKWAMBANA, L.; LANDULFO, E.; VESCOVINI, T.; LABUSCHAGNE, C. *et al.* Investigating the long-range transport of aerosol plumes following the amazon fires (august 2019). **Remote Sensing**.

BHOLOWALIA, P.; KUMAR, A. Ebk-means: A clustering technique based on elbow method and k-means in wsn. **International Journal of Computer Applications**, Citeseer, v. 105, n. 9, 2014.

BILEN, T.; AYDEMIR, P. J.; KONU, A. E.; CANBERK, B. Customized k-means based topology clustering for aeronautical ad-hoc networks. In: IEEE. **2021 IEEE 26th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)**. [S. l.], 2021. p. 1–5.

BRAGA JUNIOR, Euclides de Oliveira. **Identificação de áreas com desmatamento seletivo em imagens multissensores: estudo de caso: sudoeste de Altamira-PA**. 2018. 16 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento Ambiental) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

BUSHNAQ, O. M.; CHAABAN, A.; AL-NAFFOURI, T. Y. The role of uav-iot networks in future wildfire detection. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 8, n. 23, p. 16984–16999, 2021.

CARVALHO, T. S.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Desmatamento e a contribuição econômica da floresta na amazônia. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, SciELO Brasil, v. 46, p. 499–531, 2016.

CLERCKX, B.; OESTGES, C. **MIMO wireless networks: channels, techniques and standards for multi-antenna, multi-user and multi-cell systems**. [S. l.]: Academic Press, 2013.

DU, L. Research on wireless channel simulation. **Journal of Chuxiong Normal University**, v. 35, n. 6, p. 38, 2020.

DUDA, A.; HEUSSE, M. Spatial issues in modeling lorawan capacity. In: **Proceedings of the 22Nd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 191–198.

ELSABAA, A.; GUÉNIAT, F.; WU, W.; WARD, M. Enhanced data-driven lora lp-wan channel model in birmingham. In: IEEE. **2022 IEEE World AI IoT Congress (AIIoT)**. [S. l.], 2022. p. 766–772.

FABER, M. J.; ZWAAG, K. M. van der; SANTOS, W. G. V. dos; ROCHA, H. R. d. O.; SEGATTO, M. E.; SILVA, J. A. A theoretical and experimental evaluation on the performance of lora technology. **IEEE Sensors Journal**, IEEE, v. 20, n. 16, p. 9480–9489, 2020.

FARHAD, A.; KIM, D.-H.; PYUN, J.-Y. Resource allocation to massive internet of things in lorawans. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 9, p. 2645, 2020.

FOSCHINI, G. J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. **Bell labs technical journal**, Nokia Bell Labs, v. 1, n. 2, p. 41–59, 1996.

FOSCHINI, G. J.; GOLDEN, G. D.; VALENZUELA, R. A.; WOLNIANSKY, P. W. Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays. **IEEE Journal on Selected areas in communications**, IEEE, v. 17, n. 11, p. 1841–1852, 1999.

GARG, V. **Wireless communications & networking**. [S. l.]: Elsevier, 2010.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. [S. l.]: Cambridge university press, 2005.

GOPAL, S. R.; PRABHAKAR, V. A hybrid approach to enhance scalability, reliability and computational speed in lora networks. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, Science and Information (SAI) Organization Limited, v. 11, n. 9, 2020.

GOURSAUD, C.; GORCE, J.-M. Dedicated networks for iot: Phy/mac state of the art and challenges. **EAI endorsed transactions on Internet of Things**, 2015.

HAXHIBEQIRI, J.; POORTER, E. D.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. A survey of lorawan for iot: From technology to application. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018.

HOELLER, A.; SOUZA, R. D.; LÓPEZ, O. L. A.; ALVES, H.; NETO, M. de N.; BRANTE, G. Analysis and performance optimization of lora networks with time and antenna diversity. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 32820–32829, 2018.

HUANG, R.; HU, Y.; RUSSELL, A. G.; MULHOLLAND, J. A.; ODMAN, M. T. The impacts of prescribed fire on pm2. 5 air quality and human health: Application to asthma-related emergency room visits in georgia, usa. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, MDPI, v. 16, n. 13, p. 2312, 2019.

JERONYMO, C. A. L.; SILVA, E. R. da; FONSECA, K. T. Boa governança e participação social: Uma revisão do caso das unidades de conservação da natureza do brasil. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 50, p. 107–135, 2021.

KAHN, R. A.; LIU, Y.; DINER, D. J. Space-based passive aerosol remote sensing from the multi-angle imaging spectroradiometer (misr) aboard nasa's terra satellite. In: **Handbook of Air Quality and Climate Change**. [S. l.]: Springer, 2022. p. 1–14.

