



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Lucian Morais Ribeiro

Modelo de Propagação Usando Dois Raios Com Modificação De Fase Para Mobilidade Aplicado a Receptor LoRa Sobre Rio

Belém

2024

DM 22/2024

Lucian Morais Ribeiro

**Modelo de Propagação Usando Dois Raios Com
Modificação De Fase Para Mobilidade Aplicado a
Receptor LoRa Sobre Rio**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Telecomunicações.

Universidade Federal do Pará

Orientador: José Fabrício Brito Barros

Belém

2024

DM 22/2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R484m RIBEIRO, LUCIAN.
Modelo de Propagação Usando Dois Raios Com Modificação
De Fase Para Mobilidade Aplicado a Receptor LoRa Sobre Rio /
LUCIAN RIBEIRO. — 2024.
52 f.

Orientador(a): Prof. Dr. José Fabrício Barros
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2024.

1. IoT. 2. LoRa. 3. Região Amazônica. 4. Modelo de
Propagação. I. Título.

CDD 621.3

Lucian Morais Ribeiro

Modelo de Propagação Usando Dois Raios Com Modificação De Fase Para Mobilidade Aplicado a Receptor LoRa Sobre Rio

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Telecomunicações.

Conceito: _____

Belém, 19 de Setembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

José Fabrício Brito Barros - Orientador
UFPA

Jasmine Priscyla Leite de Araújo
UFPA

Marcos César da Rocha Seruffo
UFPA

Leslye Estefânia Castro Eras
UNIFESSPA

À Julia Morais, minha primeira amiga, mãe e maior incentivadora.

Agradecimentos

Como todas as conquistas que uma pessoa obtém na vida, a conclusão desta dissertação só foi possível graças ao empenho de muitos. Desde os esforços das professoras do ensino fundamental, especialmente as professoras Jurema e Maria José, que tiveram a oportunidade de dizer à minha mãe que eu era muito inteligente, mas “bocudo” demais para a minha idade, até o apoio constante da minha saudosa avó Luzia, que sempre foi um pilar fundamental em todas as minhas empreitadas. Entretanto, para que a lista não se torne longa e o leitor possa rapidamente adentrar nas maravilhas que esta dissertação apresenta, cito aqui aqueles que tiveram uma ajuda mais direta na conclusão deste trabalho.

Primeiramente, um agradecimento especial à minha mãe, Julia Morais, que tem sido minha maior incentivadora no âmbito educacional desde tempos imemoriais. Também agradeço à minha noiva, Jessica Freitas, pela paciência e pelo apoio moral e manual, tendo ela, em determinado momento, arregaçado as mangas e me ajudado nas campanhas de medição.

Agradeço também aos nobres Alan Breno, Douglas Menezes, Klesson de Oliveira, Renata Rocha e Guilherme Gustavo (conhecido como Henrique), que estiveram presentes nas campanhas de medição, cedendo seu tempo, energia e saúde para a coleta dos dados.

Um agradecimento especial aos engenheiros Mozart Malaquias e Caio Cardoso, que, mais do que serem os pilotos das campanhas de medição, foram as primeiras linhas de apoio nos momentos de desafios teóricos e os primeiros a ouvirem minhas lamentações. A amizade de vocês, meus nobres, não tem preço.

Agradeço enormemente ao meu orientador, Fabrício Barros, idealizador do projeto, que, em momentos críticos, demonstrou sua expertise e apresentou soluções inesperadas. Também tem sido um incentivador ímpar ao conseguir extrair de mim resultados concretos que eu não esperava alcançar no início da minha vida acadêmica. Que o futuro nos traga mais projetos juntos.

Por fim, sempre há a possibilidade de esquecermos de algum nome que simplesmente não veio à mente no dia em que escrevemos esta página, que normalmente marca o fim de um ciclo, e por tanto é um texto escrito com cansaço. Caso você, leitor, seja um desses esquecidos que, apesar de não mencionado, acha que também merece um agradecimento, meu muito obrigado.

*“No trabalho de pesquisa como eu concebo,
muitas vezes é necessário se sentir
burro, incapaz, incompetente e idiota”
(Pierre Bourdieu)*

Resumo

Conforme previsto por especialistas, houve um crescimento exponencial no número de dispositivos IoT utilizados pela população em geral. Entre esses dispositivos, um dos grupos mais notáveis é o dos dispositivos Long Range (LoRa). A característica mais relevante da tecnologia LoRa é o baixo consumo de energia, ao mesmo tempo em que proporciona uma ampla área de cobertura. Essa tecnologia, se aplicada na região amazônica – uma área densamente arborizada, úmida, com populações afastadas dos centros urbanos e com infraestrutura muito limitada – pode oferecer uma nova gama de serviços aos habitantes da região, incluindo serviços que envolvem comunicação em movimento. Partindo do princípio de que os modelos de propagação mais conhecidos não estão ajustados às especificidades da região amazônica, nem consideram as variações de fase ocasionadas pela movimentação do receptor – o que torna os enlaces de rádio de difícil predição –, este trabalho visa apresentar soluções para esse problema, propondo ajustes no modelo de perda de propagação de Dois Raios para atender comunicações LoRa sobre os rios amazônicos, quando os dispositivos receptores estão em movimento. O modelo proposto é comparado com o Modelo de Dois Raios padrão, que serve de base, e apresenta resultados superiores. Além disso, o trabalho avalia o impacto das marés na perda de propagação dos sinais LoRa em ambientes fluviais.

Palavras-chave: IoT, LoRa, Região Amazônica, Modelo de Propagação.

Abstract

As predicted by experts, there has been exponential growth in the number of IoT devices used by the general population. Among these devices, one of the most notable groups is the Long Range (LoRa) devices. The most relevant feature of LoRa technology is its low energy consumption, while simultaneously providing a wide coverage area. If applied in the Amazon region – a densely forested, humid area with populations far from urban centers and with very little infrastructure – this technology could offer a new range of services to the region’s inhabitants, including services involving communication on the move. Starting from the principle that the most well-known propagation models are not adjusted to the specificities of the Amazon region, nor do they consider the phase variations caused by receiver movement – which makes radio links difficult to predict – we aim to present solutions to this problem through this work, which presents adjustments to the Two-Ray propagation loss model to accommodate LoRa communications over the Amazon rivers when the receiving devices are in motion. The proposed model is compared to the standard Two-Ray Model, which serves as the baseline, and achieves better results. Additionally, the study evaluates the impact of tides on the propagation loss of LoRa signals in river environments

Keywords: IoT. LoRa. Amazon River. Propagation Model

Lista de ilustrações

Figura 1.	Ilustração do sinal LoRa Up-Chirp	22
Figura 2.	Exemplo de raios refletidos e transmitidos	27
Figura 3.	Modelo de propagação sobre terra plana	28
Figura 4.	Modelo de Dois Raios em Polarização Horizontal e Vertical	31
Figura 5.	Metodologia de medição	33
Figura 6.	Setup de recepção e transmissão montados	34
Figura 7.	Percurso do VANT sobre o rio	35
Figura 8.	Ilustração da metodologia	36
Figura 9.	Exemplo de ângulos θ_1 e θ_2	38
Figura 10.	Comparativo de cálculo da defasagem de fase para MDR-MF e MDR	39
Figura 11.	Comparativo de cálculo da defasagem de fase para MDR-MF e MDR	40
Figura 12.	Metodologia de análise do MDR-MF	40
Figura 13.	Médias dos dados medidos para diferentes polarizações	43
Figura 14.	Comparativo do impacto dos diferentes SFs no sinal recebido	43
Figura 15.	Médias dos dados medidos para diferentes alturas de marés	44
Figura 16.	Defasagem das componentes SF7 VV em préiamar e baixamar	45
Figura 17.	Comparativo dos resultados Para SF7	47
Figura 18.	Comparativo dos resultados Para SF12	47

Lista de tabelas

Tabela 1.	Tabela Resumo com os trabalhos correlatos apresentados	19
Tabela 2.	Parâmetros da rede LoRa para a largura de banda 125 kHz e diferentes valores de SF.	24
Tabela 3.	Configurações utilizadas na transmissão	35
Tabela 4.	Quantidades de medições por SF e por maré	37
Tabela 5.	Tabela exemplar de Cálculo de Valores Médios da Velocidade em m/s .	41
Tabela 6.	Valores das Médias e Desvio Padrão das medições em dB	46
Tabela 7.	Valores Médios de perda de pacote	46
Tabela 8.	Valores Médios de RMSE das medições para SF7 e SF12 em dB	48

Lista de abreviaturas e siglas

ECS	Emergency Communications System
ESP	Expected Signal Power
GSM	Global System for Mobile
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LCT	Laboratório de Computação e Telecomunicações da UFPA
LoRa	Long Range
LoS	Line of Sight
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long-term evolution
MDR	Modelo de Dois Raios
MDR-MF	Modelo de Dois Raios com Mudança de Fase
NB-IOT	Narrowband IoT
PL	Path Loss
RMSE	Root Mean-Square Error
SF	Spreading Factor
UFPA	Universidade Federal do Pará
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Objetivos Gerais	15
1.3	Objetivos Específicos	15
1.4	Trabalhos Correlatos	15
1.4.1	Contextualização do Tema	15
1.4.1.1	Modelos de Propagação	16
1.5	Motivação	19
1.6	Estrutura do Trabalho	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Tecnologia LoRa	21
2.1.1	Modulação LoRa	21
2.2	Radio Propagação	24
2.2.1	Modelos Teóricos	24
2.2.2	Modelos Empíricos	25
2.2.2.1	Modelo de propagação no Espaço Livre em Larga Escala	25
2.2.3	Mecanismos de Propagação	26
2.2.3.1	Reflexão	26
2.2.3.2	Difração	26
2.3	Relação de Potência com Campo Elétrico	27
2.4	Modelo de dois raios	28
2.4.1	O Coeficiente de reflexão	30
2.5	Fórmula de Haversine	30
2.6	Calculo de Diferença de Fase em Radianos	31
2.7	Root Mean Square Error (RMSE)	32
3	METODOLOGIA	33
3.1	Considerações Iniciais	33
3.2	Coleta de Dados	34
3.2.1	Equipamentos e Configurações	34
3.2.2	Cenário	34
3.2.3	Metodologia de Coleta de Dados	35
3.2.4	Pré-processamento de dados	37
3.2.5	Processamento de dados	37
3.2.5.1	Modelo de Dois Raios com Mudança de Fase (MDR-MF)	38

3.2.5.2	Calculo da defasagem de fase das componentes em MDR-MF	39
3.2.5.3	Calculo da velocidade do MDR-MF	39
4	RESULTADOS	42
4.1	Considerações iniciais	42
4.2	Análise dos impactos da Maré e dos fatores de espalhamento na propagação do sinal	42
4.2.1	O impacto das polarizações no <i>Path Loss</i>	42
4.2.2	Análise do Impacto dos SFs	42
4.2.3	O impacto da variação da maré e polarização das antenas	44
4.3	Resultados do Modelo Proposto	46
5	CONCLUSÃO	49
5.1	Trabalhos Futuros	49
	REFERÊNCIAS	50

1 Introdução

1.1 Contextualização

O rápido desenvolvimento de várias aplicações de Internet das Coisas (IoT) criou a necessidade de tecnologias sem fio que possam fornecer uma grande área de cobertura de maneira eficaz em termos de custos. Tecnologias de comunicação conhecidas como Low Power Wide Area Network (LPWAN) surgiram como uma alternativa viável às redes celulares para atender a essas necessidades.

