



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ALÍCIA MARIA GUALBERTO LIMA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO LORA COM DIVERSIDADE ESPACIAL EM
CANALIS COM DESVANECIMENTO**

QUIXADÁ

2026

ALÍCIA MARIA GUALBERTO LIMA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO LORA COM DIVERSIDADE ESPACIAL EM
CANALIS COM DESVANECIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli.

QUIXADÁ

2026

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)

L696a Lima, Alcía Maria Gualberto.
Avaliação do desempenho do Lora com diversidade espacial em canais com desvanecimento / Alcía Maria Gualberto Lima. – 2026.
48 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.

Coorientação: Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli.

1. Redes. 2. Simulador. 3. Modelagem. I. Título.

CDD 621.39

ALÍCIA MARIA GUALBERTO LIMA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO LORA COM DIVERSIDADE ESPACIAL EM
CANAIS COM DESVANECIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Com-
putação do Campus Quixadá da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à ob-
tenção do grau de bacharel em Engenharia de
Computação.

Aprovada em: 15 de Janeiro de 2026

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. André Ribeiro Braga
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

A tecnologia Longo Alcance (LoRa) destaca-se em aplicações de Internet das Coisas (IoT) por oferecer comunicação de longo alcance com baixo consumo energético, porém seu desempenho pode ser degradado por ruído e, principalmente, por desvanecimento em ambientes com multi-percurso. Neste trabalho, investiga-se o desempenho do LoRa em nível de enlace sob diferentes condições de canal, com ênfase no desvanecimento *Rayleigh* e na aplicação de diversidade espacial na recepção. Para isso, foi desenvolvido um simulador computacional em *Python* capaz de gerar e demodular sinais LoRa em banda base, usando modulação Espectro de Espalhamento Chirp (CSS), modelar canais Ruído Gaussiano Branco Aditivo (AWGN) e Rayleigh em regime de *block fading*, e avaliar configurações Entrada Única Saída Única (SISO) e Entrada Única Saída Múltipla (SIMO) com a Combinação por Máxima Razão (MRC). O desempenho foi quantificado por curvas de Taxa de Erro de Bit (BER) em função da Relação Sinal-Ruído (SNR), variando parâmetros como Fator de Espalhamento (SF) e número de antenas receptoras. Em canal AWGN, os resultados confirmam o ganho esperado com MRC, compatível com a tendência teórica de diversidade. Em canal Rayleigh, observou-se comportamento consistente com a literatura, com ganhos acentuados pela mitigação de desvanecimentos profundos, mantendo as tendências e separações relativas entre curvas mesmo diante de pequenas diferenças numéricas.

Palavras-chave: LoRa; diversidade espacial; canal Rayleigh; combinação por máxima razão; taxa de erro de bit.

ABSTRACT

Long Range (LoRa) technology stands out in Internet of Things (IoT) applications by enabling long-range communication with low energy consumption; however, its performance can be degraded by noise and, mainly, by fading in multipath environments. This work investigates LoRa link-level performance under different channel conditions, with emphasis on *Rayleigh* fading and the use of spatial diversity at the receiver. To this end, a *Python*-based simulator was developed to generate and demodulate LoRa baseband signals using Chirp Spread Spectrum (CSS) modulation, model Additive White Gaussian Noise (AWGN) and Rayleigh channels under a *block-fading* assumption, and evaluate Single Input Single Output (SISO) and Single Input Multiple Output (SIMO) configurations with Maximal-Ratio Combining (MRC). Performance was quantified through Bit Error Rate (BER) versus Signal-to-Noise Ratio (SNR) curves, varying parameters such as Spread Factor (SF) and the number of receive antennas. In the AWGN channel, the results confirm the expected gain with MRC, consistent with the theoretical diversity trend. In the Rayleigh channel, the observed behavior agrees with the literature, with more pronounced gains due to the mitigation of deep fades, while preserving the trends and relative separations between curves despite small numerical differences.

Keywords: LoRa; spatial diversity; Rayleigh channel; maximum ratio combining; bit error rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Exemplo de amostras do coeficiente de canal Rayleigh: componentes real e imaginária e variação da magnitude $ h $	16
Figura 2	– Relação entre o ganho médio de SNR (em Decibel (dB)) e o número de canais para diferentes técnicas de diversidade. Nota-se que o MRC aproxima-se da curva teórica de $10\log_{10}(N)$	21
Figura 3	– Diferença em dB pela qual o MRC excede Equal-Gain, Selection e One Channel.	22
Figura 4	– Taxas de erro de bits (BER) para diferentes detecções em canal AWGN e canal Rayleigh, variando o número de antenas ($L = 1, 2, 3, 4$).	23
Figura 5	– Fluxograma das etapas metodológicas do projeto.	26
Figura 6	– Desempenho da BER no canal AWGN para a configuração SIMO com $N = 2$	39
Figura 7	– Desempenho da BER no canal AWGN para a configuração SIMO com $N = 4$	39
Figura 8	– Desempenho da BER no canal AWGN para a configuração SIMO com $N = 8$	40
Figura 9	– Desempenho da BER no canal Rayleigh para a configuração SIMO com $N = 2$	41
Figura 10	– Comparação entre os resultados em (a) simulação do artigo e (b) simulação própria.	42
Figura 11	– Comparação entre os resultados em (a) simulação do artigo e (b) simulação própria.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise comparativa entre trabalhos relacionados e este TCC	25
Tabela 2 – SNR estimado para $BER = 10^{-2}$, com SIMO 1x2.	38
Tabela 3 – SNR estimado para $BER = 10^{-2}$, com SIMO 1x4.	40
Tabela 4 – SNR estimado para $BER = 10^{-2}$, com SIMO 1x8.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWGN	Ruído Gaussiano Branco Aditivo
BER	Taxa de Erro de Bit
CSS	Espectro de Espalhamento Chirp
dB	Decibel
FFT	Transformada Rápida de Fourier
IoT	Internet das Coisas
ISM	Industrial, Científico e Médico
LoRa	Longo Alcance
LoRaWAN	Rede de Longo Alcance LoRa
LPWAN	Redes de Longo Alcance e Baixo Consumo Energético
MIMO	Entrada Múltipla Saída Múltipla
MISO	Entrada Múltipla Saída Única
MRC	Combinação por Máxima Razão
NB-IoT	IoT de Banda Estreita
SF	Fator de Espalhamento
SIMO	Entrada Única Saída Múltipla
SISO	Entrada Única Saída Única
SNR	Relação Sinal-Ruído

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	12
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>12</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>12</i>
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Tecnologias LPWAN e o LoRa	13
<i>2.1.1</i>	<i>Visão geral sobre LPWAN</i>	<i>13</i>
<i>2.1.2</i>	<i>O que é LoRa / LoRaWAN</i>	<i>13</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Por que utilizar LoRa?</i>	<i>14</i>
2.2	Canais de propagação	14
<i>2.2.1</i>	<i>Canal AWGN</i>	<i>14</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Canal Rayleigh</i>	<i>15</i>
2.3	Técnicas de diversidade	17
<i>2.3.1</i>	<i>Tipos de diversidade</i>	<i>17</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Técnicas de combinação de sinais</i>	<i>17</i>
2.4	Configurações SISO, SIMO, MISO e MIMO	19
3	TRABALHOS RELACIONADOS	21
<i>3.1</i>	<i>Linear Diversity Combining Techniques</i>	<i>21</i>
<i>3.2</i>	<i>Performance Improvement of LoRa Modulation with Signal Combining and Semi-Coherent Detection</i>	<i>22</i>
<i>3.3</i>	<i>Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?</i>	<i>23</i>
<i>3.4</i>	<i>Análise Comparativa</i>	<i>24</i>
4	METODOLOGIA	26
4.1	Planejamento Geral do Projeto	26
4.2	Etapas de Desenvolvimento	27
<i>4.2.1</i>	<i>Parametrização do Enlace LoRa e Configuração da Simulação</i>	<i>27</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Mapeamento em Nível de Bits e Cadeia de Codificação/Decodificação</i>	<i>27</i>
<i>4.2.3</i>	<i>Geração dos Sinais LoRa</i>	<i>29</i>
<i>4.2.4</i>	<i>Modelagem do Canal com Desvanecimento Rayleigh</i>	<i>30</i>

4.2.5	<i>Geração do Ruído AWGN Complexo e Formação do Sinal Recebido em Cada Ramo</i>	31
4.2.6	<i>Combinação com MRC no Cenário SIMO</i>	33
4.2.7	<i>Processo de Decodificação: De-Chirp, FFT e Detecção do Símbolo</i>	33
4.2.8	<i>Cálculo da Taxa de Erros de Bit (BER)</i>	35
4.2.9	<i>Pós-Processamento: Interpolação da SNR para BER Alvo e Geração das Curvas</i>	36
4.3	Execução das Simulações Paramétricas	36
4.4	Validação do Simulador	37
5	RESULTADOS	38
5.1	Resultados no canal AWGN	38
5.2	Resultados no canal Rayleigh	41
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (IoT) é uma área que vem se expandindo e transformando o mundo por meio de aplicações que vão desde cidades inteligentes até o monitoramento ambiental, com sensores responsáveis por coletar, transmitir e reagir a dados em tempo real (Zanella *et al.*, 2014). No entanto, essa conectividade depende de enlaces de comunicação estáveis e confiáveis, mesmo em ambientes sujeitos a interferências, ruído e desvanecimento de sinal (Marques *et al.*, 2010; Nascimento; Aguiar, 2016). Em áreas rurais, remotas ou com infraestrutura limitada — justamente os locais onde a IoT tende a gerar maior impacto positivo — esses problemas tornam-se ainda mais críticos. Dessa forma, a estabilidade da comunicação sem fio é um fator determinante para o sucesso de aplicações baseadas em dispositivos inteligentes.

Com o objetivo de enfrentar esses desafios, surgiram as Redes de Longo Alcance e Baixo Consumo Energético (LPWAN) que mitigam os principais problemas: as longas distâncias por onde os sinais precisam se propagar e o consumo de energia ao longo do tempo (Centenaro *et al.*, 2016). Dentre elas, o **Long Range** (LoRa) destaca-se pelo baixo custo de implantação, fácil acessibilidade e flexibilidade via Fator de Espalhamento (SF) (Semtech Corporation, 2023; Corporation, 2020).

No entanto, embora existam estudos teóricos e experimentais sobre o comportamento do LoRa em canais com desvanecimento (Nguyen *et al.*, 2021; Ameloot *et al.*, 2021), ainda são limitadas as abordagens que disponibilizam um simulador de enlace flexível para investigar, de forma controlada, a diversidade espacial combinada à modulação Espectro Espalhado por Chirp (CSS). Nesse contexto, este trabalho propõe uma ferramenta de simulação parametrizável, permitindo variar SF, Relação Sinal-Ruído (SNR) e as condições de canal para avaliar o impacto da diversidade no desempenho.

Entre as ferramentas existentes para simular conexões LoRa, destacam-se o NS-3, com módulos dedicados, e simuladores específicos como o LoRaSim (NS-3 Consortium, 2024). Entretanto, são poucas as soluções flexíveis que permitem configurar diferentes modelos de canal e aplicar técnicas de diversidade espacial com foco na modulação CSS e seus impactos sobre a Taxa de Erro de Bit (BER). Além disso, são raros os estudos que investigam de forma controlada os efeitos dessas técnicas sobre a qualidade de recepção em canais com desvanecimento (Simon; Alouini, 2005; Paulraj *et al.*, 2004).