KAR, A.; CHANDRA, M. An optimized structure filtered-x least mean square algorithm for acoustic noise suppression in wireless networks. **Recent Development in Wireless Sensor and Ad-hoc Networks**, Springer, p. 191–206, 2015.

KIM, S.; LEE, H.; JEON, S. An adaptive spreading factor selection scheme for a single channel lora modem. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 4, p. 1008, 2020.

LANGLEY, R. B. Nmea 0183: A gps receiver interface standard. **GPS world**, v. 6, n. 7, p. 54–57, 1995.

LI, K.; LIN, B.; MA, J. Bit-error rate investigation of satellite-to-ground downlink optical communication employing spatial diversity and modulation techniques. **Optics Communications**, Elsevier, v. 442, p. 123–131, 2019.

LIANDO, J. C.; GAMAGE, A.; TENGOURTIUS, A. W.; LI, M. Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study. **ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)**, ACM New York, NY, USA, v. 15, n. 2, p. 1–35, 2019.

LIU, B. H.; OTIS, B. P.; CHALLA, S.; AXON, P.; CHOU, C.; JHA, S. The impact of fading and shadowing on the network performance of wireless sensor networks. **International Journal of Sensor Networks**, Inderscience Publishers, v. 3, n. 4, p. 211–223, 2008.

LIU, H.-H.; CHANG, R. Y.; CHEN, Y.-Y.; FU, I.-K. Sensor-based satellite iot for early wildfire detection. In: IEEE. **2021 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)**. [S. l.], 2021. p. 1–6.

- MA, H.; CAI, G.; FANG, Y.; CHEN, P.; HAN, G. Design and performance analysis of a new stbc-mimo lora system. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 69, n. 9, p. 5744–5757, 2021.
- MA, T.; XIAO, Y.; LEI, X.; YANG, P.; LEI, X.; DOBRE, O. A. Large intelligent surface assisted wireless communications with spatial modulation and antenna selection. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 38, n. 11, p. 2562–2574, 2020.
- MAGRIN, D.; CENTENARO, M.; VANGELISTA, L. Performance evaluation of lora networks in a smart city scenario. In: IEEE. **2017 IEEE International Conference on communications (ICC)**. [S. l.], 2017. p. 1–7.
- MAHMOOD, A.; SISINNI, E.; GUNTUPALLI, L.; RONDON, R.; HASSAN, S. A.; GIDLUND, M. Scalability analysis of a lora network under imperfect orthogonality. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 15, n. 3, p. 1425–1436, 2018.
- MANZANO, L. G.; BOUKABACHE, H.; DANZECA, S.; HERACLEOUS, N.; MURTAS, F.; PERRIN, D.; PIRC, V.; ALFARO, A. R.; ZIMMARO, A.; SILARI, M. An iot lorawan network for environmental radiation monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 70, p. 1–12, 2021.
- MÁRQUEZ, L. E.; CALLE, M.; VÉLEZ, J. C. Modeling lora: a complex envelope approach. In: IEEE. **2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)**. [S. l.], 2020. p. 1–6.
- MAURYA, P.; SINGH, A.; KHERANI, A. A. A review: spreading factor allocation schemes for lorawan. **Telecommunication Systems**, Springer, p. 1–20, 2022.
- MISONO, T. Dynamic light scattering (dls). In: _____. **Measurement Techniques and Practices of Colloid and Interface Phenomena**. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 65–69. ISBN 978-981-13-5931-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-5931-6_10. Acesso em: 12 abr. 2024.
- MOHAMMADI, S.; FARAHANI, G. Scalability analysis of a lora network under inter-sf and co-sf interference with poisson point process model. **Journal of Computing and Security**, University of Isfahan & Iranian Society of Cryptology, v. 8, n. 2, p. 43–57, 2021.
- MOHAMMADNIA-AVVAL, M.; GHASSEMI, A.; LAMPE, L. Compressive sensing recovery of nonlinearly distorted ofdm signals. In: IEEE. **2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S. l.], 2011. p. 1–5.
- NASEEM, Z.; NAUSHEEN, I.; MIRZA, Z. Propagation models for wireless communication system. **signal**, v. 5, n. 01, 2018.
- NETWORK, T. T. **LoRaWAN Architecture**. 2020. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>. Acesso em: 2 jun. 2022.
- NICOLAOU, L.; CHECKLEY, W. Differences between cigarette smoking and biomass smoke exposure: An in silico comparative assessment of particulate deposition in the lungs. **Environmental research**, Elsevier, v. 197, p. 111116, 2021.

NOREEN, U.; BOUNCEUR, A.; CLAVIER, L. A study of lora low power and wide area network technology. In: IEEE. **2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)**. [S. l.], 2017. p. 1–6.

OBSERVATORY, N. E. **How the Smoke Rises**. 2018. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/144658/how-the-smoke-rises>. Acesso em: 1 jun. 2022.