As LPWANs são projetadas para preencher a lacuna entre redes de curto alcance e alta largura de banda (por exemplo, Bluetooth, WiFi e ZigBee) e redes celulares (por exemplo, GSM e LTE) (XU, 2020). Muitas aplicações de LPWAN estão provando sua eficiência de custo e adequação a aplicações de IoT em grande escala. Exemplos de tecnologias LPWAN incluem Long Range (LoRa) (LORA, 2023), Sigfox (SIGFOX, 2023) e Narrowband IoT (NB-IoT) (U-BLOX, 2023).

Entre essas tecnologias concorrentes de LPWAN, o LoRa tem atraído atenção principalmente porque oferece conectividade acessível a dispositivos de baixa potência distribuídos por áreas geográficas extensas. O uso de dispositivos LoRa cresceu rapidamente, atraindo grande atenção nos últimos anos, e diversas pesquisas foram realizadas em ambientes *outdoor* para entender o desempenho da tecnologia LoRa, como visto em (HAXHIBEQIRI INGRID MOERMAN, 2019).

A tecnologia LoRa tem sido empregada em sistemas de comunicação de emergência (ECS, na sigla em inglês) em áreas remotas, onde não há cobertura celular (SCIULLO ANGELO TROTTA, 2020b). Tais aplicações já foram estudadas em regiões tropicais (GUTIÉRREZ-GÓMEZ VÍCTOR RANGEL, 2021) e seriam de grande utilidade em áreas ribeirinhas, como as encontradas na Amazônia. Para o melhor desenvolvimento dessas aplicações, assim como de outras na região, é necessário o estudo de modelos de propagação utilizando essa tecnologia.

Além disso, o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), em conjunto com dispositivos IoT, tem se mostrado uma solução eficiente para diversas aplicações em regiões de floresta, devido à queda dos custos dos dispositivos IoT e à crescente autonomia dos VANTs (BUSHNAQ OSAMA M.; AL-NAFFOURI., 2021).

Entretanto, em contextos em que o receptor está em movimento, a mobilidade afeta as características do sinal recebido (GOVINDAN K. ZENG, 2011). Portanto, para entender o desempenho das redes de comunicação que utilizam VANTs, foco deste trabalho, é necessário considerar o efeito da mobilidade nos receptores (ALTAF C. YUNFEI, 2020).

Motivado pelo que foi exposto acima, o presente trabalho propõe-se a apresentar um modelo de propagação, baseado na tecnologia LoRa auxiliada por VANTs, aplicado a receptores em movimento (considerando, portanto, a variação de fase ocasionada pela movimentação do receptor), que seja adequado à região do Rio Guamá, no trecho entre a UFPA e a ilha do Combú.

1.2 Objetivos Gerais

O objetivo geral deste trabalho é criar um modelo de propagação para dispositivos LoRa, utilizando a frequência de 915 MHz, aplicado à região do Rio Guamá, especificamente no trecho entre a UFPA e a ilha do Combú, onde os dispositivos receptores estarão em movimento sobre a região fluvial, ou seja, quando os receptores estiverem sobre o rio; para isso, serão realizadas medições para coletar dados referentes à propagação do sinal LoRa, e, com base nos dados coletados, será analisado o impacto da mudança de fase ocasionada pelo deslocamento dos dispositivos receptores em diferentes momentos da tábua de marés.

1.3 Objetivos Específicos

- Realizar campanhas de medições utilizando a tecnologia LoRa operando na frequência de 915 MHz em ambiente pluvial amazônico considerando visada direta em SF7 e SF12.
- Apresentar modelo de propagação, utilizando dados medidos, aplicável à região do Rio Guamá em preia mar e baixa mar.
- determinar o impacto da altura da maré nas comunicações móveis LoRa.
- Utilizando os dados medidos desenvolver Modelo de Perda de Propagação para Dois Raios com Modificação de Fase para Mobilidade.

1.4 Trabalhos Correlatos

Nesta seção serão apresentados trabalhos que se correlacionam ou foram utilizados como base para elaboração deste trabalho, onde investigam modelos propagação com tecnologia LoRa e modelos de propagação baseado em mobilidade, com o objetivo de contextualizar a contribuição desta dissertação.

1.4.1 Contextualização do Tema

Atualmente, há um grande número de pesquisas envolvendo modelos de propagação para dispositivos LoRa, tanto em ambientes *outdoor* quanto em ambientes *indoor*. Também

existem diversas pesquisas que estudam os modelos de propagação para dispositivos LPWAN em função das marés.

No entanto, esse número diminui consideravelmente quando esses estudos são aplicados a regiões de clima tropical. De fato, até junho de 2024, utilizando como critério de busca artigos de Qualis A1 publicados entre 2018 e 2024, disponíveis no Portal de Periódicos da Capes, havia apenas um único artigo disponível que atendesse a combinação desses dois critérios: o impacto das variações das marés nos modelos de propagação para dispositivos LPWAN em ambientes tropicais.

Além disso, seguindo os mesmos critérios de busca, não foi possível encontrar nenhuma pesquisa que abordasse o impacto do deslocamento de receptores LoRa em distâncias inferiores a 2 km.

A seguir, são discutidos os trabalhos mais relevantes, de acordo com os critérios apresentados – artigos de Qualis A1 publicados entre 2018 e 2024, disponíveis no Portal de Periódicos da Capes.

1.4.1.1 Modelos de Propagação

Em (HWANG CHAO-SHUN CHEN, 2019), os autores utilizam conceitos teóricos para desenvolver um modelo de canal LoRa que considera a atenuação da propagação, o efeito de sombreamento e o desvanecimento por multipercursos. O modelo teórico é utilizado para desenvolver um aplicativo capaz de estimar a distância de transmissão na comunicação LoRa.

Para verificar a viabilidade deste aplicativo, experimentos foram realizados com diferentes parâmetros de ambiente e transmissão. Cada experimento forneceu uma taxa de erro de pacotes (PER) para a comunicação entre dois nós. A taxa de erro de pacotes foi obtida por meio de medições, enquanto a distância entre os nós foi estimada teoricamente.

Os resultados da pesquisa mostram que três fatores afetam o desempenho do LoRa, sendo a distância o principal fator. Os outros dois fatores são os obstáculos e o ruído, ambos introduzidos de maneira aleatória.

Em (GUTIÉRREZ-GÓMEZ A.; RANGEL, 2021), os autores trabalham com comunicações IoT LoRa usando a banda industrial, científica e médica (ISM) de 915 MHz. Nesta pesquisa, são estudadas as características de propagação dos sinais de rádio chirp LoRa próximos e sobre a água em uma região de vegetação tropical.

Como estudo de caso, foi utilizado o Rio Colima, no México, e desenvolvido um sistema de medição de IoT ponto a ponto, que não requer decodificação das transmissões proprietárias LoRa, e fornece perfis de potência versus distância ao longo da zona fluvial de uma montanha com queda acentuada.

Um sistema foi utilizado para obter as medições relatadas no trabalho, que foram posteriormente analisadas e modeladas. Os resultados mostraram que a propagação do sinal LoRa sobre a água exibe uma distribuição log-normal.

Como resultado do processamento do sinal chirp, dois novos modelos experimentais de perda de propagação são apresentados. Os resultados indicaram uma considerável degradação da potência do sinal recebido sobre a água dentro da vegetação, e menos degradação em antenas posicionadas mais próximas da superfície da água.

Em (PARRI L.; PARRINO, 2019), os autores discutem a implementação de uma infraestrutura LoRaWAN para atividades de monitoramento em ambiente marinho. São analisados os alcances de transmissão e parâmetros como SNR e RSSI, em um cenário específico de uma planta industrial de aquicultura. A comunicação foi configurada de uma estrutura de monitoramento marítima, equipada com um transmissor LoRaWAN, para um receptor em terra composto por dois Gateways LoRaWAN.

Foi realizada uma análise teórica sobre a viabilidade da transmissão, e o desempenho do sistema foi medido usando diferentes parâmetros de rede, especialmente o Fator de Espalhamento (SF) e duas alturas diferentes para a antena transmissora.

Os resultados dos testes mostraram que é possível alcançar a transmissão eficiente de dados a uma distância de 8,33 km, mesmo nas piores configurações de rede.

Em (CHALL RIDA; HELOU, 2019), o canal de rádio LoRaWAN foi investigado na banda de 868 MHz. Foram realizadas campanhas de medição em ambientes *indoor* e *outdoor* em locais urbanos e rurais no Líbano (campus da Universidade Saint Joseph de Beirute).

Com base nos resultados empíricos, foram desenvolvidos modelos de perda de propagação para comunicações LoRaWAN, que foram comparados com modelos amplamente utilizados. Além disso, o desempenho e a cobertura da rede LoRaWAN foram avaliados com base em medições reais.

Os resultados mostram que os modelos de *Path Loss* (PL) propostos são precisos e simples de aplicar no Líbano e em regiões semelhantes. Coberturas de 8 km em áreas urbanas e 45 km em áreas rurais foram obtidas.

Em (SCIULLO ANGELO TROTTA, 2020a), os autores propõem um Sistema de Comunicação de Emergência (ECS) voltado para ambientes críticos onde a conectividade celular 3G/4G não está disponível e as tecnologias de geolocalização tradicionais (como o GPS) fornecem cobertura parcial. O sistema consiste em um aplicativo móvel conectado a um transceptor LoRa via Bluetooth.

O aplicativo permite que os usuários enviem solicitações de emergência que são retransmitidas por outros pares até alcançar uma equipe de resgate. Três contribuições

principais são apresentadas no artigo. Primeiro, são fornecidas medições extensivas da tecnologia LoRa e sua adequação para ECS. Em segundo lugar, é descrito o protótipo do software desenvolvido e os algoritmos propostos, incluindo um novo algoritmo de disseminação de múltiplos saltos que maximiza a probabilidade de entrega da solicitação de emergência dentro de um prazo determinado, minimizando o número de retransmissões. Em terceiro lugar, o desempenho do sistema foi avaliado extensivamente através de simulações no OMNeT++, bem como experimentos que avaliam a capacidade da técnica de trilateração baseada em LoRa para fornecer localização precisa sem o uso de GPS.

Os resultados demonstraram que o protocolo LOCATE minimiza o tempo de resposta em situações de emergência quando comparado a outras estratégias de disseminação, além de destacar a melhoria fornecida pela tecnologia LoRa em relação a outras soluções D2D disponíveis.

Em (CALLEBAUT; PERRE, 2020), os autores avaliaram a cobertura e modelaram a perda de propagação (PL) de links LPWAN na faixa de 868 MHz em três ambientes diferentes: 1) urbano; 2) florestal; e 3) costeiro.

A pesquisa foi conduzida com transmissores e receptores a 1,5 m do solo, o que ocasiona mais obstruções, dispersões e difrações. Isso resulta em maior perda de propagação, especialmente em comparação com topologias em estrela, levando a uma maior perda de pacotes.

Os parâmetros de perda de propagação foram estimados, levando em consideração os pacotes perdidos, para avaliar o desempenho dos links P2P. Mesmo em condições adversas, 80

Em (WANG et al., 2022), os autores observam que tecnologias LPWAN, como o LoRa, mostram grande potencial em aplicações de IoT aquática. Contudo, a experiência de implantação mostra que essas tecnologias sofrem degradação de desempenho significativa em áreas sujeitas a marés, quando comparadas a cenários estáticos em terra onde antenas direcionais são usadas. As medições revelaram que a razão para essa degradação está relacionada à polarização e direcionalidade da antena.

A atitude dinâmica de um dispositivo, que varia sua distância em relação às marés, gera perdas variáveis de intensidade de sinal, normalmente ignoradas pelos modelos tradicionais. Os autores, então, propõem um modelo de link que leva em consideração a posição do nó sobre a água. Além disso, para suportar o acesso simultâneo de múltiplos nós LoRa, é proposto um protocolo "slotted-ALOHA" baseado na posição do nó, com o objetivo de reduzir a perda de pacotes em ambientes com muitos dispositivos LoRa.