Este trabalho tem como foco investigar o desempenho da tecnologia LoRa quando submetida a diferentes cenários de desvanecimento, especialmente sob o modelo estatístico

de canal *Rayleigh*, com o uso de diversidade espacial. Busca-se compreender, de forma mais ampla, como diferentes configurações do sistema — como o número de antenas, a técnica de combinação utilizada e as características do canal — afetam a qualidade da comunicação e a BER, fornecendo subsídios teóricos para o planejamento de redes LoRa mais robustas (Alouini; Goldsmith, 1999; Proakis; Salehi, 2007).

Para isso, foi desenvolvida uma ferramenta computacional em *Python* capaz de simular a transmissão LoRa sob diferentes condições de canal, incluindo a implementação de técnicas de combinação de sinais. A ferramenta proposta permite testar cenários variados, oferecendo suporte conceitual para aplicações críticas onde a confiabilidade do enlace é essencial. Tendo como objetivo restrito a avaliação do desempenho do LoRa, sem a implementação física dos sistemas propostos.

O simulador permite investigar, com controle das variáveis envolvidas, o impacto de técnicas de diversidade espacial sob diferentes configurações de enlace LoRa, fornecendo uma base mais precisa para experimentos futuros e validações empíricas. Assim, este trabalho contribui com uma abordagem metodológica que amplia a capacidade de análise de sistemas LoRa em ambientes adversos.

Este estudo foi motivado por um projeto de desenvolvimento de um sistema automatizado de monitoramento meteorológico para agricultura sustentável, ambiente em que o uso do LoRa é ideal devido à necessidade de coleta constante de dados e transmissão remota com baixo consumo energético, o que gerou a necessidade deste estudo mais aprofundado sobre a rede LoRa (Silva *et al.*, 2024).

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: O Capítulo 2 reúne os conceitos teóricos fundamentais sobre tecnologias *LPWAN*, canais de propagação e técnicas de diversidade. O Capítulo 3 apresenta os principais trabalhos relacionados, contextualizando as abordagens existentes na literatura sobre diversidade espacial em comunicações sem fio, com foco no LoRa. A metodologia é descrita no Capítulo 4, detalhando o desenvolvimento da ferramenta de simulação e a realização dos experimentos. Após a metodologia, são mostrados os resultados das simulações e suas respectivas análises no Capítulo 5. E, por fim, no Capítulo 6 serão vistas as conclusões feitas a partir dos resultados e trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo Geral*

Investigar o desempenho da tecnologia LoRa em canais com desvanecimento, especialmente sob o modelo estatístico de canal *Rayleigh*, por meio da aplicação de técnicas de diversidade espacial. Isso será feito a partir da ferramenta desenvolvida, capaz de simular a transmissão e recepção LoRa com diferentes configurações de sistema, avaliando o impacto do número de antenas e das técnicas de combinação na BER.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Desenvolver um simulador de enlace para sinais LoRa, contemplando geração, transmissão e recepção em arquitetura com múltiplas antenas, e incorporar técnicas de diversidade por combinação, como a Combinação por Máxima Razão (MRC), para avaliar sua eficácia em canais com desvanecimento.
- Realizar simulações, variando parâmetros como SNR, SF, número de antenas e tipos de canal.
- Validar o desempenho do sistema com base na comparação da BER com o que é discutido na literatura.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tecnologias LPWAN e o LoRa

2.1.1 Visão geral sobre LPWAN

As redes LPWAN são ideais para dispositivos que necessitam de um baixo consumo energético e que estão se comunicando a longas distâncias (Nascimento; Aguiar, 2016). Por essas características, essa tecnologia se destaca em aplicações de IoT, pois combina baixo consumo de energia com cobertura direcionada, tornando-a adequada para situações em que a troca de dados ocorre com pouca frequência e em pequenos volumes.

Sigfox, IoT de Banda Estreita (NB-IoT) e LoRa/Rede de Longo Alcance LoRa (LoRaWAN) são as três principais tecnologias LPWAN e cada uma emprega diferentes estratégias de modulação, acesso ao meio e licenciamento de espectro. Por exemplo, a Sigfox opera em espectros ultraestritos e emprega uma abordagem proprietária e a NB-IoT opera em bandas licenciadas e é gerenciada por operadoras de telefonia móvel. Já o LoRa opera em frequências não licenciadas (Industrial, Científico e Médico (ISM)), permitindo uso gratuito sem a necessidade de um contrato de serviço de telecomunicações.

2.1.2 O que é LoRa / LoRaWAN

LoRa é uma tecnologia de modulação feita para comunicação sem fio de longo alcance, baixo consumo de energia e baixa taxa de transmissão de dados. A modulação LoRa é baseada em chirps de frequência, utilizando o CSS (Corporation, 2020), que tem resistência a interferências e desvanecimentos, características apropriadas para ambientes com muitos ruídos e de difícil propagação do sinal.

Por funcionar em bandas de frequência não licenciadas, como 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz, a LoRa pode ser utilizada sem a necessidade de licenciamento do espectro, o que reduz custos e facilita o uso em larga escala.

Já o LoRaWAN é um protocolo de comunicação que define a arquitetura da rede e gerencia dispositivos, segurança, rotas e camadas de aplicação (Corporation, 2020). Ele utiliza uma topologia em estrela, onde dispositivos finais (nós) transmitem dados para *gateways* que encaminham esses dados para um servidor central de rede.

A junção da modulação LoRa e o protocolo LoRaWAN possibilita a construção

de redes escaláveis e de baixo custo para aplicações IoT. A tecnologia ainda dá acesso para configurar parâmetros como o SF, o que afeta diretamente o alcance e o tempo de transmissão dos pacotes, sendo uma das variáveis mais exploradas neste trabalho para avaliação do desempenho de comunicação.

2.1.3 Por que utilizar LoRa?

Por unir cobertura de longo alcance, eficiência energética e baixo custo de implante, a tecnologia LoRa vem sendo uma das principais soluções LPWAN (Corporation, 2020). Seu funcionamento baseado em frequências sem licenças, torna inútil a contratação de serviços de telecomunicações, fazendo com que ela se torne ideal para aplicações em áreas remotas ou com infraestrutura limitada.

A facilidade de implementação e flexibilidade do LoRaWAN torna possíveis redes escaláveis e adaptáveis a diversas demandas, desde pequenas instalações até sistemas distribuídos em larga escala. Essa versatilidade é muito utilizada em cenários como cidades inteligentes, agricultura de precisão, monitoramento ambiental e automação industrial.

Este trabalho irá estudar o desempenho da comunicação LoRa quando submetida a técnicas de diversidade espacial. Serão feitas investigações dos ganhos obtidos em configurações de múltiplas antenas no receptor, avaliando sua aplicabilidade prática ao cenário LoRa.

2.2 Canais de propagação

A propagação de sinais em sistemas de comunicação sem fio está propícia a diversas interferências físicas que impactam diretamente na qualidade da recepção (Marques *et al.*, 2010). Os principais fenômenos são: o ruído aditivo e o desvanecimento do sinal. Eles são produzidos matematicamente por diferentes tipos de canal e este trabalho, especificamente, utiliza dois modelos de canais mais conhecidos na literatura: o canal (AWGN) e o canal *Rayleigh*.

2.2.1 Canal AWGN

O Ruído Branco Gaussiano Aditivo (AWGN) é o canal mais simples dos sistemas de comunicação, pois o único elemento de degradação do sinal é a junção do ruído branco gaussiano com densidade espectral constante ao longo da banda. Logo, esse canal não considera as consequências de multipercurso nem variações no ganho do sinal com o passar do tempo.

O sinal recebido $r(t)$ é representado como: $r(t) = s(t) + n(t)$, onde $s(t)$ é o sinal transmitido e $n(t) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ é uma variável aleatória complexa gaussiana com média zero e variância proporcional à potência de ruído. A ausência do desvanecimento faz com que o canal AWGN torne-se uma referência para validar modelos computacionais e analisar o desempenho teórico (Marques *et al.*, 2010).

Portanto, o canal AWGN será utilizado para a validação dos resultados da ferramenta computacional, sendo comparado com os experimentos realizados sob o canal *Rayleigh*, o qual representa um cenário mais realista.

2.2.2 Canal Rayleigh

O canal *Rayleigh* é um modelo estatístico utilizado para representar cenários em que o sinal sofre forte desvanecimento devido à propagação por múltiplos percursos, sem a presença de uma linha de visada direta (NLoS). Esse tipo de canal é típico de ambientes urbanos e *indoor*, nos quais os sinais refletem, refratam ou difratam antes de alcançar o receptor, em função dos obstáculos presentes no ambiente (Marques *et al.*, 2010).

No modelo *Rayleigh*, o coeficiente de canal h é representado como uma variável aleatória complexa circularmente simétrica, denotada por

$$h \sim \mathcal{CN}(0, 1).$$

Isso significa que h pode ser escrito como $h = h_{\text{re}} + jh_{\text{im}}$, em que as partes real e imaginária são variáveis aleatórias gaussianas independentes, com média zero e variância $1/2$, isto é,

$$h_{\text{re}}, h_{\text{im}} \sim \mathcal{N}(0, 1/2).$$

Essa parametrização garante que a potência média do canal seja unitária, uma vez que a potência do coeficiente complexo é dada pelo seu módulo ao quadrado:

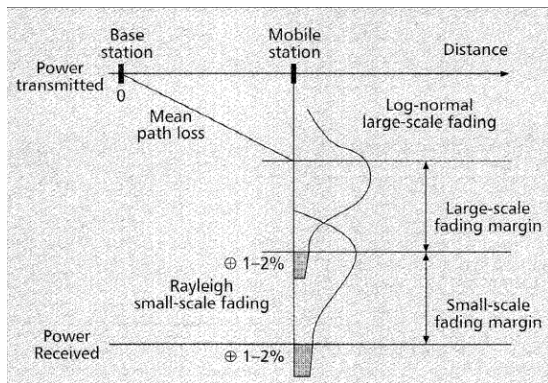
$$\mathbb{E}[|h|^2] = \mathbb{E}[h_{\text{re}}^2] + \mathbb{E}[h_{\text{im}}^2] = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1.$$

Dessa forma, o canal introduz apenas variações aleatórias de amplitude e fase no sinal transmitido, sem alterar a potência média do enlace, permitindo que a SNR seja controlada exclusivamente pelo nível de ruído.

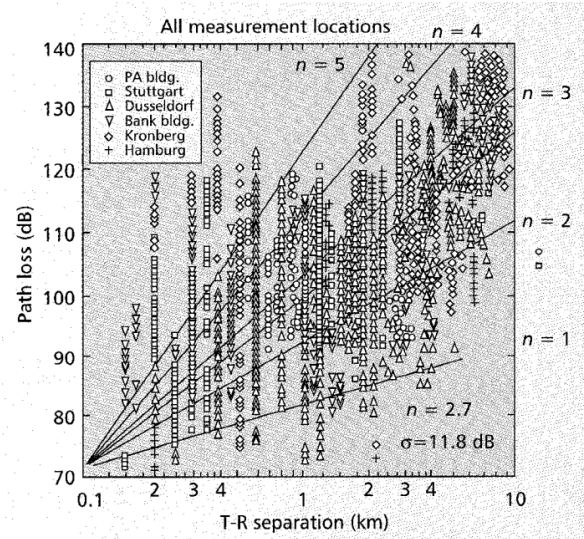
A Figura 1 é incluída como apoio visual à parametrização adotada para h . Em (a), a dispersão das amostras das componentes real e imaginária evidencia que ambas são

centradas em zero; em (b), a variação de $|h|$ ilustra as flutuações aleatórias de ganho impostas pelo canal. Essas características são consistentes com $h \sim \mathcal{CN}(0, 1)$, em que $h = h_{re} + jh_{im}$ e $h_{re}, h_{im} \sim \mathcal{N}(0, 1/2)$, resultando em potência média unitária $\mathbb{E}[|h|^2] = 1$.