OLIVEIRA-ARBEX, A. P.; DAVID, É. B.; TENÓRIO, M. da S.; CICCHI, P. J. P.; PATTI, M.; CORADI, S. T.; LUCHEIS, S. B.; JIM, J.; GUIMARÃES, S. Diversity of blastocystis subtypes in wild mammals from a zoo and two conservation units in southeastern brazil. **Infection, Genetics and Evolution**, Elsevier, v. 78, p. 104053, 2020.

PHAM, C.; BOUNCEUR, A.; CLAVIER, L.; NOREEN, U.; EHSAN, M. Radio channel access challenges in lora low-power wide-area networks. In: **LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications**. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 65–102.

PIVELLO, V. R.; VIEIRA, I.; CHRISTIANINI, A. V.; RIBEIRO, D. B.; MENEZES, L. da S.; BERLINCK, C. N.; MELO, F. P.; MARENGO, J. A.; TORNQUIST, C. G.; TOMAS, W. M. *et al.* Understanding brazil's catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, Elsevier, v. 19, n. 3, p. 233–255, 2021.

RAHMADHANI, A.; ISSWANDHANA, R.; GIOVANI, A.; SYAH, R. A. *et al.* Lorawan as secondary telemetry communication system for drone delivery. In: IEEE. **2018 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence System (IOTAIS)**. [S. l.], 2018. p. 116–122.

RAWAT, A.; KAUSHIK, R.; TIWARI, A. An overview of mimo ofdm system for wireless communication. **International Journal of Technical Research & Science**, v. 6, n. X, p. 1–4, 2021.

ROUX, R. L.; WAGNER, F.; BLANC, L.; BETBEDER, J.; GOND, V.; DESSARD, H.; FUNATZU, B.; BOURGOIN, C.; CORNU, G.; HERAULT, B. *et al.* How wildfires increase sensitivity of amazon forests to droughts. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 17, n. 4, p. 044031, 2022.

SALAH, A. **GPS NMEA 0183 Messaging Protocol 101**. 2023. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/learn/communication/gps-nmea-data-101/>. Acesso em: 02 abr. 2023.

SAMPSON, W. A.; HADJICHRISTOS, A.; SAHOTA, G. S. **Diversity receiver for wireless communication**. [S. l.]: Google Patents, 2016. US Patent 9,450,665.

SANKAR, K. **Receive diversity in AWGN**. 2012. Disponível em: <https://dsplog.com/2008/08/19/receive-diversity-in-awgn/>. Acesso em: 1 fev. 2024.

SANO, E. E.; RODRIGUES, A. A.; MARTINS, E. S.; BETTIOL, G. M.; BUSTAMANTE, M. M.; BEZERRA, A. S.; JR, A. F. C.; VASCONCELOS, V.; SCHÜLER, J.; BOLFE, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 232, p. 818–828, 2019.

- SARAEREH, O. A.; ALSARAIRA, A.; KHAN, I.; UTHANSAKUL, P. Performance evaluation of uav-enabled lora networks for disaster management applications. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 8, p. 2396, 2020.
- SCHWARZ, L.; DIMITROVA, A.; AGUILERA, R.; BASU, R.; GERSHUNOV, A.; BENMARHANIA, T. Smoke and covid-19 case fatality ratios during california wildfires. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 17, n. 1, p. 014054, 2022.
- SILVA, P. H.; VASCONCELOS, V. V.; VASCONCELOS, L. E. M. Análise do padrão de distribuição espacial de queimadas no bioma pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 6, p. 1203–1217, 2020.
- SONG, Q.; NUAYMI, L.; LAGRANGE, X. Analysis of macro diversity based on maximum ratio combining in long range aloha networks. **Telecommunication Systems**, Springer, v. 72, n. 3, p. 471–482, 2019.
- SPAROVEK, G.; REYDON, B. P.; PINTO, L. F. G.; FARIA, V.; FREITAS, F. L. M. de; AZEVEDO-RAMOS, C.; GARDNER, T.; HAMAMURA, C.; RAJÃO, R.; CERIGNONI, F. *et al.* Who owns brazilian lands? **Land use policy**, Elsevier, v. 87, p. 104062, 2019.
- STELLIN, M.; SABINO, S.; GRILO, A. Lorawan networking in mobile scenarios using a wifi mesh of uav gateways. **Electronics**, MDPI, v. 9, n. 4, p. 630, 2020.
- STEPANETS, I.; FOKIN, G.; MUELLER, A. Capacity estimation ways of massive mimo systems. **T-Comm Telecommunication and transport**, v. 10, 2018.
- STEPHAN, K. D. An economical smoke chamber and light-sheet microscope system for experiments in fluid dynamics and electrostatics. **American Journal of Physics**, American Association of Physics Teachers, v. 91, n. 4, p. 316–323, 2023.
- SYIFA, M.; PANAHI, M.; LEE, C.-W. Mapping of post-wildfire burned area using a hybrid algorithm and satellite data: The case of the camp fire wildfire in california, usa. **Remote Sensing**, MDPI, v. 12, n. 4, p. 623, 2020.
- TADRIST, N.; DEBAUCHE, O.; MAHMOUDI, S.; GUTTADAURIA, A. Towards low-cost iot and lpwan-based flood forecast and monitoring system. **International Journal of Ubiquitous Systems and Pervasive Networks**, [International Association for Sharing Knowledge and Sustainability], Port . . . , v. 17, n. 1, 2022.
- TAROKH, V.; JAFARKHANI, H.; CALDERBANK, A. R. Space-time block codes from orthogonal designs. **IEEE Transactions on Information theory**, IEEE, v. 45, n. 5, p. 1456–1467, 1999.
- TELATAR, E. Capacity of multi-antenna gaussian channels. **European transactions on telecommunications**, Wiley Online Library, v. 10, n. 6, p. 585–595, 1999.
- TOMAS, W. M.; BERLINCK, C. N.; CHIARAVALLOTI, R. M.; FAGGIONI, G. P.; STRÜSSMANN, C.; LIBONATI, R.; ABRAHÃO, C. R.; ALVARENGA, G. do V.; BACELLAR, A. E. de F.; BATISTA, F. R. de Q. *et al.* Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the pantanal, brazil. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2021.