Em (GAITAN, 2022), foi investigada a dinâmica de desvanecimento de links LoRa com linha de visada (LoS) implantados sobre um estuário com zonas intertidais, considerando comunicações tanto de costa a costa (S2S) quanto de costa para embarcação

(S2V).

Uma metodologia para previsão da perda de propagação foi proposta, integrando características espaciais, temporais e físicas da interação do sinal RF com a dinâmica ambiental ao modelo de propagação de dois raios. A modelagem hidrodinâmica do estuário, incluindo o perfil batimétrico, foi utilizada para contabilizar uma superfície refletora de altitude e permissividade variáveis em função das marés.

As medições experimentais com dispositivos LoRa operando na faixa de 868 MHz demonstraram que as tendências de potência do sinal recebido estavam de acordo com as previsões da metodologia.

A Tabela 1 resume os dados apresentados neste capítulo.

artigos	Frequência (MHz)	Altura tx (m)	Altura rx (m)	Distancia em KM	SF
(HWANG CHAO-SHUN CHEN, 2019)	778 - 928				8/10/12
(GUTIÉRREZ-GÓMEZ A.; RANGEL, 2021)	915	0.5/ 1	0.5/ 1	0.13	7
(PARRI L.; PARRINO, 2019)	868	13.2	2.1	8.33	7/8/9/10/11/12
(CHALL RIDA; HELOÛ, 2019)	868	0.2/1.5/3/12	1.7	47 km	12
(SCIULLO ANGELO TROTTA, 2020a)	433	Não se aplica	Não se aplica	0.18	12
(CALLEBAUT; PERRE, 2020)	868	1.5	1.5	0.7 - 4.1	7/9/12
(WANG et al., 2022)	433	6	6 - 8	0.3	7
(GAITAN, 2022)	868	1.5	0.5-1.5	0.75	12

Tabela 1. Tabela Resumo com os trabalhos correlatos apresentados

1.5 Motivação

A utilização crescente de dispositivos IoT no cotidiano das pessoas tem se destacado, com a expectativa de que chegamos a 15 bilhões de dispositivos em 2023 (RIBEIRO CAIO M. M. CARDOSO, 2023). Dentre esses dispositivos, uma das tecnologias que mais cresce é a Long Range (LoRa). As características da tecnologia LoRa incluem baixo consumo de energia e uma grande área de cobertura, possibilitando uma ampla gama de novas aplicações em áreas remotas (SEMTECH, 2015a).

Quando aplicados à região amazônica, esses dispositivos podem oferecer uma série de novos serviços aos nativos da região. No entanto, os modelos de propagação mais conhecidos não estão ajustados às especificidades locais, que apresentam características distintas devido à umidade, temperatura e arborização (ERAS D. K. NAKATA DA SILVA; CAVALCANTE, 2022). Além disso, esses modelos não consideram os efeitos do deslocamento do receptor, que pode estar em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou barcos, nas características do sinal.

Visando amenizar esse problema, a pesquisa que culminou nesta dissertação propõe o ajuste do modelo de Dois Raios, com o objetivo de auxiliar no planejamento e na implementação de sistemas LoRa, para melhor atender às necessidades da região.

1.6 Estrutura do Trabalho

- No Capítulo 2 é apresentada a base teórica sobre modelos de propagação, as peculiaridades do sinal LoRa e o protocolo LoRaWAN
- No Capítulo 3 apresenta-se os equipamentos, configurações e o cenário em que foi realizada a coleta dos dados. Também é apresentada a metodologia utilizada para coleta o cálculo do modelo proposto;
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos modelos propostos bem como as perdas de pacotes em cada SF.
- No Capítulo 5 apresenta-se a conclusão do trabalho desenvolvido, assim como os resultados obtidos e os trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo, vamos explorar os temas essenciais que ajudaram no desenvolvimento da metodologia que será apresentada, servindo de guia teórico para que o leitor possa entender o que foi feito. Além disso, haverá uma breve descrição das tecnologias e métricas de desempenho que foram utilizados no trabalho.

2.1 Tecnologia LoRa

A tecnologia LoRa foi desenvolvida pela SEMTECH para realizar transmissão sem fio de longo alcance. Esta é uma tecnologia proprietária e atua diretamente na camada física realizando a modulação do sinal, com uma técnica de espalhamento espectral derivada da técnica *Chirp Spread Spectrum* (CSS). O sinal modulado é espalhado por uma largura de banda, o que propicia maior resiliência do sinal à ruídos (SEMTECH, 2015b).

Em conjunto com a tecnologia LoRa existe o protocolo LoRaWAN, o qual atua na camada de enlace da rede LoRaWAN. Este protocolo não é proprietário e pode ser alterado de acordo com as necessidades do projeto em que os transceptores serão implementados.

2.1.1 Modulação LoRa

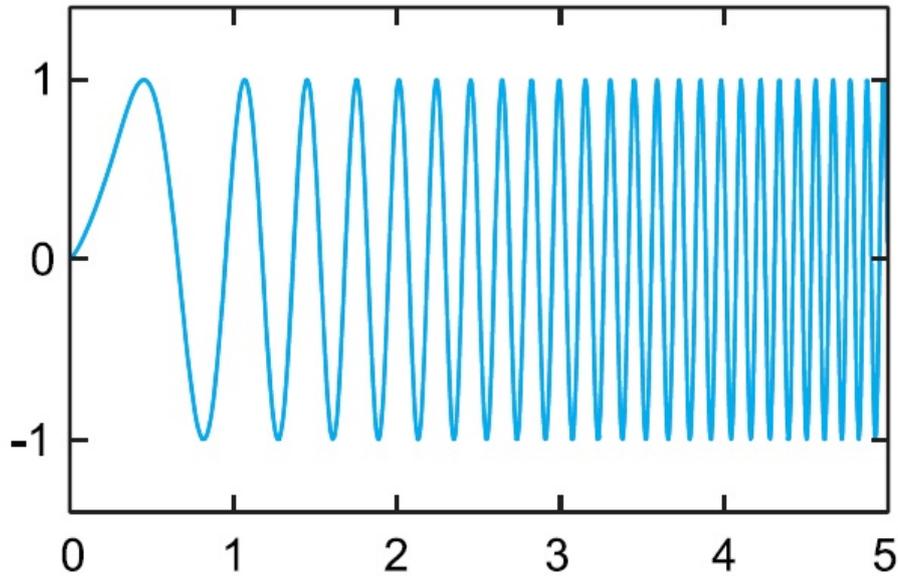
A modulação CSS utilizada pela tecnologia LoRa foi desenvolvida para uso em comunicações espaciais e militares na década de 1940 (SEMTECH, 2015b). A modulação LoRa conserva as características de baixa potência da modulação *Frequency Shift Keying* (FSK) incrementando o alcance do sinal.

Na modulação CSS, o sinal senoidal possui amplitude constante, frequência variante no tempo e duração determinada possibilitando sua distribuição ao longo de toda banda de maneira uniforme. Esta distribuição do sinal garante ao sinal maior resistência à interferência e ruídos. Adicionalmente, a tecnologia oferece a possibilidade de balancear a sensibilidade de recepção e a taxa de transmissão através da utilização dos SFs (SEMTECH, 2019). A Figura 2 a seguir ilustra um sinal LoRa modulado, conhecido como Chirp, caso o mesmo possua uma frequência crescente é denominado *Up-Chirp*, se a frequência for decrescente, então se denomina *Down-Chirp*.

Ao aumentar a taxa de chirps, aumentamos os componentes de frequência do espectro total do sinal. Em outras palavras, a energia do sinal total agora é espalhada por uma faixa mais ampla de frequências, permitindo que o receptor discirna um sinal com uma relação sinal-ruído (SNR) mais baixa. Em termos de LoRa, a quantidade de código de espalhamento aplicada ao sinal de dados original é chamada de *Spreading Factor* (SF).

A modulação LoRa possui um total de seis fatores de espalhamento (SF7 a SF12). Quanto maior o fator de espalhamento utilizado, mais longe o sinal poderá viajar e ainda ser recebido sem erros pelo receptor RF.

Figura 1. Ilustração do sinal LoRa Up-Chirp



Fonte: (SEMTECH, 2019)

A tecnologia LoRa opera na faixa de frequências não licenciadas *Industrial Scientific and Medical* (ISM), compostas pelas faixas 433 MHz na Ásia e Europa, 868 MHz na Europa e 915 MHz no continente americano, facilitando a implementação e reduzindo os custos operacionais. No Brasil, a frequência de 915 MHz foi estabelecida para uso pela ANATEL, influenciando diretamente no alcance máximo de transmissão.

Um transceptor LoRa padrão possui ao todo cinco parâmetros que alteram o consumo energético, a resiliência à ruído e alcance máximo da transmissão. Potência de transmissão, ajustável entre 2 dBm e 14 dBm de acordo com o módulo; Frequência central da portadora entre 137 MHz e 1020 MHz, podendo variar com o modelo do dispositivo; Largura de Banda (BW), determina a faixa de frequência ocupada pelo sinal transmitido, uma BW elevada proporciona maior taxa de transmissão, contudo a sensibilidade de recepção é reduzida devido a adição de ruído no canal, os valores possíveis são 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz (SOARES, 2019).

O sinal LoRa é um chirp espalhado na frequência, o pacote LoRa é constituído de um conjunto de chirps divididos em preâmbulo e informação útil, a duração de uma transmissão LoRa é determinada pelo tempo em que os dois levam para serem transmitidos,

conforme visto na Equação 2.1.

$$T_{pkt} = T_{pre} + T_{phy} \quad (2.1)$$

onde T_{pkt} é o tempo no ar de um pacote, T_{pre} é o tempo de duração do preâmbulo e T_{phy} é o tempo de duração da informação útil que está sendo transmitida. O tempo de duração do preâmbulo é calculado de acordo com a Equação 2.2.

$$T_{pre} = (N_{pre} + 4, 25) * \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.2)$$

onde N_{pre} é o número de preâmbulos enviados na transmissão e $\frac{2^{SF}}{BW}$ é o tempo de um símbolo T_{sym} , calculado de acordo com o SF e a largura de banda BW. O tempo de duração da transmissão da informação útil é visto na Equação 2.3:

$$T_{phy} = (8 + \max[\text{ceil}[TEMP](CR + 4), 0]) * T_{sym} \quad (2.3)$$

O CR é o coding rate, variando de 1 a 4 e variável TEMP é definida na Equação 2.4:

$$TEMP = \frac{28 + 8PL + 16CRC - 4SF - 20IH}{4(SF - 2DE)} \quad (2.4)$$

onde, PL é o tamanho do payload em bytes; CRC é uma flag com valor 1 se utilizado a checagem cíclica de redundância e 0 caso o contrário; IH define se o cabeçalho é implícito (1) ou explícito (0); DE define se a otimização de taxa de dados está (1) ou não ativa (0) (SEMTECH, 2016).