Figura 1 – Exemplo de amostras do coeficiente de canal Rayleigh: componentes real e imaginária e variação da magnitude $|h|$.



(a) Amostras das componentes de h .



(b) Variação da magnitude $|h|$.

Fonte: (Sklar, 1997).

Assim, o sinal recebido pode ser representado por

$$r(t) = h \cdot s(t) + n(t),$$

em que o termo multiplicativo h modela o desvanecimento do canal e $n(t)$ representa o ruído aditivo. No contexto deste trabalho, considera-se que o coeficiente de canal permanece constante durante a duração de um símbolo e varia de símbolo para símbolo, caracterizando um modelo de desvanecimento plano e lento.

Neste trabalho, o canal *Rayleigh* constitui o principal foco de estudo, pois permite avaliar o comportamento da comunicação LoRa sob condições mais realistas e analisar o impacto do uso de múltiplas antenas receptoras na melhoria do desempenho do enlace.

2.3 Técnicas de diversidade

2.3.1 Tipos de diversidade

A diversidade é uma estratégia de comunicação necessária para diminuir os efeitos do desvanecimento (*fading*), que é causado pela propagação multipercurso e pela variação temporal do canal. Estudar várias representações do mesmo sinal, em relação ao tempo, frequência, espaço ou outras dimensões, tem o objetivo de diminuir a probabilidade de que todas elas sejam degradadas ao mesmo tempo (Nascimento; Aguiar, 2016).

As principais formas de diversidade incluem:

- **Diversidade espacial** (*spatial diversity*): utiliza duas ou mais antenas fisicamente separadas para que cada ramo de recepção experimente desvanecimentos com baixa correlação. Em cenários com espalhamento rico, adota-se como regra prática uma separação da ordem de meia onda, isto é, $d \approx \lambda/2$ (ou maior), onde $\lambda = c/f_c$ é o comprimento de onda na portadora; essa separação reduz a correlação entre os sinais recebidos e aumenta a efetividade da combinação por diversidade (Renzo *et al.*, 2023).
- **Diversidade de frequência** (*frequency diversity*): O sinal é transmitido em várias frequências, aproveitando que diferentes bandas sofrem desvanecimento independente. Essa técnica é aplicada, por exemplo, em sistemas de transmissão multibanda.
- **Diversidade temporal** (*time diversity*): O símbolo é retransmitido em momentos diferentes, aproveitando a variação temporal do canal. Isso é feito em códigos ou esquemas de intercalação como ARQ (*Automatic Repeat reQuest*).
- **Diversidade por polarização** (*polarization diversity*): O uso de diferentes polarizações da onda eletromagnética permite estudar e analisar caminhos independentes no ambiente de propagação.
- **Diversidade por caminho** (*path diversity*): São os diferentes caminhos físicos entre transmissor e receptor e é utilizada, por exemplo, em sistemas de comutação entre múltiplos enlaces ou em configurações com múltiplos relays.

2.3.2 Técnicas de combinação de sinais

Além da diversidade, também é preciso aplicar técnicas de combinação das muitas cópias do sinal no receptor para obter ganho de desempenho no sistema de comunicação. E as principais técnicas lineares de combinação de sinais são:

- **Combinação por Seleção** (*Selection Combining* — SC): Esta técnica escolhe somente a antena com a maior SNR, mas, mesmo sendo simples e de baixo custo computacional, pode desperdiçar a energia recebida de outras antenas.
- **Combinação com Ganho Igual** (*Equal Gain Combining* — EGC): Aqui é feita a soma das cópias do sinal, alinhando somente a fase e sem ponderação por ganho. Assim, resulta em um desempenho intermediário entre SC e MRC, com uma complexidade intermediária entre os dois.
- **Combinação por Máxima Razão** (*Maximal Ratio Combining* — MRC): Esta é vista como a técnica ideal do ponto de vista teórico, pois pondera cada cópia do sinal proporcionalmente à sua SNR e alinha a fase antes da soma, então não tem energia desperdiçada e é mais confiável por considerar o que cada antena recebeu.

Expressão teórica de ganho por diversidade

O MRC é considerado ótimo em termos de maximização da SNR na saída do combinador, servindo como referência para técnicas de diversidade espacial. Considere um sistema com N antenas receptoras, em que o sinal no ramo i é dado por

$$r_i = h_i s + n_i, \quad (2.1)$$

com h_i o coeficiente de canal, s o símbolo transmitido e n_i ruído complexo gaussiano. Assume-se estimativa perfeita de canal no receptor (CSI), e que n_i é independente e identicamente distribuído entre os ramos.

No MRC, cada ramo é ponderado proporcionalmente ao conjugado do canal, isto é, $w_i = h_i^*$, e a saída do combinador é dada pela combinação linear ótima dos sinais recebidos, conforme o modelo clássico de diversidade espacial (Proakis; Salehi, 2007):

$$y = \sum_{i=1}^N w_i r_i = \sum_{i=1}^N h_i^* r_i. \quad (2.2)$$

Sob essa ponderação, a SNR instantânea na saída pode ser escrita como

$$\gamma_{\text{out}} = \sum_{i=1}^N \gamma_i, \quad (2.3)$$

onde γ_i é a SNR instantânea de cada ramo antes da combinação. Para ramos independentes e identicamente distribuídos, com $\mathbb{E}[\gamma_i] = \bar{\gamma}$, obtém-se

$$\mathbb{E}[\gamma_{\text{out}}] = \sum_{i=1}^N \mathbb{E}[\gamma_i] = N\bar{\gamma}. \quad (2.4)$$

Assim, em escala linear, a diversidade via MRC aumenta a SNR média por um fator N em relação ao caso de uma única antena receptora.

Ao expressar essa melhoria em escala logarítmica (dB), obtém-se o ganho médio de diversidade

$$\text{Ganho (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{N\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} \right) = 10 \log_{10}(N). \quad (2.5)$$

Essa equação descreve o quanto a SNR média em dB melhora à medida que o número de antenas receptoras aumenta. Por exemplo, ao dobrar o número de antenas ($N \rightarrow 2N$), o ganho teórico adicional é de aproximadamente 3 dB:

$$10 \log_{10}(2) \approx 3 \text{ dB}.$$

Portanto, a expressão $10 \log_{10}(N)$ será utilizada neste trabalho como referência para validar as simulações e avaliar se o comportamento da ferramenta computacional em desenvolvimento está de acordo com os resultados esperados para sistemas com diversidade espacial combinados por MRC.

2.4 Configurações SISO, SIMO, MISO e MIMO

A quantidade de antenas colocadas no transmissor e no receptor em um sistema de comunicação sem fio define diferentes configurações: SISO, SIMO, MISO e MIMO. Cada uma dessas arquiteturas tem suas especificidades e características em relação ao desempenho, complexidade e aplicabilidade.

- **SISO**: É utilizada apenas uma antena no transmissor e no receptor (Single Input Single Output), sendo assim a forma mais simples de comunicação sem fio, mas é mais propensa as consequências do desvanecimento (*fading*) e à diminuição da taxa de transmissão e alcance.
- **SIMO**: Nesta configuração, o transmissor contém apenas uma antena que envia dados para um receptor com múltiplas antenas (Single Input Multiple Output), sendo possível analisar técnicas de diversidade espacial no receptor, reduzindo erros sem precisar alterar a estrutura do transmissor.
- **Entrada Múltipla Saída Única (MISO)**: São utilizadas múltiplas antenas no transmissor e apenas uma no receptor (Multiple Input Single Output). Essa configuração ajuda a formar feixes (*beamforming*) e aumentar a confiabilidade do enlace, caso o canal seja conhecido no transmissor.

- **Entrada Múltipla Saída Múltipla (MIMO):** Nesta configuração, são usadas múltiplas antenas de ambos os lados do sistema (Multiple Input Multiple Output), o que a torna mais avançada, podendo aumentar bastante a taxa de transmissão e a melhoria da comunicação. Porém, acaba necessitando de mais complexidade nos equipamentos e no processamento.

Por que será usada a configuração SIMO?

Para aplicações em uma rede de sensores de monitoramento ambiental, normalmente há um dispositivo embarcado com recursos limitados no nó transmissor, o que provoca a inviabilidade da inclusão de múltiplas antenas de transmissão, como nas configurações MISO ou MIMO.

Este trabalho servirá para um projeto de captura de dados meteorológicos, utilizando IoT com conexão LoRa. Assim, para conseguir uma maior capacidade computacional, dadas as limitações observadas, foi decidido utilizar múltiplas antenas apenas no receptor, onde serão aplicadas técnicas de diversidade para obter ganhos maiores na qualidade do sinal e na redução da BER, sem perder a simplicidade e o baixo consumo do transmissor.

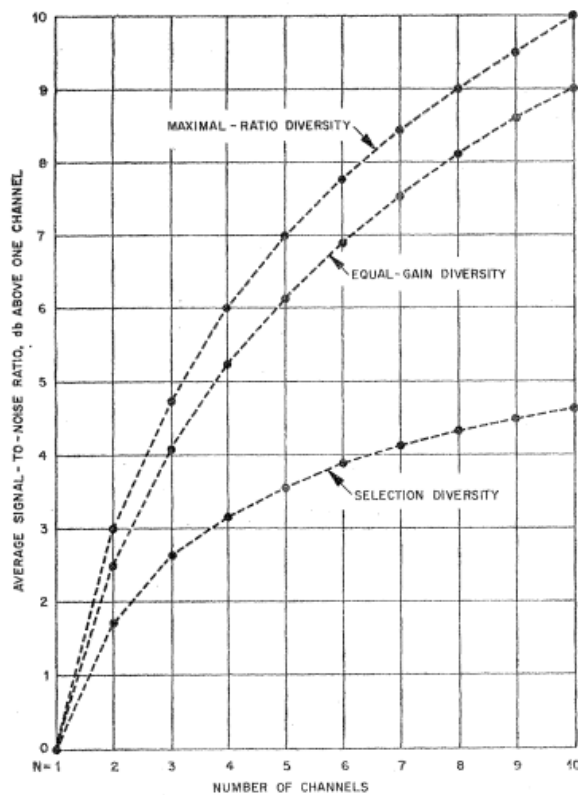
3 TRABALHOS RELACIONADOS

3.1 *Linear Diversity Combining Techniques*

O trabalho sobre técnicas de combinação de diversidade linear (Proakis; Salehi, 2007) descreve detalhadamente as principais técnicas de combinação de diversidade linear utilizadas em sistemas de comunicação sem fio para mitigar os efeitos do desvanecimento do sinal. Entre as técnicas analisadas, destaca-se a MRC, considerada a abordagem ideal sob o ponto de vista teórico para canais *Rayleigh* independentes.