- VANGELISTA, L. Frequency shift chirp modulation: The lora modulation. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 24, n. 12, p. 1818–1821, 2017.
- VARSIER, N.; SCHWOERER, J. Capacity limits of lorawan technology for smart metering applications. In: IEEE. **2017 IEEE international conference on communications (ICC)**. [S. l.], 2017. p. 1–6.
- VERMA, S.; KAUR, S.; RAWAT, D. B.; XI, C.; ALEX, L. T.; JHANJHI, N. Z. Intelligent framework using iot-based wsns for wildfire detection. **IEEE Access**, IEEE, v. 9, p. 48185–48196, 2021.
- VISWANATHAN, M. **Simulation of digital communication systems using Matlab**. [S. l.]: Mathuranathan Viswanathan at Smashwords, 2013.
- WASET, A.; KANEKO, M.; GUITTON, A.; RACHKIDY, N. E. Lora throughput analysis with imperfect spreading factor orthogonality. **IEEE Wireless Communications Letters**, IEEE, v. 8, n. 2, p. 408–411, 2018.
- WIKLUNDH, K. C. Understanding the iot technology lora and its interference vulnerability. In: IEEE. **2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE**. [S. l.], 2019. p. 533–538.
- WILLIAMSON, G.; BOWMAN, D. M. S.; PRICE, O. F.; HENDERSON, S.; JOHNSTON, F. A transdisciplinary approach to understanding the health effects of wildfire and prescribed fire smoke regimes. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 11, n. 12, p. 125009, 2016.
- WONG, K.-K.; PAN, Z. Array gain and diversity order of multiuser miso antenna systems. **International Journal of Wireless Information Networks**, Springer, v. 15, n. 2, p. 82–89, 2008.
- XAVIER, D. M. .; PEREIRA JUNIOR, A. Qualitative and quantitative assessment of environmental impacts in the urban area of the altamira creek, altamira, par, brazil. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 3, 2021.
- XIAO, C.; ZHENG, Y. R.; BEAULIEU, N. C. Statistical simulation models for rayleigh and rician fading. In: IEEE. **IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03**. [S. l.], 2003. v. 5, p. 3524–3529.
- XU, G.; JIANG, Y.; WANG, S.; QIN, K.; DING, J.; LIU, Y.; LU, B. Spatial disparities of self-reported covid-19 cases and influencing factors in wuhan, china. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier, v. 76, p. 103485, 2022.
- YEGIN, A.; KRAMP, T.; DUFOUR, P.; GUPTA, R.; SOSS, R.; HERSENT, O.; HUNT, D.; SORNIN, N. Lorawan protocol: specifications, security, and capabilities. In: **LPWAN Technologies for iot and m2m applications**. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 37–63.
- YU, F.; ZHU, Z.; FAN, Z. Study on the feasibility of lorawan for smart city applications. In: IEEE. **2017 IEEE 13th International conference on wireless and mobile computing, networking and communications (WiMob)**. [S. l.], 2017. p. 334–340.
- YUE, S.; ZHU, J.; CHEN, S.; XIE, Q.; LI, W.; LI, L.; REN, H.; SU, S.; LI, P.; MA, H. *et al.* Brown carbon from biomass burning imposes strong circum-arctic warming. **One Earth**, Elsevier, v. 5, n. 3, p. 293–304, 2022.