Como visto nas Equações 2.2 e 2.3, o tempo de um símbolo é importante pois ele está correlacionado à duração total da transmissão de uma mensagem LoRa. Adicionalmente o T_{sym} , está diretamente ligado à taxa de bits que podem ser transmitidos por segundo, expresso na equação 2.5 (SEMTECH, 2015b).

$$R_b = SF * \left(\frac{4}{4+CR}\right) \text{bits/s} \quad (2.5)$$

Desta forma, analisando a Equação 2.5 para uma largura de banda constante, podemos observar a importância do parâmetro SF. Ao alterar o SF, verifica-se um incremento no T_{sym} o que ocasiona no aumento da probabilidade de colisões de pacotes, a redução da taxa de transmissão dos dados utilizando a tecnologia LoRa e a redução da sensibilidade de recepção, S_{rx} , expressa na Equação 2.6 (NETO, 2020).

$$S_{rx} = -174 + \log_{10}(BW) + NF + SNR_{dB} \quad (2.6)$$

Onde, o termo constante refere ao ruído térmico presente no receptor; NF é a Figura de Ruído do receptor e SNR_{dB} é a relação sinal-ruído em decibéis, exigida pelo esquema de modulação.

A Tabela 2 a seguir ilustra os níveis mínimos de sensibilidade (S_{rx}) para diferentes SF .

Tabela 2. Parâmetros da rede LoRa para a largura de banda 125 kHz e diferentes valores de SF.

SF	SNR (dB)	Sensibilidade (S_{rx})	Bit Rate (bits/s)
7	-7.5	-123	5469
8	-10	-126	3125
9	-12.5	-129	1758
10	-15	-132	977
11	-17.5	-134.5	537
12	-20	-137	293

Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2015b).

2.2 Radio Propagação

Segundo (RAPPAPORT, 2002), os fenômenos de propagação das ondas eletromagnéticas são diversos, mas podem ser generalizados através de três fenômenos: reflexão, difração e espalhamento. A maioria dos sistemas celulares estão dentro de cidades, não havendo visada direta na maioria das vezes entre o transmissor e receptor, a presença de grandes construções causa severas perdas por difrações. As reflexões em diversos objetos fazem trajetos diferentes com tamanhos distintos, a interação entre essas ondas causa desvanecimento de múltipla reflexão específico a um local, e a intensidade das ondas diminui à medida que a distância aumenta entre o transmissor e receptor.

Modelos de propagação focam em prever, na média, a intensidade do sinal recebido com a distância entre o transmissor e receptores, assim como a variabilidade do sinal referente ao ambiente onde foram medidos, essa abordagem é definida como larga escala. Modelos de propagação que caracterizam as rápidas flutuações do sinal recebido em distâncias curtas ou pequena duração de tempo são chamadas de modelos de desvanecimento em pequena escala.

2.2.1 Modelos Teóricos

Estes são modelos constituídos a partir de formulações teóricas, como indicado pelo nome, as quais tem como fundamento suposições originadas a partir de dados coletados ou leis físicas. Alguns modelos teóricos não levam em consideração as características

específicas do ambiente de estudo, ou seja, são modelos mais genérico. No entanto, existem modelos teóricos chamados de site-specific que fornecem um resultado mais preciso através da técnica de RT ao custo de um elevado poder computacional (CASTRO, 2010).

2.2.2 Modelos Empíricos

Um modelo empírico é criado com base em observações e medições. Desta forma, o modelo empírico é regido por uma equação elaborada para se ajustar aos dados medidos da melhor forma possível. Estes modelos estão vinculados ao local estudado, pois necessitam de informações como frequência de operação do sistema, alturas das antenas e características do ambiente para representar a perda de propagação com precisão. Além disso, diferente dos modelos de RT esses não necessitam de um elevado poder computacional (CASTRO, 2010).

2.2.2.1 Modelo de propagação no Espaço Livre em Larga Escala

O modelo de propagação no espaço livre é usado para prever a potência recebida do sinal entre o transmissor e o receptor sem obstrução (LoS). Como a maioria dos modelos em larga escala, ele prediz a potência recebida em função da distância entre o transmissor e receptor. Para determinar a potência recebida é utilizado a equação de Friis definida pela Equação 2.7.

$$P_r(d)[W] = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.7)$$

Onde $P_r(d)$ é a potência recebida estimada em função da distância entre o transmissor e receptor, P_t é a potência de transmissão, G_t ganho da antena de transmissão, G_r ganho da antena de recepção, d é a distância entre o transmissor e receptor, L fator de perda do sistema não relacionado a propagação ($L1$) o valor indicado deste parâmetro é 1, e λ é o comprimento de onda em metros. Os ganhos das antenas de transmissão e recepção é definido por meio da abertura da antena.

O modelo de perda é definido em dB entre a diferença da potência efetivamente transmitida e a potência recebida podendo ser considerado ou não os ganhos das antenas. A potência efetivamente irradiada e o modelo de perda de propagação com os ganhos em dB são definidos por Equação 2.8 e Equação 2.9 respectivamente.

$$EIRP[W] = P_t G_t \quad (2.8)$$

$$P_r(d)[dB] = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2.9)$$

Quando desconsideramos os ganhos das antenas, e assumindo ganho unitário temos a Equação 2.10

$$P_r(d)[dB] = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10\log\left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2d^2}\right] \quad (2.10)$$

O modelo de Friis é válido apenas a distâncias superior ao campo distante referente a antena transmissora. A região de Fraunhofer R de uma antena transmissora é definido por uma região além da zona de Fresnel (BALANIS, 2015). Onde R é definida pela Equação 2.11, D é a dimensão física da antena e λ é comprimento de onda.

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.11)$$

O modelo de Friis não utiliza $d = 0$, por esta razão outros modelos em larga escala usam um ponto referente de potência recebida para a distância referencial, d_0 .

A potência recebida pode ser calculada para qualquer $d > d_0$, para $P_r(d_0)$ é utilizado o campo distante como referência para definir o d_0 , logo $d_0 \geq d_f$. A distância referencial d_0 é definida com o menor valor de medição ná prática.

2.2.3 Mecanismos de Propagação

As ondas diretas e as ondas refletidas são consideradas mecanismo básicos na propagação. Além destes, também há a ocorrência de ondas espalhadas, difratadas e a propagação através de objetos (SILVA, 2021).

A quantidade de mecanismos de propagação aplicados a uma transmissão depende do ambiente onde a onda se propaga (SILVA, 2021).

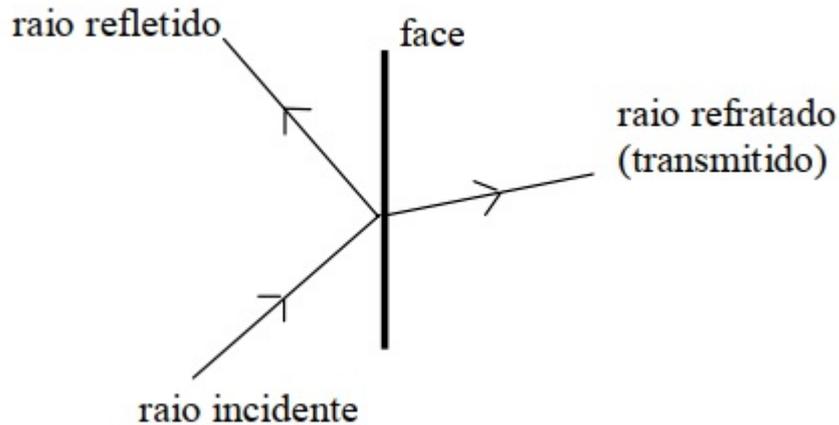
2.2.3.1 Reflexão

O fenômeno da reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética colide contra um obstáculo de dimensões muito superiores ao seu comprimento de onda. Caso a onda incida sobre um dielétrico perfeito, parte da energia é transmitida para o segundo meio e parte é refletida de volta para o meio original, se o segundo meio for um condutor perfeito, neste caso, toda energia é refletida para o meio original. Deste modo, o raio refletido parcialmente ou totalmente, pode ocasionar uma interferência construtiva ou destrutiva no raio direto que chega ao receptor (RAPPAPORT, 2002).

2.2.3.2 Difração

O raio atinge uma aresta, e por este motivo, serão gerados, além do(s) raio(s) refletido(s), raios difratados que preencherão uma porção da superfície de um cone com vértice no ponto de difração. (RAPPAPORT, 2002).

Figura 2. Exemplo de raios refletidos e transmitidos



Fonte: (RODRIGUES, 2000)

2.3 Relação de Potência com Campo Elétrico

A relação entre o campo elétrico e a densidade de potência é utilizada na análise de propagação de ondas para analisar como as ondas eletromagnéticas se propagam em diferentes meios e ambientes, como visto na Equação 2.12 (RAPPAPORT, 2002).

$$P_d = \frac{E^2}{\eta} \text{ W/m}^2 \quad (2.12)$$

Onde a densidade de potência, P_d , é dado pela divisão do módulo do Campo elétrico E ao quadrado pela impedância intrínseca do meio η . A partir de 2.12, com os devidos arranjos, chegamos a equação 2.13

$$E = \sqrt{10^{\frac{P_{dBm}}{10}} \times \eta \times 10^{-3} \text{ V/m}} \quad (2.13)$$

Onde,

E é o campo elétrico em volts por metro (V/m).

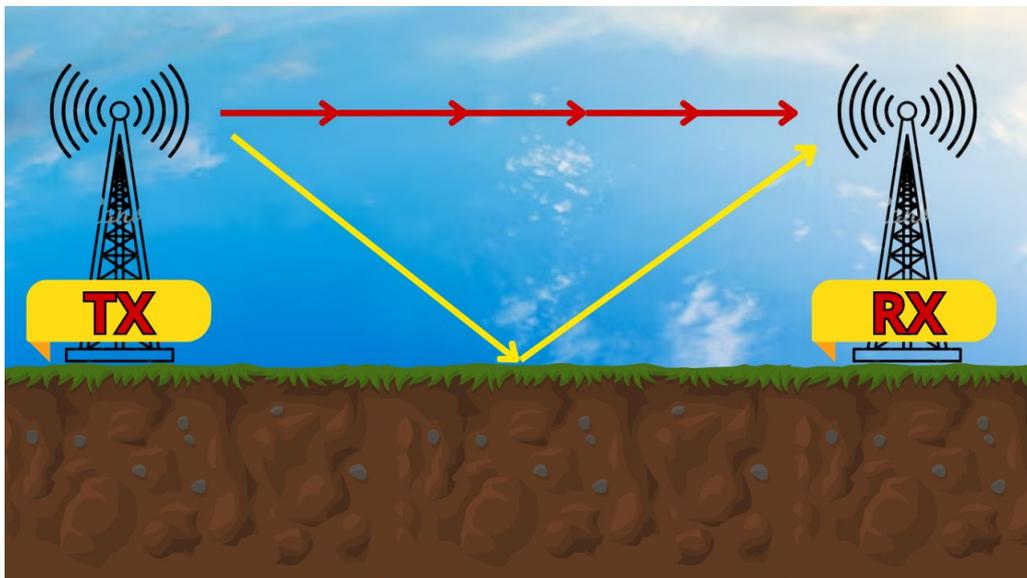
η é a impedância característica do meio, aproximadamente 377Ω no espaço livre.

P_{dBm} é a densidade de potência em decibéis-miliwatt (dBm)

2.4 Modelo de dois raios

A equação de propagação em espaço livre se aplica apenas em condições muito restritas; em situações práticas, quase sempre há obstruções no caminho de propagação ou superfícies das quais as ondas de rádio podem ser refletidas. Um caso muito simples, mas de interesse prático, é a propagação quando a distância entre as antenas é grande o suficiente para considerarmos as mesmas distantes, mas ao mesmo tempo a distância é pequena o suficiente para negligenciarmos a curvatura e assumirmos que a superfície refletora é plana (PARSONS, 2000), como ilustrado na Figura 3.