Este trabalho apresenta a fundamentação estatística de cada método, derivando distribuições de probabilidade, expressões de ganho médio e cenários de aplicação. Um dos resultados centrais é a expressão teórica de ganho de diversidade, frequentemente aproximada por $10\log_{10}(N)$, onde N é o número de antenas receptoras independentes. Essa expressão resume o ganho esperado em dB na SNR devido à diversidade espacial.

Figura 2 – Relação entre o ganho médio de SNR (em dB) e o número de canais para diferentes técnicas de diversidade. Nota-se que o MRC aproxima-se da curva teórica de $10\log_{10}(N)$.



Fonte: (Proakis; Salehi, 2007)

O gráfico da Figura 2 ilustra claramente o ganho crescente do MRC em relação a

Figura 3 – Diferença em dB pela qual o MRC excede Equal-Gain, Selection e One Channel.

Number of Channels N	Number of DB by which Maximal-Ratio Exceeds		
	Equal-Gain	Selection	One Channel
2	0.49	1.25	3.01
3	0.67	2.14	4.77
4	0.76	2.83	6.02
6	0.85	3.89	7.78
8	0.90	4.69	9.03
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
∞	1.05	∞	∞

Fonte: (Proakis; Salehi, 2007)

outras técnicas à medida que se aumenta o número de antenas, aproximando-se do valor teórico de $10\log_{10}(N)$. Já a tabela da Figura 3 quantifica essa vantagem em dB, reforçando a motivação para usar o MRC como referência para a análise de ganho por diversidade.

Portanto, este trabalho fornece a base teórica para compreender a origem do ganho por acréscimo de antenas usada para o desenvolvimento da ferramenta computacional proposta neste projeto para que, por meio de simulações, seja possível verificar até que ponto os resultados práticos para o LoRa seguem o comportamento previsto pela teoria.

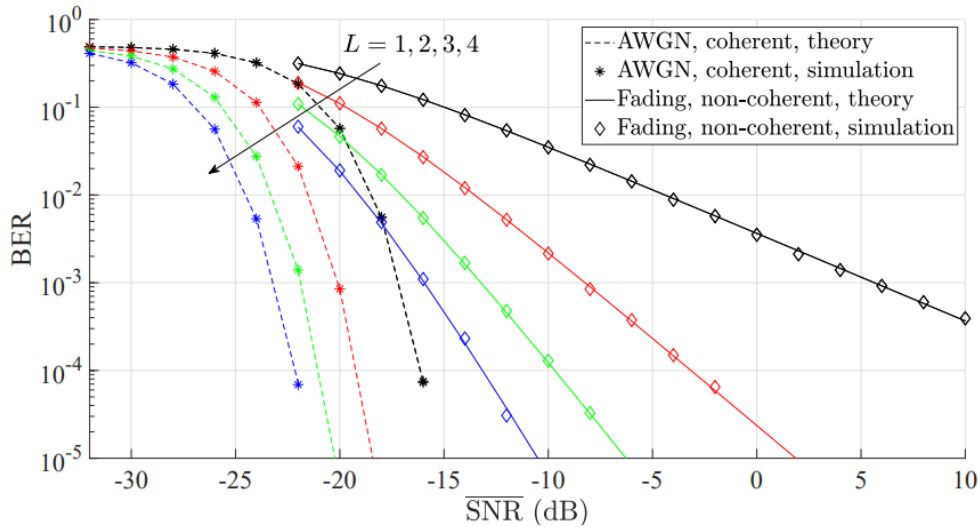
3.2 *Performance Improvement of LoRa Modulation with Signal Combining and Semi-Coherent Detection*

O artigo de melhoria do desempenho da modulação LoRa com combinação de sinais (Nguyen *et al.*, 2021), diferente de estudos puramente teóricos, propõe e valida métodos práticos para aplicar diversidade espacial em sistemas LoRa, visando superar limitações do esquema LoRa tradicional em ambientes de desvanecimento.

No estudo, são analisadas configurações SISO e SIMO aplicadas ao LoRa, utilizando combinações de sinais recebidos em múltiplas antenas para melhorar a SNR e reduzir a BER. Um destaque é a discussão sobre a viabilidade de aplicar MRC em LoRa, considerando restrições práticas como o sincronismo imperfeito e a natureza não coerente da demodulação LoRa.

A Figura 4 complementa o entendimento, mostrando o impacto prático da combinação de sinais e do número de antenas no desempenho do BER para o LoRa. Nota-se que o ganho proporcionado pelo acréscimo de antenas nas simulações do canal AWGN se aproxima do comportamento teórico de $10\log_{10}(N)$ visto anteriormente.

Figura 4 – Taxas de erro de bits (BER) para diferentes detecções em canal AWGN e canal Rayleigh, variando o número de antenas ($L = 1, 2, 3, 4$).



Fonte: (Nguyen *et al.*, 2021)

Este artigo contribui diretamente para o desenvolvimento deste TCC ao servir como referência de validação para o simulador de enlace proposto, fornecendo curvas de BER versus SNR em cenários SISO e SIMO sob AWGN e desvanecimento *Rayleigh*.

3.3 Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?

O trabalho *Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?* apresenta uma análise do desempenho da tecnologia LoRa sob a perspectiva estatística da propagação e da interferência em redes LPWAN. Diferentemente de estudos voltados à diversidade espacial ou à combinação de sinais no receptor, os autores concentram-se na modelagem do enlace LoRa, considerando explicitamente as particularidades da modulação CSS, do acesso múltiplo e das limitações impostas pelo protocolo de acesso ao meio.

O estudo adota um modelo de *uplink* com um único *gateway*, no qual os dispositivos finais são distribuídos espacialmente segundo um processo pontual de Poisson bidimensional. O canal de propagação é modelado como um canal *Rayleigh* plano, com AWGN, permitindo avaliar o impacto estatístico do desvanecimento em cenários realistas de comunicação sem fio (Georgiou; Raza, 2017).

Um dos principais resultados do trabalho é a demonstração de que, embora a modulação CSS do LoRa ofereça robustez ao ruído e permita operar com limiares de SNR baixos, o desempenho do enlace pode ser fortemente afetado pela interferência quando múltiplos dispositivos transmitem simultaneamente com o mesmo SF (Georgiou; Raza, 2017).

Apesar de não empregar métricas clássicas em nível de bit, como a BER, o trabalho é relevante por evidenciar que o canal *Rayleigh* e as características estatísticas do enlace LoRa exercem papel central no desempenho do sistema. Além disso, o estudo reforça que a análise do LoRa deve considerar suas particularidades físicas e estatísticas, e não apenas modelos simplificados baseados em canais ideais.

Este trabalho é relevante para este TCC por contextualizar o desempenho do LoRa em nível de rede sob desvanecimento *Rayleigh* e interferência, reforçando a necessidade de um modelo de enlace consistente com a literatura. Dessa forma, ele fundamenta a etapa futura de incorporar os resultados do simulador de enlace em um simulador sistêmico, garantindo coerência entre a análise física e a avaliação em nível de sistema.

3.4 Análise Comparativa

Para sintetizar as similaridades e diferenças entre os trabalhos revisados e o presente TCC, foram definidos cinco critérios principais de comparação, fundamentados nas características centrais de cada estudo e no foco desta pesquisa. São eles:

- **Diversidade espacial:** indica se o trabalho explora o uso de múltiplas antenas no transmissor e/ou no receptor, caracterizando configurações como SISO, SIMO ou MIMO.
- **Técnica de combinação:** indica se o trabalho aborda explicitamente técnicas de combinação de sinais, como MRC ou métodos não coerentes, aplicadas aos sinais recebidos.
- **Aplicação em LoRa:** evidencia se o contexto experimental ou de simulação é aplicado especificamente a sistemas e redes LoRa.
- **Simulações replicáveis:** indica se o trabalho disponibiliza ou descreve uma simulação própria, com parâmetros e metodologia suficientes para permitir a reprodução dos resultados.
- **Canal *Rayleigh*:** indica se o modelo de canal considerado inclui desvanecimento *Rayleigh*, caracterizando cenários de propagação mais realistas.

A Tabela 1 resume a análise de acordo com esses critérios.

Tabela 1 – Análise comparativa entre trabalhos relacionados e este TCC

Trabalho	Diversidade	Combinação	LoRa	Simulações	Rayleigh
Linear Diversity Combining Techniques	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Performance Improvement of LoRa Modulation with Signal Combining and Semi-Coherent Detection	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Este TCC	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Elaborada pela autora.

4 METODOLOGIA

4.1 Planejamento Geral do Projeto

O planejamento foi construído em fases que incluem a construção da ferramenta computacional (Seção 4.2), as simulações com diferentes parâmetros e em cenários distintos (Seção 4.3), a validação dos resultados obtidos nessas simulações (Seção 4.4) e a análise dos mesmos (Capítulo 5). Essas etapas estão resumidas no fluxograma da Figura 5, que apresenta a sequência lógica adotada ao longo do desenvolvimento do projeto.

Para a construção do simulador de enlace, inicialmente foi realizada a parametrização do sistema LoRa e a definição do ambiente de simulação (Subseção 4.2.1). Em seguida, estabeleceu-se o mapeamento em nível de bits e a cadeia de codificação e decodificação adotada (Subseção 4.2.2). Na sequência, implementou-se a geração dos sinais LoRa (Subseção 4.2.3) e a modelagem do canal com desvanecimento *Rayleigh* (Subseção 4.2.4), bem como a geração do AWGN complexo e a formação do sinal recebido em cada ramo do receptor (Subseção 4.2.5). Para o cenário SIMO, foi incorporada a combinação por MRC (Subseção 4.2.6), seguida do processo de decodificação baseado em de-chirp, Transformada Rápida de Fourier (FFT) e detecção do símbolo (Subseção 4.2.7). Por fim, calculou-se a BER (Subseção 4.2.8) e realizou-se o pós-processamento, incluindo a interpolação da SNR para um valor-alvo de BER e a geração das curvas de desempenho (Subseção 4.2.9).

Figura 5 – Fluxograma das etapas metodológicas do projeto.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Etapas de Desenvolvimento

4.2.1 Parametrização do Enlace LoRa e Configuração da Simulação

A parametrização do enlace LoRa teve como objetivo definir um conjunto de condições de operação que permitisse avaliar, de forma sistemática, o desempenho do sistema em termos de BER em função da relação SNR. Para isso, foram estabelecidas faixas de SNR, SF, largura de banda e número de símbolos por ponto de simulação, que alimentam o simulador de enlace.

Inicialmente, foi definida uma faixa de SNR em banda base, com passo de 2 dB. Esses valores são organizados em um vetor, de forma que cada elemento representa um ponto de operação do enlace a ser avaliado. Para cada combinação de SNR e SF, o simulador transmite um número fixo de símbolos a fim de obter estimativas estatisticamente confiáveis da BER. Neste trabalho, foram considerados 10^5 símbolos por ponto de SNR, o que corresponde, para cada valor de SF, a $SF \cdot 10^5$ bits transmitidos em cada condição de simulação.

A largura de banda adotada nas simulações foi de $BW = 125$ kHz, valor típico em configurações LoRa. A potência de ruído utilizada no simulador é definida a partir de um nível de referência fixo em escala logarítmica e da largura de banda, resultando em

$$P_{n,\text{dB}} = -168 + 10 \log_{10}(BW), \quad (4.1)$$

e convertida para escala linear para uso no simulador por

$$P_n = 10^{\frac{P_{n,\text{dB}}}{10}}. \quad (4.2)$$

Esse valor parametriza o ruído AWGN somado ao sinal e, em conjunto com a SNR definida, estabelece a relação entre potência de sinal e potência de ruído empregada nas simulações.