Figura 3. Modelo de propagação sobre terra plana



Fonte: adaptado de (PARSONS, 2000)

Em configurações como a citada, é utilizado a equação do Modelo de Dois Raios (MDR) apresentada na Equação 2.14.

$$P_r = 4P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \quad (2.14)$$

Porém, normalmente se usa a equação conhecida como Modelo Terra Plana apresentada na Equação 2.15 que é uma simplificação da Equação 2.14.

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \quad (2.15)$$

Aqui é importante ressaltar duas afirmações do (PARSONS, 2000): A potência Recebida é proporcional ao quadrado do campo elétrico recebido e a potência recebida em visada direta (LoS na sigla em inglês) é dada pela Equação 2.16.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.16)$$

Aplicando a equação 2.16 em 2.14 chegamos à Equação 2.17.

$$P_r = 4|E_{LoS}|^2 * \sin^2 \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \quad (2.17)$$

Portanto

$$|E| = 2|E_{LoS}| * \sin \left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right) \quad (2.18)$$

Segundo o mesmo autor, a diferença de fase das duas componentes é dada pela equação 2.19.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (2.19)$$

Aplicando 2.19 em 2.18 obtemos 2.20.

$$|E| = 2|E_{LoS}| * \sin \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (2.20)$$

A Equação 2.20, por sua vez, é uma simplificação da Equação 2.21 que é o Modelo de Dois Raios (MDR) aplicados especificamente para grandes distancias. Ou seja, é considerado o valor de -1 para o coeficiente de reflexão (RAPPAPORT, 2002).

$$E(d) = E_0 d_0 \left(\frac{-\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}d_1)}{d_1} + ((-1)\frac{-\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}d_2)}{d_2}) \right) \quad (2.21)$$

Todavia, o MDR puro, e utilizado nesse trabalho, pode ser aplicado a qualquer distância e portanto o seu coeficiente de reflexão pode assumir infinitos valores. Logo, o MDR assume o formato mostrado na Equação 2.22

$$E(d) = E_0 d_0 \left(\frac{-\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}d_1)}{d_1} + (\Gamma \frac{-\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}d_2)}{d_2}) \right) \quad (2.22)$$

Onde, Γ é o coeficiente de reflexão, d_0 é a distância referência do receptor em relação ao transmissor, E_0 é o campo elétrico no espaço livre em d_0 , d a distância entre o transmissor e o receptor, λ o comprimento de onda, d_1 a distância percorrida pela componente do campo em visada direta e d_2 a distância percorrida pela componente do campo que reflete no solo.

2.4.1 O Coeficiente de reflexão

Segundo (PARSONS, 2000), a amplitude e a fase da onda refletida pelo solo dependem do coeficiente de reflexão da Terra no ponto de reflexão e diferem para polarização horizontal e vertical. Na prática, a Terra não é nem um condutor perfeito nem um dielétrico perfeito, então o coeficiente de reflexão depende das constantes do solo, em particular a constante dielétrica, e a condutividade.

Para uma onda polarizada horizontalmente incidindo na superfície da Terra (assumida como perfeitamente lisa), o coeficiente de reflexão é dado por:

$$\rho_h = \frac{\sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j(\frac{18.10^9 \sigma}{f}) - \cos^2 \psi)}}{\sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j(\frac{18.10^9 \sigma}{f}) - \cos^2 \psi)}} \quad (2.23)$$

Enquanto para uma onda polarizada verticalmente, o coeficiente de reflexão é dado por:

$$\rho_v = \frac{(\epsilon_r - j(\frac{18.10^9 \sigma}{f})) \sin \psi - \sqrt{(\epsilon_r - j(\frac{18.10^9 \sigma}{f}) - \cos^2 \psi)}}{(\epsilon_r - j(\frac{18.10^9 \sigma}{f})) \sin \psi + \sqrt{(\epsilon_r - j(\frac{18.10^9 \sigma}{f}) - \cos^2 \psi)}} \quad (2.24)$$

Sendo ϵ_r a constante dielétrica relativa do plano em que a componente é refletida, também chamada de Permissividade, σ a condutividade do material e ψ o ângulo entre a terra e o raio refletido.

O impacto do coeficiente de reflexão horizontal ou vertical — quando utilizado 915 MHz, $\epsilon_r = 80$ e $\sigma = 0.05$ — pode ser visto na Figura 4. Através da imagem podemos notar que a variação da polarização horizontal é maior do que da polarização vertical. Além disso, é importante ressaltar que os picos de *path loss* em ambas as polarizações se dá quando a diferença de fases das componentes é igual a 180° .

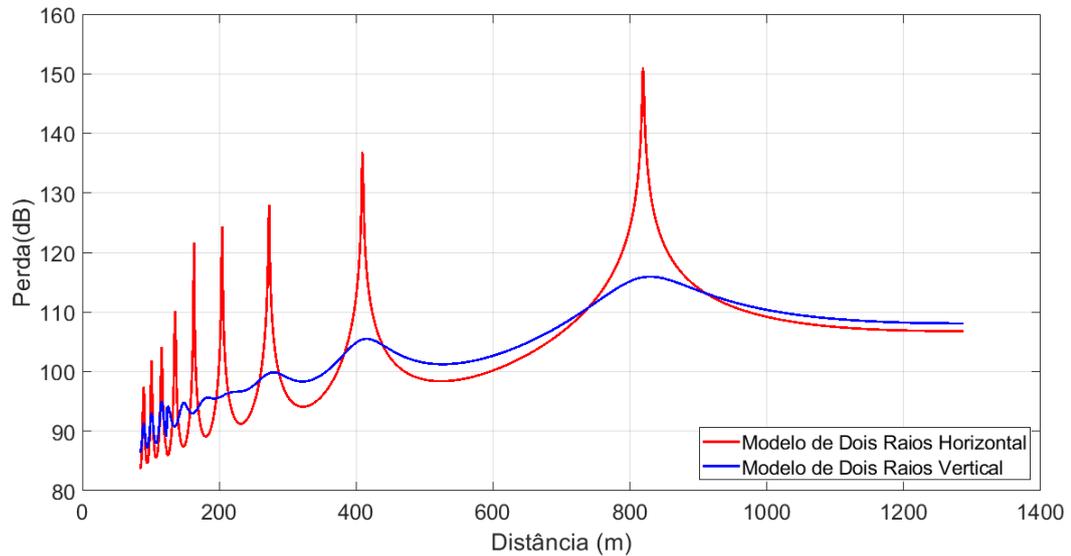
2.5 Fórmula de Haversine

O GPS que foi utilizado nesse trabalho fornece as coordenadas de latitude e longitude em graus decimais, o que exige o uso da fórmula de Haversine para calcular a distância entre dois pontos na superfície da Terra.

A fórmula da Lei de Haversine é usada para encontrar a distância entre dois pontos em uma esfera, dadas suas latitudes e longitudes (ANDREOU C. X. MAVROMOUSTAKIS; MUMTAZ, 2023). A fórmula é expressa da seguinte forma:

$$d = 2r \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta \varphi}{2} \right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right) \quad (2.25)$$

Figura 4. Modelo de Dois Raios em Polarização Horizontal e Vertical



Fonte: O Autor

Onde, d é a distância entre os dois pontos (em km), r o raio da Terra (aproximadamente 6371 km), φ_1, φ_2 latitudes dos dois pontos (em radianos).

2.6 Cálculo de Diferença de Fase em Radianos

Segundo (RAPPAPORT, 2002) o cálculo da diferença de fases entre a componente em visada direta e a componente que reflete no solo " ϕ " é dada pela Equação 2.26

$$\phi = \frac{2\pi(d_2 - d_1)}{\lambda} \quad (2.26)$$

Onde λ é o comprimento de onda, d_2 é a distancia da componente que reflete no solo e d_1 é a distancia da componente que tem visada direta. Usando a figura 3 como referência, d_2 seria a distância percorrida pela componente em amarelo e d_1 a distancia percorrida pela componente em vermelho

A conversão do ângulo em radianos para graus se dá através dos seguintes cálculos:

$$Nvoltas = \frac{(\phi - \pi) * \frac{180}{\pi}}{360} \quad (2.27)$$

Onde $\phi - \pi$: expressa o ângulo em termos de "voltas completas". Isso resulta em um número que representa quantas vezes o ângulo completa 360 graus.

Após isso, subtraímos a parte inteira do valor total de voltas, deixando apenas a parte fracionária, e multiplicamos por 360. Isso normaliza o ângulo para um intervalo entre 0 e 1 voltas completas.

$$defasagem = (Nvoltas - \lfloor Nvoltas \rfloor) * 360 \quad (2.28)$$

2.7 Root Mean Square Error (RMSE)

O *Root Mean Square Error* (RMSE), ou erro quadrático médio, é uma métrica amplamente utilizada para medir a precisão de modelos preditivos. O RMSE quantifica o desvio padrão dos erros, que são as diferenças entre os valores previstos e os valores observados. Quanto menor o valor do RMSE, melhor o modelo é considerado em termos de sua capacidade de prever resultados com precisão.

A fórmula do RMSE é dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.29)$$

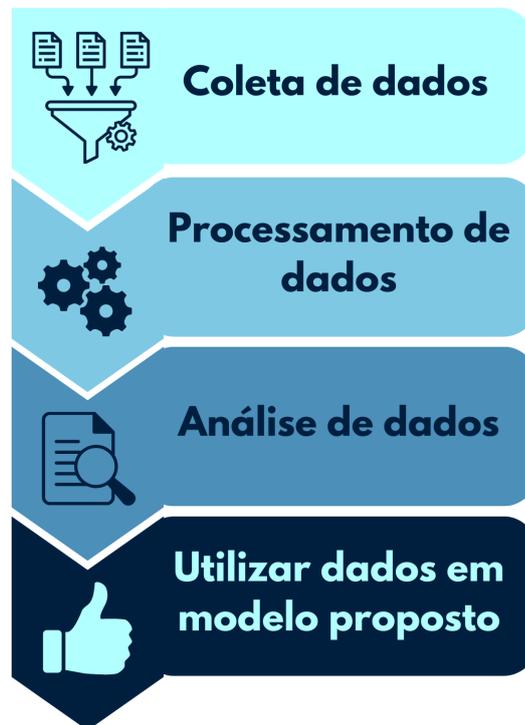
Nesta fórmula, n representa o número total de observações, y_i é o valor observado para a i -ésima observação, e \hat{y}_i é o valor previsto pelo modelo para a i -ésima observação. A expressão $(y_i - \hat{y}_i)^2$ refere-se ao quadrado da diferença (erro) entre o valor observado e o valor previsto.

3 Metodologia

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, conforme exibido na Figura 5. Começaremos pela coleta dos dados, onde serão descritos os equipamentos utilizados e o cenário em que ocorreram as campanhas de medições. Em seguida, abordaremos o processamento dos dados, destacando o cálculo realizado para determinar a distância entre os dispositivos. Após o processamento, será possível realizar a análise dos dados coletados. Por fim, explicaremos de que forma os dados foram utilizados no modelo proposto.

Figura 5. Metodologia de medição



Fonte: Adaptado de (CARDOSO, 2023)

3.2 Coleta de Dados

A campanha de medição foi realizada para coletar dados que descrevem a propagação do sinal irradiado no canal aéreo-terrestre e terrestre-aéreo em um meio densamente arborizado, utilizando a tecnologia LoRa em conjunto com um VANT.

3.2.1 Equipamentos e Configurações

Para a realização da pesquisa, optou-se pela utilização da plataforma open-source de eletrônica e prototipagem Arduino. Para estabelecer a comunicação entre os microcontroladores, foram utilizadas duas antenas helicoidais e omnidirecionais no receptor, além de uma antena direcional da marca Rohde & Schwarz, modelo HL223, no transmissor. Foram utilizados também dois shields LoRa Dragino, que utilizam o chip SX1276 da Semtech e o protocolo LoRaWAN, além de leitores de cartão de memória HM-125. Além disso, foi empregado um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) modelo Inspire 1 da DJI. A Tabela 3 apresenta as demais configurações utilizadas na transmissão, enquanto a Figura 6 ilustra os equipamentos montados.