Por fim, para cada combinação de SNR e SF, são organizados os parâmetros necessários à simulação do enlace (potência de ruído, número de *chips* do símbolo, chirp de referência para demodulação, entre outros) em uma estrutura de dados que será posteriormente no processamento do enlace.

4.2.2 Mapeamento em Nível de Bits e Cadeia de Codificação/Decodificação

A avaliação de desempenho realizada neste trabalho é feita em nível de bits, por meio da BER. Para isso, é necessário estabelecer um mapeamento claro entre as palavras binárias transmitidas e os símbolos LoRa efetivamente gerados pelo simulador.

Para um dado valor de SF, cada símbolo LoRa carrega, por construção, SF bits de informação. Assim, uma palavra binária

$$\mathbf{b} = [b_0, b_1, \dots, b_{SF-1}]^T, \quad b_i \in \{0, 1\},$$

é associada a um inteiro m pertencente ao conjunto $\{0, 1, \dots, 2^{SF} - 1\}$, que representa o índice do símbolo LoRa correspondente. O mapeamento entre a palavra binária e o índice inteiro é feito por meio da sua interpretação em base 2, de forma análoga a

$$m = \sum_{i=0}^{SF-1} b_i 2^{SF-1-i}. \quad (4.3)$$

Esse inteiro m é então utilizado internamente pelo simulador como rótulo do símbolo a ser transmitido, determinando o deslocamento em frequência aplicado ao chirp *LoRa*.

Para simplificar a implementação, o simulador gera, em cada iteração, um índice de símbolo m escolhido de forma uniforme no intervalo $\{0, \dots, 2^{SF} - 1\}$. A partir desse índice, obtém-se a palavra binária associada por meio da decomposição de m em base 2, operação equivalente à aplicação da função inversa do mapeamento descrito em (4.3), ou seja, à recuperação dos bits b_i a partir do valor inteiro. Dessa forma, ainda que a implementação opere diretamente com índices inteiros, o processo é estatisticamente equivalente à geração aleatória de palavras binárias de comprimento SF .

Esse mapeamento desempenha o papel de uma codificação simples em nível de símbolo: um bloco de SF bits é convertido em um símbolo M -ário, com $M = 2^{SF}$, o qual é então mapeado para uma forma de onda LoRa no domínio do tempo.

No receptor, após a passagem pelo canal e pelos blocos de processamento (combinação de diversidade, quando aplicável, e processo de demodulação), obtém-se uma estimativa \hat{m} do índice de símbolo transmitido. A partir desse índice estimado, realiza-se novamente a decomposição em base 2, obtendo-se a palavra binária estimada

$$\hat{\mathbf{b}} = [\hat{b}_0, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_{SF-1}]^T.$$

A comparação entre \mathbf{b} e $\hat{\mathbf{b}}$ permite identificar os bits incorretamente detectados em cada transmissão. Repetindo esse procedimento para um grande número de símbolos e para cada combinação de SNR e SF, é possível contabilizar o total de erros em nível de bit e, conseqüentemente, estimar a BER do sistema nas condições de simulação consideradas.

4.2.3 Geração dos Sinais LoRa

A geração dos sinais LoRa no simulador foi realizada em banda base complexa, de forma discreta no tempo, a partir da representação matemática da modulação por *chirp* discutida na fundamentação teórica. Para cada valor de SF, considera-se que cada símbolo LoRa é composto por $N = 2^{SF}$ amostras (ou *chips*) igualmente espaçadas no tempo, de modo que o símbolo é representado por um vetor complexo de dimensão N .

Em cada iteração da simulação, um índice de símbolo m é selecionado aleatoriamente, identificando qual símbolo LoRa será transmitido naquele experimento. Esse índice corresponde a um dos símbolos definidos no mapeamento em nível de bits (Subseção 4.2.2). Uma vez determinado m , o simulador constrói numericamente o respectivo sinal LoRa no domínio discreto, modelando-o como um *chirp* de frequência crescente ao longo da duração do símbolo, cujo conteúdo informacional é embutido como um deslocamento em frequência proporcional a m .

No domínio discreto, o índice n representa amostras espaçadas pelo tempo de chip T_c . Como a taxa de chips é determinada pela largura de banda (em hertz), adota-se

$$T_c = \frac{1}{BW}, \quad (4.4)$$

de modo que o instante físico correspondente é $t_n = nT_c$ e a duração do símbolo é $T_s = NT_c$. Para $BW = 125$ kHz, tem-se $T_c = 8 \mu s$.

O símbolo associado ao índice m é representado por uma sequência complexa $s_m[n]$, com $n = 0, 1, \dots, N - 1$, dada por

$$s_m[n] = A e^{j\theta_m[n]}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (4.5)$$

em que $\theta_m[n]$ é o *ângulo* (fase em radianos) do exponencial complexo. No simulador, esse ângulo é definido por

$$\theta_m[n] = 2\pi \frac{n}{N} \text{mod}(m + n, N), \quad (4.6)$$

onde $\text{mod}(\cdot)$ garante o comportamento cíclico do índice em $N = 2^{SF}$.

Equivalentemente, pode-se escrever $\theta_m[n] = 2\pi \varphi_m[n]$, onde $\varphi_m[n]$ é a fase normalizada (em ciclos).

Ressalta-se que o termo no expoente não representa diretamente uma frequência, mas sim a fase acumulada do sinal. O fator 2π converte a fase normalizada (em ciclos) para radianos,

resultando no ângulo $\theta_m[n]$ do exponencial complexo. A frequência discreta instantânea é obtida a partir da variação dessa fase no tempo; no caso discreto, pode-se interpretá-la pela diferença

$$f_m[n] \approx \frac{\theta_m[n] - \theta_m[n-1]}{2\pi T_c}. \quad (4.7)$$

Dessa forma, o comportamento de *chirp* (varredura de frequência) decorre do modo como $\theta_m[n]$ evolui com n .

A amplitude A é escolhida de forma a garantir coerência com a relação sinal-ruído especificada na parametrização da simulação. Para cada valor de SNR em dB, calcula-se a razão linear entre potência de sinal e potência de ruído, e a partir dessa razão é determinada a potência desejada do sinal transmitido. A amplitude do símbolo é então ajustada de modo que a potência média do vetor $s_m[n]$ seja compatível com essa potência de referência. Com isso, ao somar posteriormente o ruído térmico gerado com a potência calculada, assegura-se que a SNR efetiva observada na simulação corresponda, em média, ao valor parametrizado.

O resultado desse processo é um conjunto de símbolos LoRa gerados numericamente em banda base, cada um associado a um índice m , com forma de onda do tipo *chirp* e potência controlada em função da SNR. Esses sinais constituem a entrada do modelo de canal com desvanecimento Rayleigh e do ruído AWGN, descritos nas subseções seguintes.

4.2.4 Modelagem do Canal com Desvanecimento Rayleigh

A propagação do sinal LoRa no meio rádio foi modelada por meio de um canal com desvanecimento do tipo *Rayleigh* em banda base complexa. O ganho complexo do canal pode ser modelado como uma variável aleatória gaussiana complexa de média nula, o que implica que o módulo desse ganho apresenta distribuição *Rayleigh*.

No simulador, adota-se um modelo de desvanecimento plano (*flat fading*) por símbolo. Isso significa que, para cada símbolo transmitido, o canal é representado por um único ganho complexo constante ao longo de todas as amostras (*chips*) que compõem aquele símbolo, variando apenas de símbolo para símbolo. Em termos matemáticos, o enlace SISO pode ser descrito por

$$r[n] = h s[n] + w[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4.8)$$

em que $s[n]$ denota o símbolo LoRa transmitido em banda base, h é o coeficiente complexo do canal para aquele símbolo, $w[n]$ representa o ruído aditivo gaussiano branco (modelado em

subseção própria) e $N = 2^{SF}$ é o número de amostras por símbolo. O coeficiente h é gerado como uma variável gaussiana complexa circularmente simétrica, com média nula e variância unitária, isto é,

$$h \sim \mathcal{CN}(0, 1). \quad (4.9)$$

Com isso, o módulo $|h|$ segue uma distribuição *Rayleigh* e o quadrado do módulo, $|h|^2$, apresenta distribuição exponencial, características típicas de canais *Rayleigh*.

Para o cenário com diversidade espacial na recepção (SIMO), é considerado um conjunto de N_R antenas receptoras, cada uma sujeita a um canal independente com o transmissor. Nesse caso, o canal passa a ser descrito por um vetor de ganhos complexos

$$\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_{N_R}]^T, \quad (4.10)$$

em que cada componente h_i é modelado como uma variável gaussiana complexa circularmente simétrica, estatisticamente independente das demais:

$$h_i \sim \mathcal{CN}(0, 1), \quad i = 1, 2, \dots, N_R. \quad (4.11)$$

O sinal recebido em cada ramo da recepção pode ser expresso por

$$r_i[n] = h_i s[n] + w_i[n], \quad i = 1, 2, \dots, N_R, \quad (4.12)$$

onde $w_i[n]$ representa o ruído AWGN em cada antena. Assim como no caso SISO, assume-se que o canal é plano em frequência e constante ao longo da duração de um símbolo, mas varia de símbolo para símbolo, capturando o efeito de desvanecimento rápido (*small-scale fading*) em nível de enlace.

4.2.5 Geração do Ruído AWGN Complexo e Formação do Sinal Recebido em Cada Ramo

O simulador considera a presença de ruído térmico aditivo, modelado como ruído gaussiano branco em banda base complexa (AWGN).

Com base na potência de ruído na banda, denotada por P_n e calculada na Subseção 4.2.1, o ruído em banda base complexa é modelado como um processo aleatório $w[n]$ com distribuição gaussiana complexa circularmente simétrica, média nula e variância P_n , isto é,

$$w[n] \sim \mathcal{CN}(0, P_n). \quad (4.13)$$

Essa modelagem é implementada gerando-se, para cada amostra n , duas componentes reais independentes, de distribuição normal padrão, que são posteriormente escalonadas de forma a garantir que a potência média do ruído complexo seja igual a P_n . Essa construção pode ser expressa como

$$w[n] = \sqrt{\frac{P_n}{2}} (x[n] + jy[n]), \quad (4.14)$$

em que $x[n]$ e $y[n]$ são variáveis aleatórias gaussianas reais independentes, de média zero e variância unitária. Com isso, cada componente (real e imaginária) possui variância $P_n/2$, resultando em uma potência média total P_n para o ruído complexo.

No caso SISO, utiliza-se a notação $w[n]$; na extensão para SIMO, passa-se a denotar o ruído por ramo como $w_i[n]$.

No cenário de recepção com diversidade espacial (SIMO), assume-se a existência de N_R ramos receptores, cada um associado a um coeficiente de canal h_i gerado independentemente. Para cada ramo i , gera-se um processo de ruído complexo $w_i[n]$ com a mesma estatística do caso SISO, isto é,

$$w_i[n] \sim \mathcal{CN}(0, P_n), \quad i = 1, 2, \dots, N_R, \quad (4.15)$$

sendo todos os processos $\{w_i[n]\}$ independentes entre si, independentes dos coeficientes de canal e independentes do sinal transmitido.