Figura 6. Setup de recepção e transmissão montados



Fonte: O autor

3.2.2 Cenário

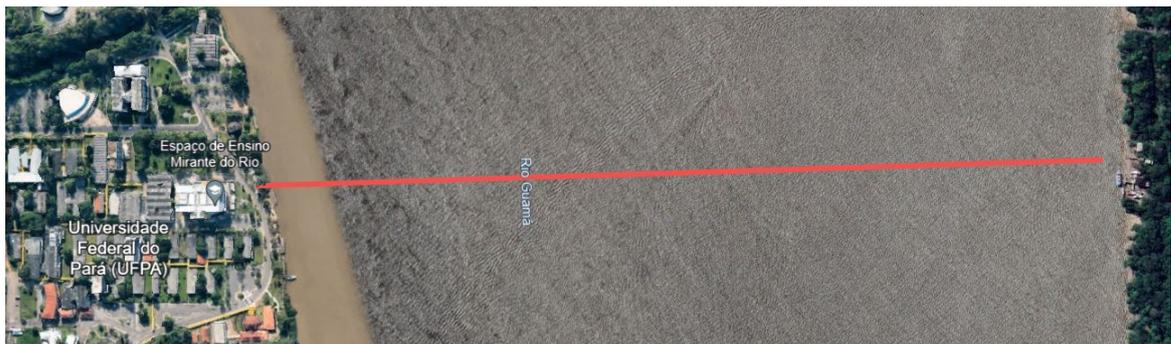
A campanha de medições foi realizada na UFPA, um local às margens do rio Guamá e avaliou o *Received Signal Strength Indication* (RSSI) recebidos pelo pelos dispositivos

Tabela 3. Configurações utilizadas na transmissão

Frequência de Operação	915 MHz
Potencia de Transmissão	20 dBm
Spreading Factor	7
Largura de Banda	125 KHz
Ganho Antena TX	6 dBi
Ganho Antena RX	3 dBi

de recepção ao longo do rio, saindo da orla da citada universidade até a Ilha do Combú, em momentos de preia e baixa-mar, sendo considerado preia-mar a distância de 1 m da superfície da água até a altura do solo e baixa-mar a distancia de 3,3 metros a distância da superfície da água até a altura do solo. A Figura 7 apresenta uma visão panorâmica do percurso.

Figura 7. Percurso do VANT sobre o rio



Fonte: O autor

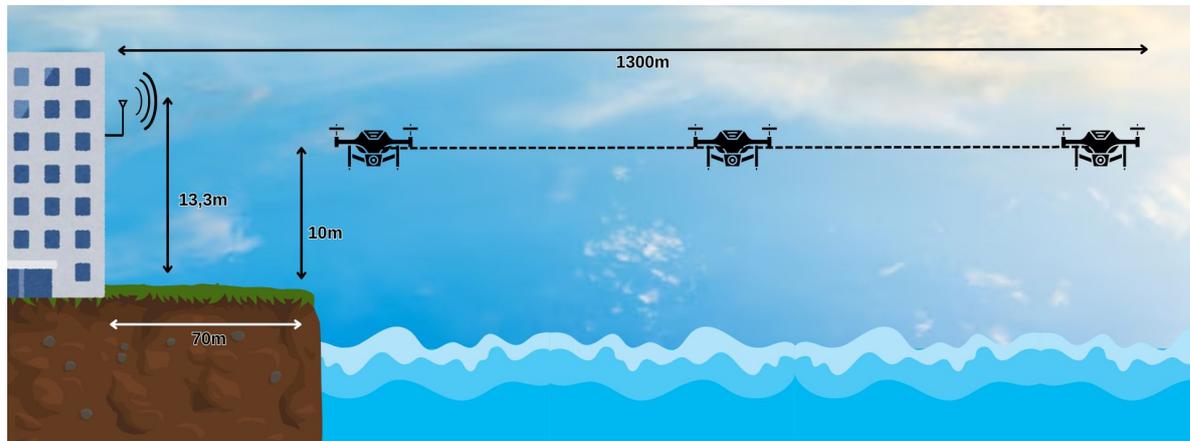
3.2.3 Metodologia de Coleta de Dados

Durante a coleta de dados, o VANT atuou como suporte para os dispositivos receptores LoRa Dragino, enquanto o transmissor LoRa foi posicionado a uma altura de 13,3 m no segundo andar do prédio "Mirante do Rio" da UFPA.

O VANT percorreu o rio a uma altura de 10 metros, cobrindo aproximadamente 1230 metros ao longo do rio Guamá, com ponto de partida na margem do respectivo rio, posicionado inicialmente a cerca de 70 m do transmissor. Assim, a distância total entre o transmissor e o ponto mais distante do alcance do receptor foi de 1300 m.

Além disso, é importante ressaltar que só foram coletados dados com o VANT se afastando do transmissor para evitar que o VANT obstruísse as antenas do receptor. A Figura 8 ilustra a metodologia utilizada para a medição, na qual o VANT está em movimento.

Figura 8. Ilustração da metodologia



Fonte: O autor

Adicionalmente, visto que o tempo no ar de um pacote LoRa é variável, optou-se por fixar o intervalo de transmissão em 2 segundos, garantindo que o tempo no ar seja respeitado para todos os valores de SF. O intervalo de 2 segundos foi selecionado com base no maior tempo no ar referente ao SF 12.

O contador é inicializado ao energizar o *setup* de recepção. Assim que as placas são inicializadas, o contador começa a marcar o tempo em milissegundos de todo o processo.

Cada vez que os receptores, posicionados no VANT, recebem um pacote de dados transmitido pelo *setup* de comunicação utilizando a tecnologia LoRa (*uplink*), os valores de RSSI, SNR, coordenadas geográficas em graus decimais, o número do pacote recebido e o tempo registrado em milissegundos pelo contador são gravados em um arquivo de texto (.txt). Esses dados são posteriormente incorporados ao banco de dados. Por fim, as informações coletadas são transmitidas via comunicação serial para o armazenamento no computador, onde serão submetidas a um tratamento posterior.

No total, foram realizadas 48 medições em um período de 5 meses, precisamente entre dezembro de 2023 e abril de 2024, utilizando SF7 e SF12, em condições de preia-mar e baixa-mar, nas polarizações vertical e horizontal, conforme mostrado na Tabela 4. A média das distâncias das alturas entre a terra e o rio foi de 1 metro para preia-mar e 3,3 metros para baixa-mar.

A escolha dos SFs 7 e 12 para a coleta de dados, é feita com o objetivo de comparar a perda de propagação, no ambiente de medição, nos dois casos mais extremos que o equipamento comporta. Em tecnologia LoRa, quanto maior o SF maior é a sensibilidade do receptor, em contra-partida, menor é o tamanho do pacote que pode ser recebido.

Tabela 4. Quantidades de medições por SF e por maré

Spreading Factor	VV	HH
SF7 Preia-mar	6	6
SF7 Baixa-mar	6	6
SF12 Preia-mar	6	6
SF12 Baixa-mar	6	6

3.2.4 Pré-processamento de dados

Após a realização da campanha de medições, foi necessário analisar os dados para calcular a distância entre o VANT e o transmissor e também o campo elétrico incidente no receptor.

A distância entre transmissor e receptor é calculada através da equação 2.25 e seus valores são utilizados pra estimar a Potência de Sinal Esperada (*expected signal power* (ESP)), através das equações apresentadas em (BARBOSA B.S.D.S.; CRUZ, 2024), usando a equação 3.1.

$$ESP_{dBm} = RSSI_{dBm} + SNR_{dB} - 10 * \text{Log}_{10} \left(1 + 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}} \right) \quad (3.1)$$

Esse valor será usado para os cálculos do Modelo de Dois Raios padrão e o modelo proposto, o Modelo de Dois Raios com Mudança de Fase (MDR-MF).

3.2.5 Processamento de dados

Para se calcular a perda de propagação real, através dos valores medidos, se utiliza a equação 2.22 assumindo que E_0 é calculado como mostrado na equação 3.2 3.1.

$$E_0 = 10^{\left(\frac{ESP(1)}{10}\right)} \quad (3.2)$$

Em que $ESP(1)$ corresponde ao valor de ESP na distância de referência de 70 metros, localizada precisamente à margem do rio, conforme ilustrado na Figura 8.

Para esse trabalho, que majoritariamente teve suas campanhas de medição sobre o Rio Guamá, o coeficiente de reflexão utiliza as equações 2.23 e 2.24, como esperado, e utiliza os valores de permissividade e condutividade de 81 e 10^{-3} , valores esses retirados de (RAPPAPORT, 2002).

3.2.5.1 Modelo de Dois Raios com Mudança de Fase (MDR-MF)

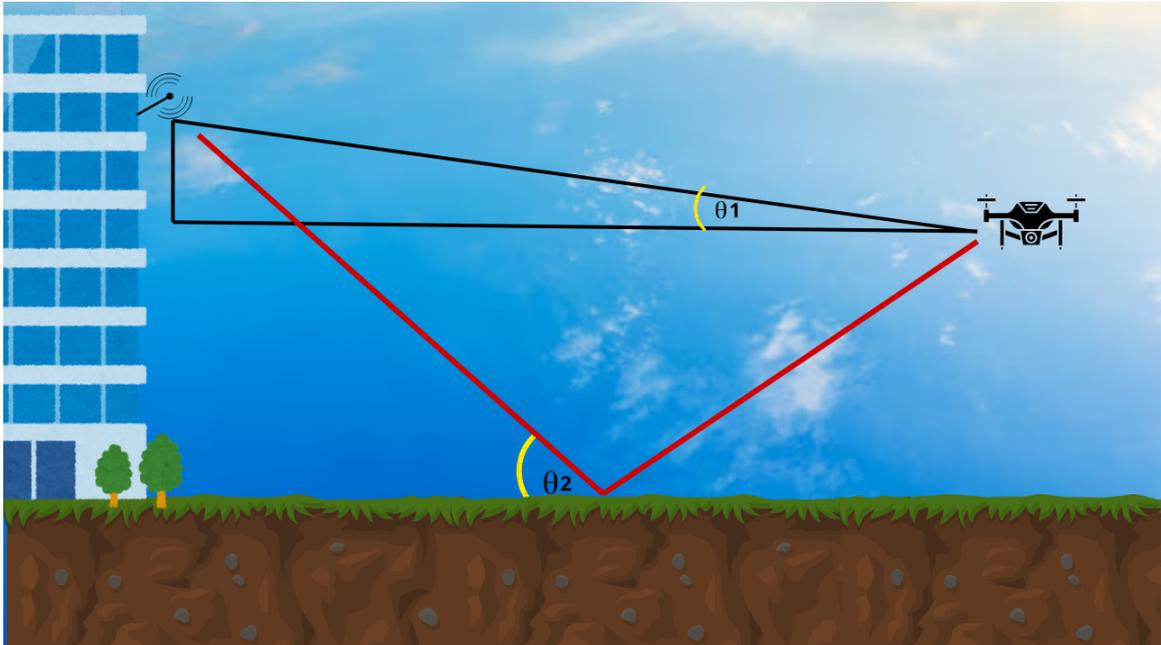
Baseado em (RAPPAPORT, 2002) — especificamente aos capítulos que falam do Modelo de Dois Raios e ao efeito Doppler — e no conhecimento empírico reunido pelo Laboratório de Computação e Telecomunicações da UFPa (LCT), o MDR-MF parte do princípio que a velocidade imposta ao dispositivo receptor, quando este se afasta, muda a fase de incidência tanto das componentes em LoS e NLoS, e portanto sua interação ocasiona em valores de PL diferentes dos que seriam obtidos no mesmo ponto por dispositivos estáticos.

Partindo da equação 2.22 e fazendo os ajustes necessários para que a velocidade aplicada ao receptor tivesse relevância à equação, apresentamos a equação 3.3, que é o modelo proposto por este trabalho.

$$E(d) = \frac{E_0 d_0}{d} \left(\left(\frac{-\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}(d_1 + (v.\Delta t.\cos(\pi - \theta_1))))}{d_1} \right) + \left(\Gamma \frac{-\exp(j\frac{2\pi}{\lambda}(d_2 + (v.\Delta t.\cos(\pi + \theta_2))))}{d_2} \right) \right) \quad (3.3)$$

Onde v é a velocidade do dispositivo receptor, Δt é a diferença de tempo entre o primeiro ponto medido e o ponto atual e θ_1 e θ_2 são os ângulos entre transmissor e receptor, em radianos, como mostrado na figura 9

Figura 9. Exemplo de ângulos θ_1 e θ_2



Fonte: O autor

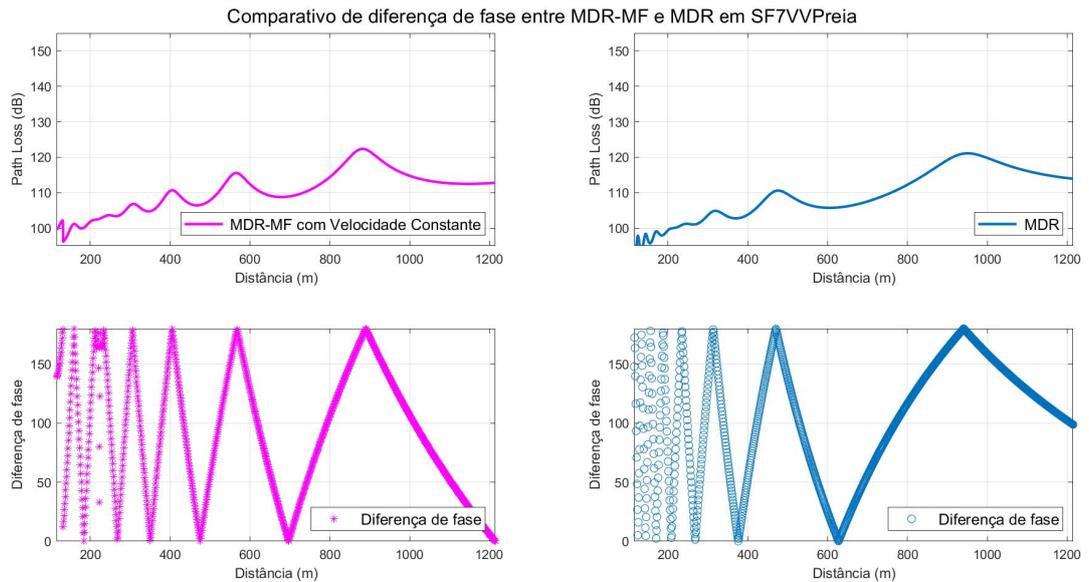
3.2.5.2 Cálculo da defasagem de fase das componentes em MDR-MF

Fundamentados nas equações 2.26 e em 3.3 inferimos a defasagem da fase das componentes incidentes em radianos através da equação 3.4.

$$\phi_{MDR-MF} = \frac{2\pi ((d_2 + (v.\Delta t.\cos(\theta_2))) - (d_1 + (v.\Delta t.\cos(\theta_1)))) - \angle\Gamma}{\lambda} \quad (3.4)$$

Logo após, para converter para graus, basta aplicar os passos da seção 2.6 e os resultados podem ser mais facilmente vistos nas Figuras 10 e 11 onde aplicamos o MDR-MF com velocidade constante de 12m/s, frequência de 915 MHz, $\epsilon_r = 80$ e $\sigma = 0.05$, SF 7 e em Preia-mar. À esquerda, temos o MDR-MF com velocidade constante e à direita o MDR.

Figura 10. Comparativo de cálculo da defasagem de fase para MDR-MF e MDR



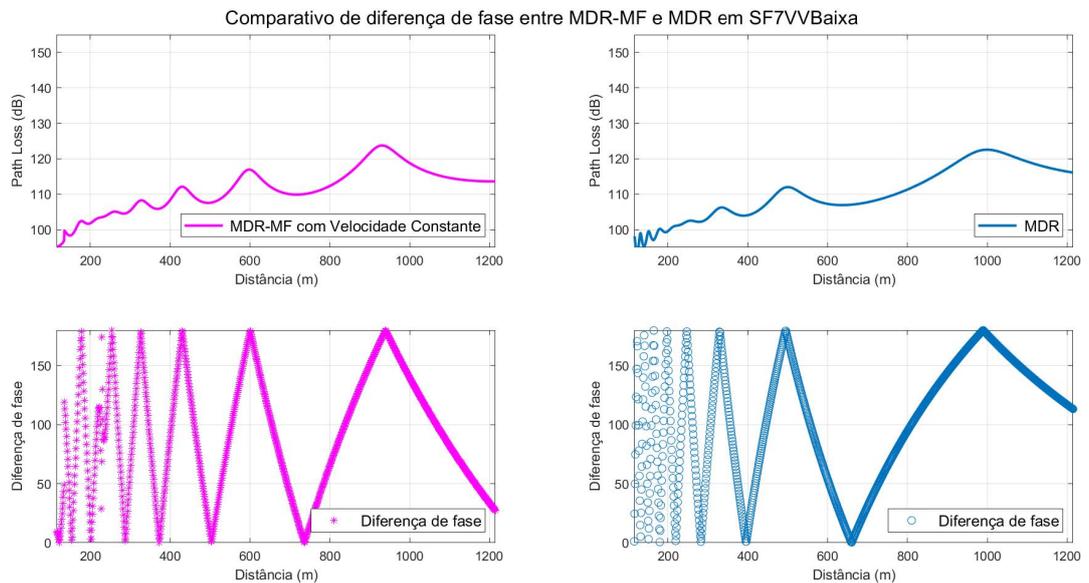
Fonte: O autor

3.2.5.3 Cálculo da velocidade do MDR-MF

As velocidades do VANT, em cada medição, foram calculadas dividindo a distância percorrida pelo VANT (entre dois pontos de medição) pelo tempo que o mesmo levava pra percorrer essa distância. Por exemplo:

$$v = \frac{DistanciaPonto5 - DistanciaPonto4}{TempoPonto5 - TempoPonto4} \quad (3.5)$$

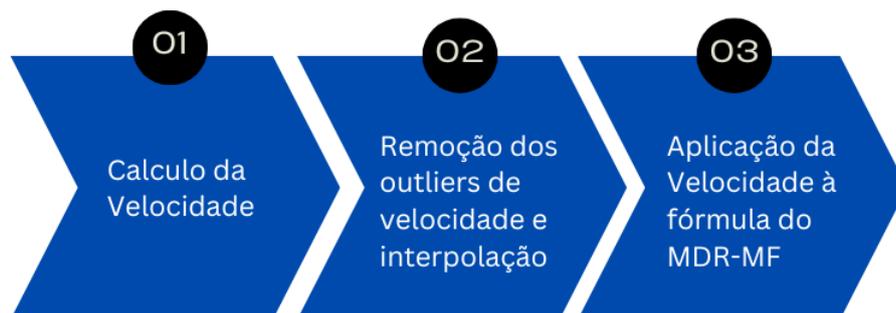
Figura 11. Comparativo de cálculo da defasagem de fase para MDR-MF e MDR



Fonte: O autor

Logo após calculadas as velocidades, os resultados que for considerado *outlier*, é retirado para que as velocidades sejam interpoladas, suavizado por média móvel e, por fim, aplicadas à equação 3.3. O método utilizado é mostrado na figura 12.

Figura 12. Metodologia de análise do MDR-MF



Fonte: O autor

Outliers, ou valores atípicos, são dados que se distanciam significativamente do restante da distribuição e podem indicar variabilidade incomum ou erros de medição. Neste trabalho, utilizamos um *boxplot* gerado no MATLAB, no qual são considerados *outliers* os valores que excedem 1.5 vezes o intervalo interquartil (IQR), que corresponde à diferença entre o primeiro e o terceiro quartis. Os quartis são medidas que dividem o conjunto de

dados ordenado em quatro partes iguais: o primeiro quartil (Q1) corresponde ao ponto abaixo do qual estão 25% dos dados, enquanto o terceiro quartil (Q3) delimita 75% dos dados. Qualquer valor que ultrapasse essa distância é classificado como *outlier*.

Por fim, todos os resultados obtidos de maneira individual em cada cenário e em cada medição são somados, e a média da velocidade correspondente a cada distância é calculada. Essa média é, então, utilizada para permitir uma comparação adequada com os resultados médios previamente obtidos. A Tabela 5 exemplifica o cálculo da velocidade média.

Distancia (m)	Vel Med 1 (m/s)	Vel Med 2 (m/s)	Vel Med 3 (m/s)	Vel Med 4 (m/s)	Vel Med 5 (m/s)	Vel Med 6 (m/s)	Vel Med Total (m/s)
150	10.2	11.6	11.8	10.7	11.2	10	10.9
200	11.8	11.2	11.7	10.8	11.9	10.9	11.4
250	10.6	10.1	11.6	11.3	11.1	11.8	11.1
300	11.4	11.4	11.2	10.3	11.3	10.4	11
350	10.2	11.6	11.7	11.3	11.2	10.5	11.1

Tabela 5. Tabela exemplor de Cálculo de Valores Médios da Velocidade em m/s

Além disso, a remoção dos *outliers* é imprescindível devido à precisão do VANT, que é de 3 metros. Essa margem de erro do VANT resulta em picos de velocidade que não correspondem à realidade.

4 Resultados

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os resultados do modelo proposto, que visa prever o comportamento da perda de propagação em um cenário onde o receptor está em movimento, em comparação com métricas referências. Além disso, apresenta outras estatísticas obtidas durante os trabalhos de medição.

4.2 Análise dos impactos da Maré e dos fatores de espalhamento na propagação do sinal

Inicialmente, é necessário apresentar uma explicação acerca dos dados exibidos nesta seção. Todos os gráficos apresentados referem-se às médias de um conjunto de seis medições. Assim, cada ponto nos gráficos corresponde à média das medições realizadas em cada distância considerada. A partir dessas médias, os resultados são comparados de diversas formas, possibilitando uma análise mais precisa.