Além do ruído aditivo, o simulador considera que o desvanecimento do canal permanece constante ao longo da duração de um símbolo LoRa e varia apenas de símbolo para símbolo. Assim, para cada símbolo transmitido e para cada ramo receptor i , é gerado um único coeficiente complexo h_i (*Rayleigh*) que multiplica todas as N amostras do símbolo, caracterizando um modelo de desvanecimento plano e lento (*block fading*). Essa hipótese simplifica a análise e é adequada quando a variação do canal é pequena dentro da duração de um símbolo.

Substituindo esse ruído $w[n]$ (e suas versões por ramo $w_i[n]$) no modelo de canal apresentado na Subseção 4.2.4, obtém-se o sinal recebido em cada ramo da recepção, o qual será utilizado nas etapas subsequentes de combinação por diversidade e demodulação LoRa.

Dessa forma, o sinal recebido em cada ramo é dado por

$$r_i[n] = h_i s_m[n] + w_i[n], \quad i = 1, \dots, N_R. \quad (4.16)$$

4.2.6 Combinação com MRC no Cenário SIMO

Considere o modelo de canal multiantena definido na Subseção 4.2.4, em que o sinal recebido no i -ésimo ramo é dado por

$$r_i[n] = h_i s[n] + w_i[n], \quad i = 1, 2, \dots, N_R, \quad (4.17)$$

Matematicamente, o sinal combinado pode ser expresso por

$$y[n] = \sum_{i=1}^{N_R} h_i^* r_i[n], \quad (4.18)$$

ou, em notação vetorial, por

$$y[n] = \mathbf{h}^H \mathbf{r}[n], \quad (4.19)$$

em que $\mathbf{h} = [h_1, \dots, h_{N_R}]^T$ é o vetor de ganhos de canal e $\mathbf{r}[n] = [r_1[n], \dots, r_{N_R}[n]]^T$ é o vetor de amostras recebidas em cada ramo, e $(\cdot)^H$ denota a transposta conjugada.

Substituindo o modelo de cada ramo na expressão de combinação, obtém-se

$$y[n] = \sum_{i=1}^{N_R} h_i^* (h_i s[n] + w_i[n]) = \left(\sum_{i=1}^{N_R} |h_i|^2 \right) s[n] + \sum_{i=1}^{N_R} h_i^* w_i[n]. \quad (4.20)$$

O procedimento de combinação MRC é aplicado símbolo a símbolo. Para cada símbolo transmitido, estima-se (ou conhece-se, no contexto de simulação) o conjunto de ganhos de canal $\{h_i\}$ e são obtidas as sequências recebidas $\{r_i[n]\}$ em cada ramo. Em seguida, calcula-se o sinal combinado $y[n]$ de acordo com a expressão anterior. Esse sinal combinado, em banda base, é então encaminhado à cadeia de demodulação LoRa (de-chirp e FFT), empregada também no caso SISO.

4.2.7 Processo de Decodificação: De-Chirp, FFT e Detecção do Símbolo

O princípio de demodulação adotado é aplicar um processo de *de-chirp* seguido de uma FFT, de forma a converter o deslocamento em frequência característico de cada símbolo em um pico de energia localizado em uma das componentes espectrais discretas.

Considere o sinal recebido $r[n]$ na saída do canal *Rayleigh* com AWGN definido nas Subseções 4.2.4 e 4.2.5. No caso SISO, o primeiro passo da demodulação consiste em multiplicar esse sinal por um *chirp* de referência, normalmente escolhido como um *down-chirp* LoRa, que é

a forma de onda conjugada (ou inversa em frequência) do *chirp* utilizado na modulação. Essa operação de *de-chirp* pode ser descrita por

$$z[n] = r[n] c^*[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4.21)$$

em que $c[n]$ denota o chirp de referência e $(\cdot)^*$ representa o conjugado complexo.

Na sequência, o sinal de-espalhado $z[n]$ é submetido a uma transformada discreta de Fourier de tamanho N , implementada numericamente por meio da FFT. O resultado é um vetor de amostras espectrais

$$Z[k] = \sum_{n=0}^{N-1} z[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (4.22)$$

Sob a hipótese de sincronismo adequado e em condições de SNR moderadas, a maior parte da energia do símbolo de interesse concentra-se em um único bin de frequência, cujo índice está associado ao deslocamento em frequência aplicado na modulação e, portanto, ao índice do símbolo LoRa transmitido. O processo de detecção consiste, então, em localizar o bin de maior magnitude espectral,

$$\hat{m} = \arg \max_k |Z[k]|, \quad (4.23)$$

obtendo-se uma estimativa do índice do símbolo transmitido. Esse critério corresponde a uma detecção por máxima verossimilhança em um sistema com modulação ortogonal, sob a presença de ruído gaussiano.

No cenário SIMO, o procedimento de demodulação é análogo, com a diferença de que, antes da etapa de *de-chirp*, o receptor dispõe de um sinal combinado resultante da aplicação da técnica de MRC, conforme descrito na Subseção 4.2.6. A MRC produz um sinal

$$y[n] = \sum_{i=1}^{N_R} h_i^* r_i[n], \quad (4.24)$$

que apresenta SNR efetiva superior àquela observada em qualquer ramo individual. Esse sinal combinado $y[n]$ substitui o sinal $r[n]$ na cadeia de demodulação, sendo submetido às mesmas operações: multiplicação pelo chirp de referência, obtenção de $z[n] = y[n] c^*[n]$ e cálculo da FFT para determinação do espectro correspondente. A detecção do índice do símbolo estima então

$$\hat{m} = \arg \max_k |Z_{\text{SIMO}}[k]|, \quad (4.25)$$

em que $Z_{\text{SIMO}}[k]$ representa a transformada de Fourier do sinal combinado de-espalhado.

Uma vez obtida a estimativa \hat{m} do índice de símbolo, tanto no caso SISO quanto no SIMO, aplica-se o mapeamento inverso em relação ao descrito na Subsecção 4.2.2, recuperando-se a palavra binária estimada $\hat{\mathbf{b}}$ associada ao símbolo detectado. A comparação entre $\hat{\mathbf{b}}$ e a palavra originalmente associada ao símbolo transmitido permite contabilizar os erros em nível de bit em cada realização da simulação.

4.2.8 Cálculo da Taxa de Erros de Bit (BER)

Conforme o mapeamento em nível de bits apresentado na Subsecção 4.2.2, a cada símbolo LoRa transmitido associa-se uma palavra binária \mathbf{b} . E, após a passagem pelo canal e pelo processo de demodulação no receptor, obtém-se a palavra binária estimada $\hat{\mathbf{b}}$. A comparação entre as duas palavras binárias é feita símbolo a símbolo, por meio da contagem do número de posições em que os bits diferem, isto é, do número de erros de bit em cada realização:

$$e = \sum_{i=0}^{SF-1} \mathbb{1}\{b_i \neq \hat{b}_i\}, \quad (4.26)$$

em que $\mathbb{1}\{\cdot\}$ denota a função indicadora, que assume valor 1 quando a condição é verdadeira e 0 caso contrário. Esse valor e representa a distância de *Hamming* entre as duas palavras binárias e indica quantos bits foram detectados de forma incorreta naquele símbolo.

O simulador repete esse procedimento para um número fixo de símbolos N_{sym} em cada combinação de SNR e SF, acumulando o total de erros observados ao longo de todas as transmissões. O número total de bits transmitidos em cada condição é dado por

$$N_{\text{bits}} = SF \cdot N_{\text{sym}}, \quad (4.27)$$

em que cada símbolo representa SF bits de informação (conforme Subsecção 4.2.2).

A taxa de erro de bit é então estimada, para cada cenário, por

$$\text{BER}_{\text{SISO}} = \frac{E_{\text{SISO}}}{N_{\text{bits}}}, \quad \text{BER}_{\text{SIMO}} = \frac{E_{\text{SIMO}}}{N_{\text{bits}}}. \quad (4.28)$$

Essas expressões correspondem à definição empírica de BER, obtida a partir de simulações de Monte Carlo

Ao repetir esse processo para todos os valores de SNR e para cada SF considerado, são obtidas curvas de BER em função da SNR para os cenários SISO e SIMO.

4.2.9 Pós-Processamento: Interpolação da SNR para BER Alvo e Geração das Curvas

Concluída a etapa de simulação para todas as combinações de SNR e SF, obtêm-se, para cada cenário (SISO e SIMO), estimativas da BER associadas a um conjunto discreto de valores de SNR em dB. Esses resultados são organizados em vetores do tipo

$$\{\text{BER}_{\text{SISO}}(\text{SNR}_\ell)\}_{\ell=1}^L, \quad \{\text{BER}_{\text{SIMO}}(\text{SNR}_\ell)\}_{\ell=1}^L,$$

em que SNR_ℓ representa o ℓ -ésimo ponto de SNR simulado, e L é o número total de pontos na faixa considerada. O espaçamento entre os valores de SNR é uniforme, permitindo analisar a evolução da BER à medida que a relação sinal-ruído é aumentada.

Para possibilitar uma comparação mais precisa entre os cenários SISO e SIMO, foi estimado para cada SF, qual o valor de SNR necessário para atingir uma BER alvo, adotada neste trabalho como 10^{-2} . Como as simulações são realizadas em pontos discretos de SNR, essa informação não é necessariamente observada diretamente nos dados; em geral, a BER cruza o valor alvo entre dois pontos consecutivos da grade de SNR. Para contornar essa limitação, emprega-se um procedimento de interpolação linear entre os pontos adjacentes de SNR em que ocorre a mudança de regime em relação à BER alvo.

Mais especificamente, considera-se dois pontos consecutivos $\text{SNR}_{\ell-1}$ e SNR_ℓ tais que

$$\text{BER}(\text{SNR}_{\ell-1}) \geq 10^{-2} \quad \text{e} \quad \text{BER}(\text{SNR}_\ell) \leq 10^{-2},$$

indicando que a curva de BER cruza o nível 10^{-2} entre esses dois valores de SNR. Nessa situação, a SNR correspondente à BER alvo é aproximada por interpolação linear:

$$\text{SNR}_{\text{alvo}} \approx \text{SNR}_{\ell-1} + \frac{10^{-2} - \text{BER}(\text{SNR}_{\ell-1})}{\text{BER}(\text{SNR}_\ell) - \text{BER}(\text{SNR}_{\ell-1})} (\text{SNR}_\ell - \text{SNR}_{\ell-1}). \quad (4.29)$$

Além da interpolação, os resultados de BER são utilizados para a geração de curvas de desempenho BER versus SNR.

4.3 Execução das Simulações Paramétricas

A ferramenta desenvolvida foi testada para simular o enlace LoRa em diferentes cenários controlados. Para isso, foram realizadas diversas simulações variando sistematicamente os principais parâmetros do sistema, tais como a SNR, SF, o número de antenas receptoras e o modelo de canal considerado.

Em cada configuração, foram transmitidos múltiplos símbolos LoRa, permitindo a obtenção de estimativas estatisticamente representativas da BER. A análise do comportamento da BER em função dos parâmetros adotados possibilitou verificar a consistência do simulador, bem como observar o impacto das diferentes configurações e cenários de canal sobre o desempenho do sistema.

4.4 Validação do Simulador

A validação do simulador foi conduzida em duas etapas complementares, com o objetivo de garantir a correção da implementação antes de sua aplicação em cenários mais complexos.

Inicialmente, considerou-se um cenário simplificado, no qual o canal foi modelado apenas pelo ruído AWGN, com ganho unitário do canal ($h = 1$). Nesse contexto, aplicou-se a técnica de combinação por máxima razão (MRC) em configurações SIMO, variando o número de antenas receptoras. Essa etapa teve como finalidade verificar se o simulador reproduzia corretamente o ganho teórico de diversidade, esperado de acordo com a expressão $10\log_{10}(N)$, em que N representa o número de antenas. A concordância entre os resultados obtidos e a tendência teórica serviu como validação inicial do modelo de recepção e da implementação da técnica de combinação.

Após essa verificação preliminar, o simulador foi estendido para incluir o desvanecimento *Rayleigh*, modelando cenários de propagação mais realistas. Nesse segundo estágio, os resultados obtidos foram comparados com aqueles reportados na literatura especializada, em particular com o trabalho que analisa o desempenho da modulação LoRa sob diversidade espacial e canais com desvanecimento. Essa comparação permitiu avaliar se o comportamento estatístico do sistema simulado estava alinhado com os resultados já consolidados, reforçando a confiabilidade do simulador.

A partir dessas duas frentes de validação, concluiu-se que o simulador apresenta comportamento adequado para o estudo comparativo de técnicas de diversidade espacial em sistemas LoRa.

5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com a ferramenta computacional desenvolvida. O foco inicial foi validá-la por meio da expressão teórica de ganho por diversidade $10\log_{10}(N)$, à procura do melhor caso possível para conexões LoRa, de acordo com o que foi encontrado na literatura. Após isso, na segunda etapa, a análise foi feita com base nas simulações do artigo *Performance Improvement of LoRa Modulation with Signal Combining and Semi-Coherent Detection*.

5.1 Resultados no canal AWGN

Para essa validação inicial, as simulações foram realizadas considerando somente o canal AWGN e foi aplicada a combinação MRC, variando o número de antenas receptoras na configuração SIMO. O objetivo foi garantir que os resultados obtidos pela ferramenta acompanhassem a tendência teórica esperada, validando assim sua implementação antes de avançar para cenários mais complexos, como canais com desvanecimento *Rayleigh*.

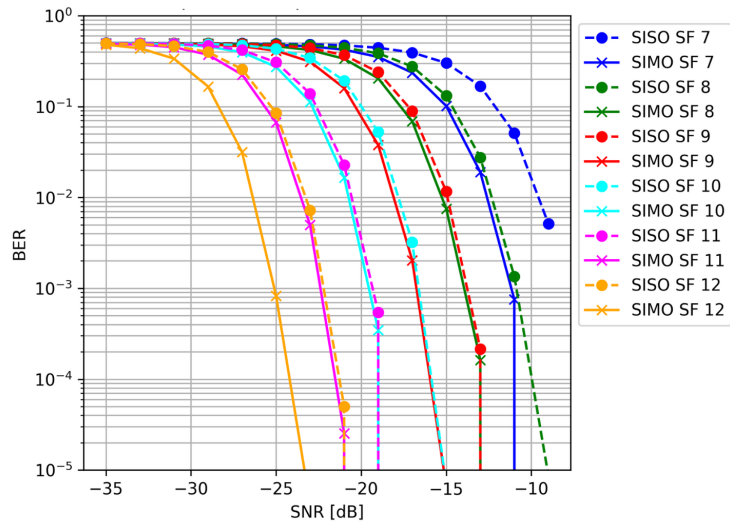
A Figura 6 apresenta as curvas de BER em função da SNR para diferentes SF, comparando os casos SISO e SIMO com duas antenas. É possível notar que, para todos os valores de SF, a adição de uma segunda antena resulta em uma melhoria significativa na BER, deslocando as curvas para a esquerda. A Tabela 2 ajuda na análise do gráfico, pois mostra os valores de SNR quando a BER atinge 10^{-2} e, a partir disso, é perceptível que esse comportamento é consistente com o ganho teórico esperado pela expressão $10\log_{10}(N)$, que prevê um ganho de aproximadamente 3 dB ao duplicar o número de antenas.

Tabela 2 – SNR estimado para $BER = 10^{-2}$, com SIMO 1x2.

SF	SISO	SIMO	Ganho
7	-9,21 dB	-12,01 dB	2,80 dB
8	-11,66 dB	-15,08 dB	3,42 dB
9	-14,72 dB	-17,45 dB	2,73 dB
10	-17,28 dB	-20,19 dB	2,91 dB
11	-19,85 dB	-23,16 dB	3,31 dB
12	-23,07 dB	-25,60 dB	2,53 dB

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 6 – Desempenho da BER no canal AWGN para a configuração SIMO com $N = 2$.

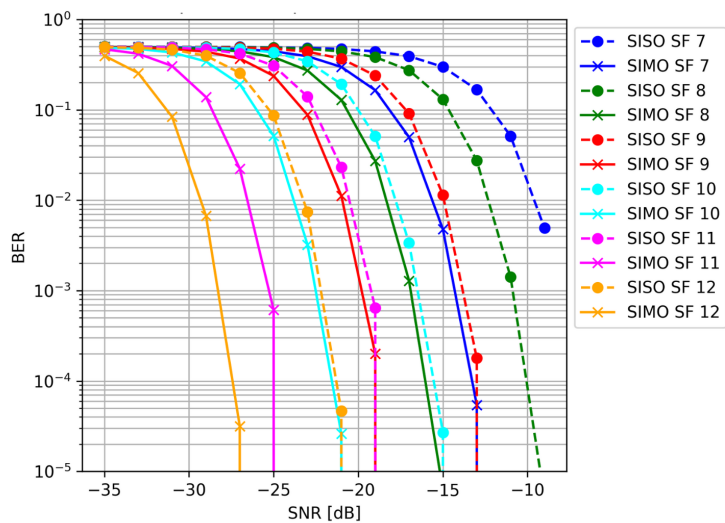


Fonte: Elaborada pela autora.

As Figuras 7 e 8 ilustram o mesmo cenário de simulação, agora considerando configurações com 5 e 8 antenas receptoras, respectivamente. Em ambos os casos, observa-se uma melhoria contínua da performance à medida que o número de antenas receptoras N aumenta, o que valida a tendência teórica de ganho por diversidade.

A partir das Tabelas 3 e 4, verifica-se que, para $N = 5$, o ganho médio de SNR é da ordem de $10\log_{10}(5) \approx 7$ dB, enquanto para $N = 8$ esse ganho se aproxima de 9 dB, em concordância com a previsão teórica.

Figura 7 – Desempenho da BER no canal AWGN para a configuração SIMO com $N = 4$.

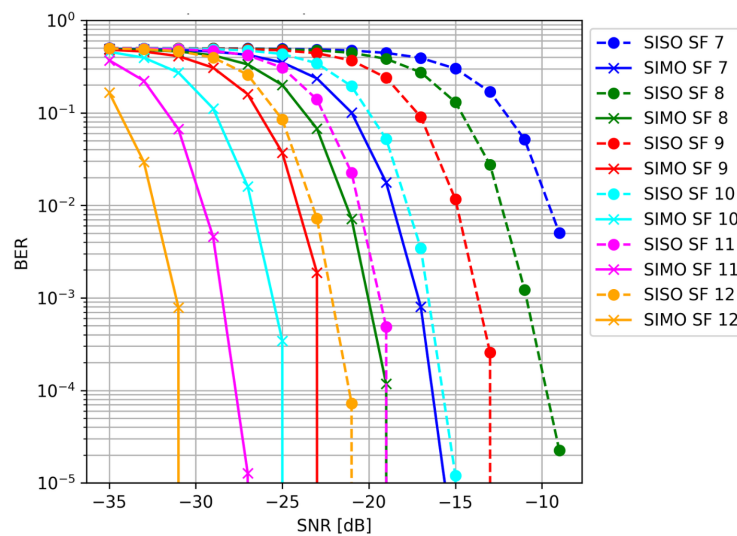


Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 3 – SNR estimado para $BER = 10^{-2}$, com SIMO 1x4.

SF	SISO	SIMO	Ganho
7	-9,22 dB	-15,23 dB	6,01 dB
8	-11,66 dB	-17,67 dB	6,01 dB
9	-14,75 dB	-20,78 dB	6,03 dB
10	-17,28 dB	-23,28 dB	6,00 dB
11	-19,83 dB	-25,86 dB	6,03 dB
12	-23,07 dB	-29,08 dB	6,01 dB

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 8 – Desempenho da BER no canal AWGN para a configuração SIMO com $N = 8$.

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 4 – SNR estimado para $BER = 10^{-2}$, com SIMO 1x8.

SF	SISO	SIMO	Ganho
7	-9,21 dB	-18,09 dB	8,88 dB
8	-11,67 dB	-21,09 dB	9,42 dB
9	-14,72 dB	-23,46 dB	8,74 dB
10	-17,27 dB	-26,23 dB	8,96 dB
11	-19,86 dB	-29,17 dB	9,31 dB
12	-23,07 dB	-31,64 dB	8,57 dB

Fonte: Elaborada pela autora.

Além desses testes, foram realizadas simulações no mesmo cenário, porém considerando diferentes configurações de antenas no receptor. Em todos os casos, os resultados obtidos no canal AWGN confirmam que a combinação MRC em configuração SIMO proporciona um ganho de diversidade consistente com a previsão teórica dada por $10\log_{10}(N)$.

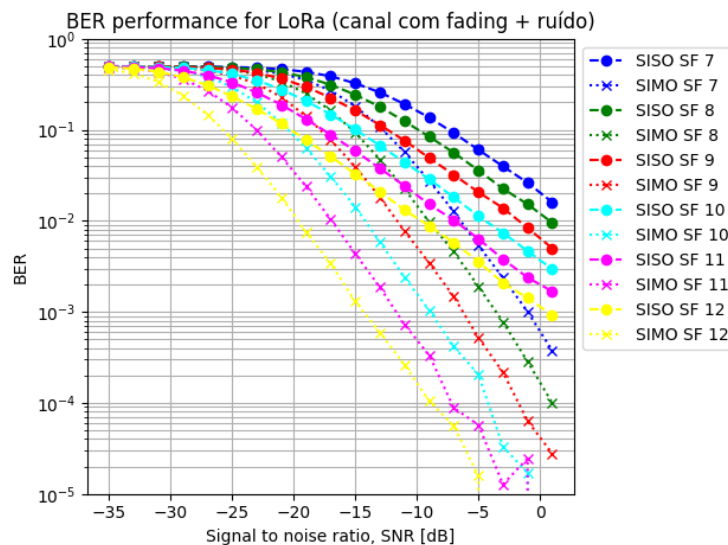
Observa-se que o aumento do número de antenas desloca sistematicamente as curvas

de BER para menores valores de SNR, sem alterar o comportamento global das curvas para diferentes SF, o que reforça a coerência da implementação do simulador. Assim, esta etapa valida a ferramenta em um cenário controlado e fornece base para a extensão das análises a ambientes mais realistas, como o desvanecimento *Rayleigh*.

5.2 Resultados no canal Rayleigh

Após a validação inicial em canal AWGN, os testes foram feitos para o canal *Rayleigh*, simulando cenários reais de propagação sem fio. A combinação MRC foi mantida e os testes foram realizados novamente para diferentes números de antenas na configuração SIMO, como visto na Figura 9.

Figura 9 – Desempenho da BER no canal Rayleigh para a configuração SIMO com $N = 2$.



Fonte: Elaborada pela autora.

Diferentemente do comportamento observado no canal AWGN, os resultados no canal *Rayleigh* não seguiram a expressão teórica de ganho por diversidade $10\log_{10}(N)$ e o ganho obtido nas simulações foi superior ao previsto teoricamente.

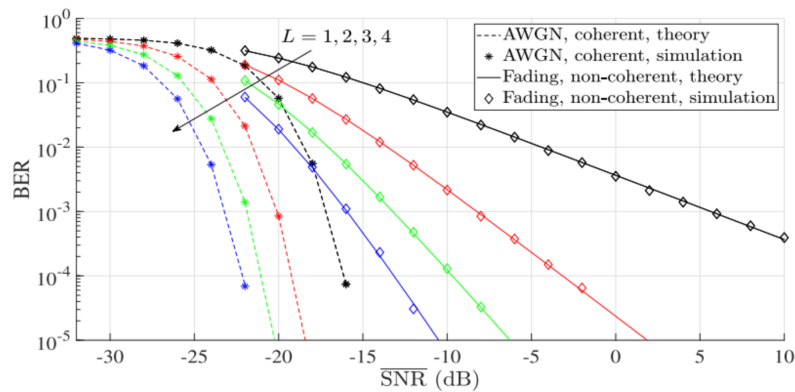
No entanto, esse comportamento está de acordo com o que foi apresentado na Figura 4, extraída do artigo *Performance Improvement of LoRa Modulation with Signal Combining and Semi-Coherent Detection* (Nguyen *et al.*, 2021).

Para uma melhor análise, foram feitas algumas simulações na ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho com os mesmos parâmetros e configurações das simulações mostradas no artigo. Ressalta-se que, no artigo, o parâmetro L representa o número de ramos/an-

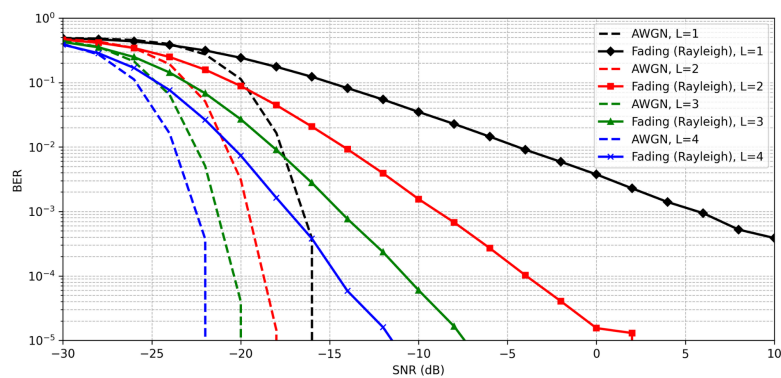
tenas receptoras utilizados na combinação, sendo equivalente ao parâmetro N adotado neste TCC para indicar a quantidade de antenas no receptor.

Abaixo, nas Figuras 10a e 10b, é possível ver os resultados obtidos. Observa-se que, apesar de pequenas diferenças numéricas, os gráficos apresentam comportamento qualitativamente semelhante, tanto no formato das curvas quanto na tendência de deslocamento à medida que o número de antenas receptoras aumenta.

Figura 10 – Comparação entre os resultados em (a) simulação do artigo e (b) simulação própria.



(a) BERs de detecção coerente em um canal AWGN e detecção não coerente em um canal com desvanecimento Rayleigh: SF = 10 e L = 1, 2, 3, 4.

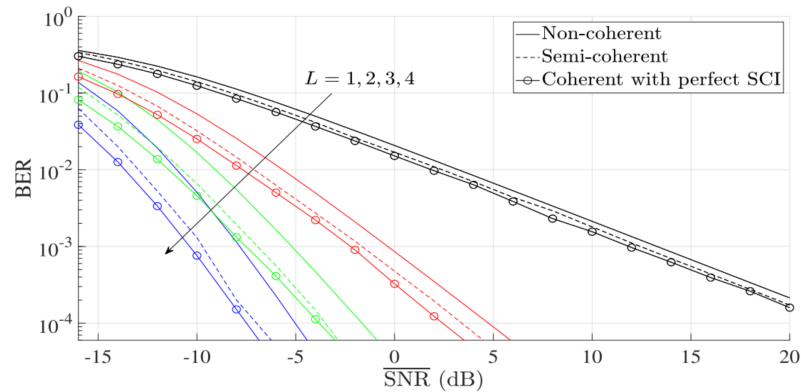


(b) Simulação com canais AWGN e Rayleigh para SF = 10 e L = 1, 2, 3, 4.

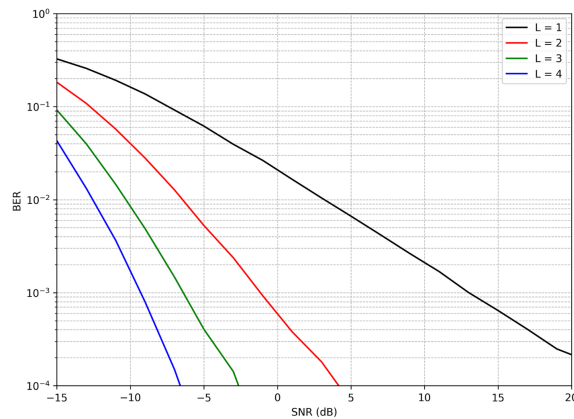
Fonte: Elaborada pela autora.

Outra simulação para comparação com os resultados do artigo, está sendo mostrada na Figura 11a e 11b logo abaixo.

Figura 11 – Comparação entre os resultados em (a) simulação do artigo e (b) simulação própria.



(a) Comparação de desempenho BER entre a detecção coerente, detecção não coerente e detecção semi-coerente em canais com desvanecimento Rayleigh para SF = 7 e L = 1, 2, 3, 4.



(b) Simulação com canais AWGN e Rayleigh para SF = 7 e L = 1, 2, 3, 4.

Fonte: Elaborada pela autora.

Em ambos os casos, nota-se que a presença do desvanecimento *Rayleigh* acentua os ganhos proporcionados pela diversidade espacial quando comparados ao cenário puramente AWGN. Assim, mesmo que a expressão clássica $10\log_{10}(N)$ não descreva com exatidão o deslocamento observado nas curvas, esse resultado já é esperado em canais com desvanecimento: como o ganho instantâneo do canal varia aleatoriamente, a combinação por diversidade tende a reduzir a probabilidade de ocorrências de desvanecimento profundo e, conseqüentemente, melhora o desempenho de forma mais pronunciada do que no caso apenas AWGN, conforme evidenciado no artigo de referência.

Além disso, observa-se que as curvas obtidas neste trabalho apresentam um leve deslocamento para a direita em relação às curvas do artigo, correspondente a uma diferença

mínima da ordem de 1 dB. Apesar dessa pequena discrepância, a separação entre as curvas para diferentes números de antenas — isto é, o ganho relativo proporcionado pelo aumento de N — mantém a mesma tendência, indicando consistência dos resultados em termos de ganho por diversidade.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um simulador de enlace LoRa voltado à análise de diversidade espacial e combinação de sinais no receptor. Inicialmente, as simulações foram conduzidas em canal AWGN, por se tratar de um cenário controlado que permite isolar o efeito do ruído e verificar a coerência da implementação. Nessa etapa, observou-se que o aumento do número de antenas desloca sistematicamente as curvas de BER para menores valores de SNR, em concordância com a tendência teórica de ganho por diversidade.

Após essa validação, o modelo foi estendido para incluir desvanecimento *Rayleigh*. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância qualitativa com o comportamento reportado na literatura, indicando que o simulador é capaz de reproduzir adequadamente os efeitos do desvanecimento e da diversidade espacial em sistemas LoRa. Observou-se apenas um leve deslocamento das curvas em SNR (da ordem de 1 dB) em relação ao artigo de referência; ainda assim, o formato das curvas, a tendência de melhoria com o aumento do número de antenas e os ganhos relativos por diversidade permaneceram consistentes. Dessa forma, considera-se que o simulador está validado para análises comparativas em nível de enlace.

Como trabalhos futuros, pretende-se incorporar os resultados do simulador de enlace em um simulador sistêmico, permitindo avaliar o impacto das técnicas de diversidade em cenários de rede mais realistas, considerando múltiplos dispositivos, interferência, tráfego simultâneo e entre outras métricas. Além disso, prevê-se realizar refinamentos no simulador de enlace com o objetivo de reduzir o deslocamento observado e aproximar ainda mais os resultados numéricos daqueles reportados na literatura.

REFERÊNCIAS

- ALOUINI, M.-S.; GOLDSMITH, A. J. Capacity of mrc diversity systems over generalized fading channels. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 48, n. 4, p. 1151–1161, 1999.
- 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. 397–404, 2021.
- CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.
- CORPORATION, S. **LoRa and LoRaWAN: A technical overview**. 2020. Disponível em: <https://www.semtech.com/lora>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- GEORGIU, O.; RAZA, U. Low power wide area network analysis: Can lora scale? **IEEE Wireless Communications Letters**, 2017. ArXiv:1610.04793. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1610.04793>. Acesso em: 17 nov. 2025.
- MARQUES, D. G.; ZANONI, M. V. B.; JR., R. T. S. **Comunicação sem Fio: Princípios e fundamentos**. [S. l.]: LTC, 2010.
- NASCIMENTO, V. H.; AGUIAR, E. P. **Sistemas de Comunicação sem Fio**. 2. ed. [S. l.]: Editora Érica, 2016.
- NGUYEN, T. K.; NGUYEN, H. H.; BEDEER, E. Performance improvement of lora modulation with signal combining and semi-coherent detection. **arXiv preprint arXiv:2102.11509**, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2102.11509>. Acesso em: 20 maio 2025.
- NS-3 Consortium. **NS-3 Network Simulator**. 2024. Disponível em: <https://www.nsnam.org/>. Acesso em: 20 maio 2025.
- PAULRAJ, A.; GORE, D.; NABAR, R.; BOLCSKEI, H. An overview of mimo communications: A key to gigabit wireless. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 92, n. 2, p. 198–218, 2004.
- PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Digital Communications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- RENZO, M. D.; DARDARI, D.; DECARLI, N. Los mimo-arrays vs. los mimo-surfaces. **arXiv preprint arXiv:2210.08616v2**, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2210.08616>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- Semtech Corporation. **LoRa Technology Overview**. 2023. Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Acesso em: 20 maio 2025.
- SILVA, I. V. S.; BANDEIRA, C. I. R.; STANCANELLI, E. M. G.; FILHO, F. H. C. dos S.; RÊGO, L. G. C.; AGUILAR, P. A. C. **Conectividade para Coleta de Dados em Estações Meteorológicas**. Quixadá, CE, Brasil: [S. n.], 2024. Disponível em: <https://eventos.ufc.br>. Acesso em: 08 maio 2025.
- SIMON, M. K.; ALOUINI, M.-S. Digital communication techniques for fading channels. **Handbook of RF and Wireless Technologies**, Elsevier, p. 3–23, 2005.

SKLAR, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems .i. characterization. **IEEE Communications Magazine**, v. 35, n. 7, p. 90–100, 1997.

ZANELLA, A.; BUI, N.; CASTELLANI, A.; VANGELISTA, L.; ZORZI, M. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.