4.2.1 O impacto das polarizações no *Path Loss*

A figura 13 mostra o comparativo das diferentes polarizações em cada configuração de medida

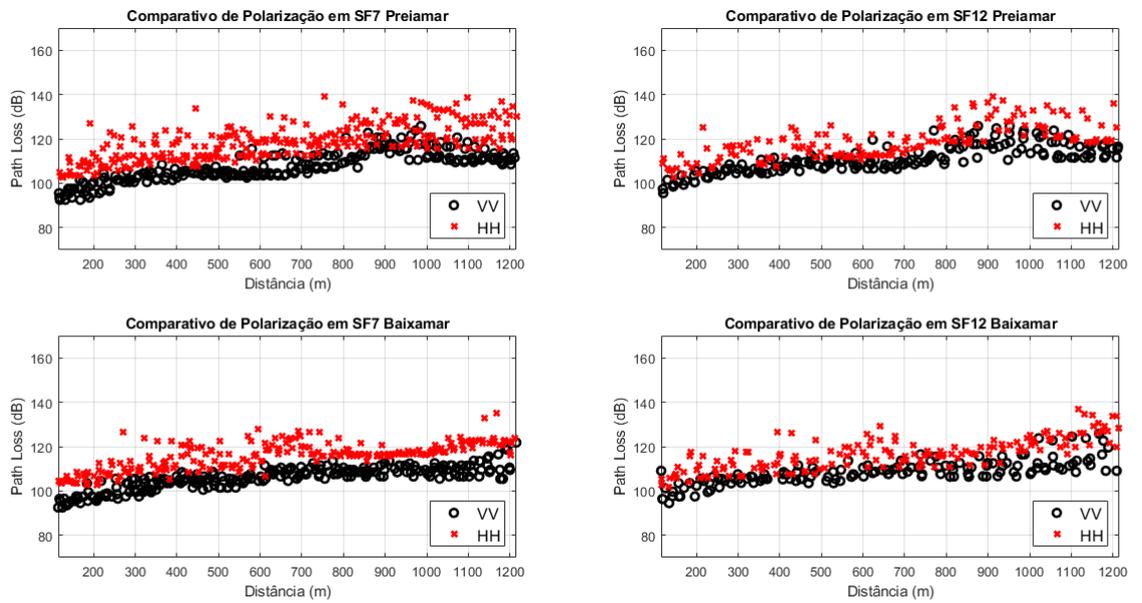
Comparando os gráficos podemos ver que majoritariamente o *path loss* em polarização horizontal é maior, como esperado quando comparado com a literatura em (RAPPAPORT, 2002) e (PARSONS, 2000). Além disso, o espalhamento da polarização HH é maior do que o espalhamento da polarização VV, como esperado de acordo com o Modelo de Dois Raios, como mostrado na Figura 4.

4.2.2 Análise do Impacto dos SFs

Com base nas médias dos dados medidos, é possível comparar o impacto dos diferentes SFs utilizados neste estudo, SF7 e SF12, conforme mostrado na figura 14.

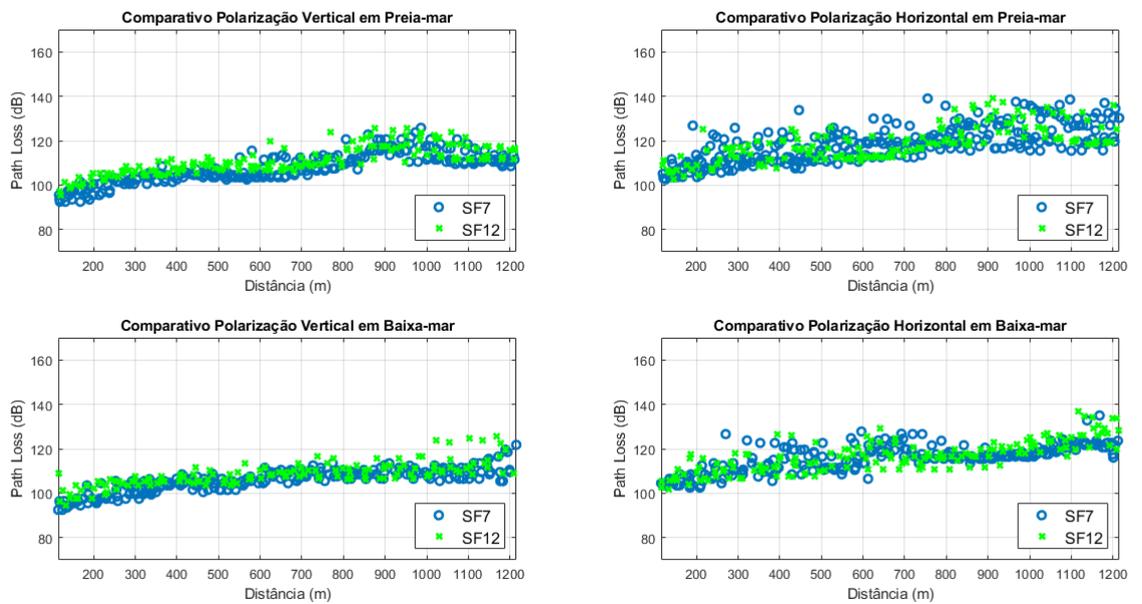
Ao analisar os dados desta dissertação, os quatro cenários não apresentam diferenças significativas nos resultados. Assim, infere-se que, em cenários semelhantes, não há variações relevantes na perda de propagação para diferentes SFs, o que também é abordado em (HWANG CHAO-SHUN CHEN, 2019), que apresenta modelos teóricos para calcular o *pathloss* em diversos cenários.

Figura 13. Médias dos dados medidos para diferentes polarizações



Fonte: O autor

Figura 14. Comparativo do impacto dos diferentes SFs no sinal recebido

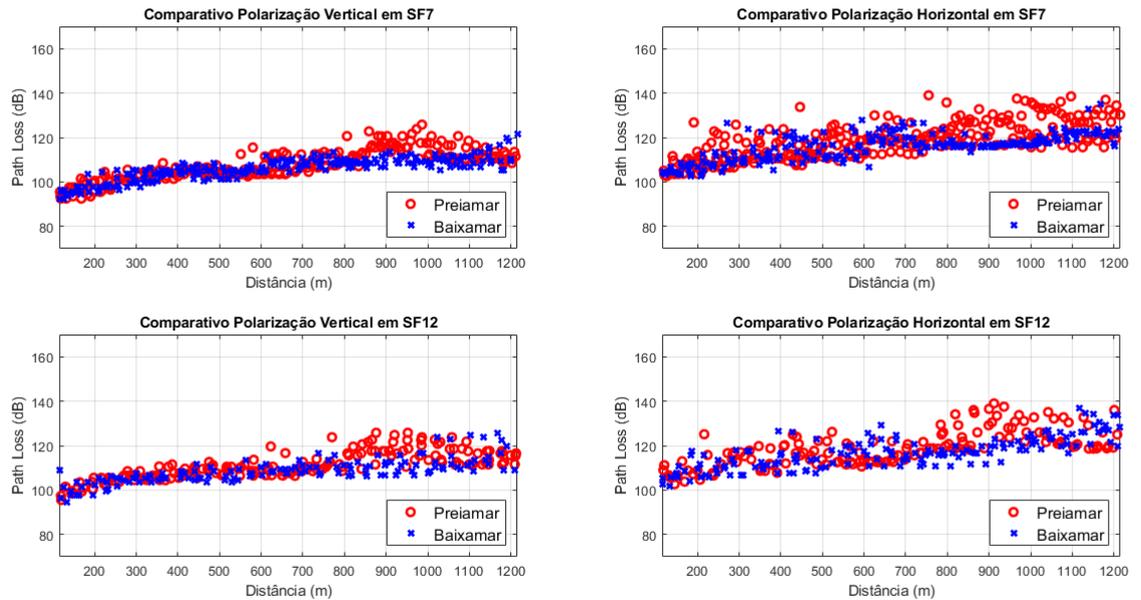


Fonte: O autor

4.2.3 O impacto da variação da maré e polarização das antenas

Como esperado, o efeito das marés afeta a perda de propagação do sinal. A figura 15 mostra a média da perda de propagação ao longo do trajeto em diferentes níveis da maré para todas as configurações.

Figura 15. Médias dos dados medidos para diferentes alturas de marés



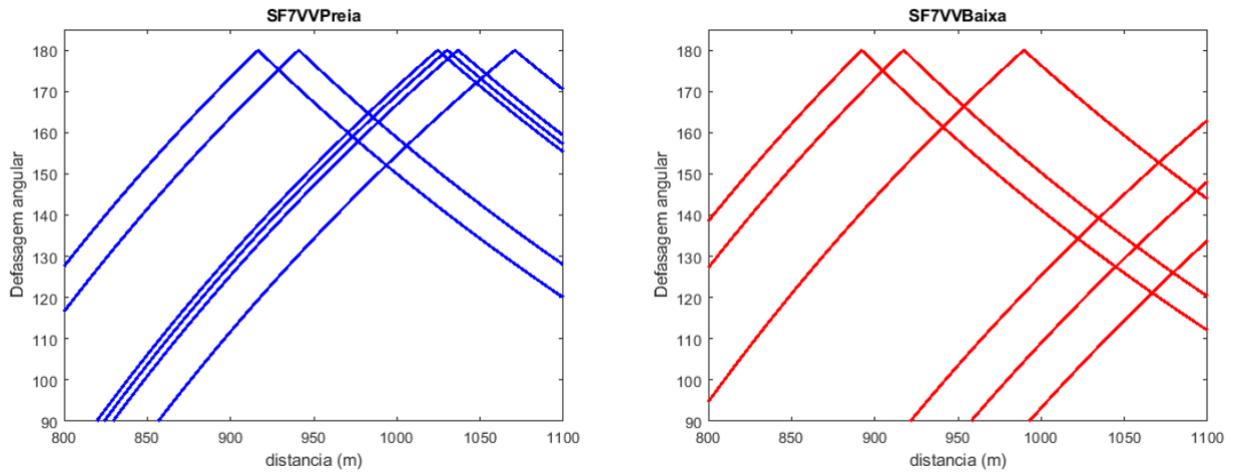
Fonte: O autor

Os resultados são consistentes com os apresentados em (GAITAN, 2022), que indicam que a maré alta afeta negativamente o sinal recebido em comparação à maré baixa. Vale destacar que a variação de altura entre as marés é de pouco mais de 2 metros, assim como nesta dissertação, com a principal diferença sendo a altura do transmissor, que em (GAITAN, 2022) estava a 1,5 metros da superfície da água durante a maré alta.

Notavelmente, quando em preia-mar, há uma perda de propagação maior em torno de 1000m em todas as configurações. Quando em baixa-mar, essa perda ocorre majoritariamente em torno de 1200m. Uma possível causa deste efeito, é o ângulo de incidência diferente da componente refletida para cada altura de maré.

Conforme visto nas figuras 10 e 11, os pontos onde há soma destrutiva das componentes se dão em distâncias diferentes, ou seja, em baixa-mar o ponto onde a perda de propagação é maior é deslocado em relação à preia-mar. Uma prova de tal fato, é visto na Figura 16 que mostra a diferença de fases entre as componentes do MDR nas 6 amostras que compõem o cenário de Polarização Vertical, com SF7, em préia-mar.

Figura 16. Defasagem das componentes SF7 VV em préiamar e baixamar



Fonte: O autor

De acordo com a figura, quando em polarização vertical e utilizando SF7, entre 800m e 1100m de distância, a defasagem das componentes em préiamar é majoritariamente destrutiva, estando todas as medições com o máximo de defasagem dentro deste espaço, o que não ocorre em baixa-mar.

4.3 Resultados do Modelo Proposto

Os resultados desta seção foram obtidos após a aplicação da metodologia demonstrada no capítulo 3. Para efeitos de referência, é apresentado a Média e o Desvio Padrão dos dados de *Pathloss* medidos na Tabela 6 — que ratifica os dados da Seção 4.2.1.

Cenário	Média (dB)	Desvio Padrão (dB)
SF7 VV Preia-mar	116.1	7.0
SF7 HH Preia-mar	123.3	8.9
SF7 VV Baixa-mar	114.4	6.2
SF7 HH Baixa-mar	125.0	7.6
SF12 VV Preia-mar	119.4	7.1
SF12 HH Preia-mar	127.1	8.7
SF12 VV Baixa-mar	118.1	7.0
SF12 HH Baixa-mar	125.6	8.2

Tabela 6. Valores das Médias e Desvio Padrão das medições em dB

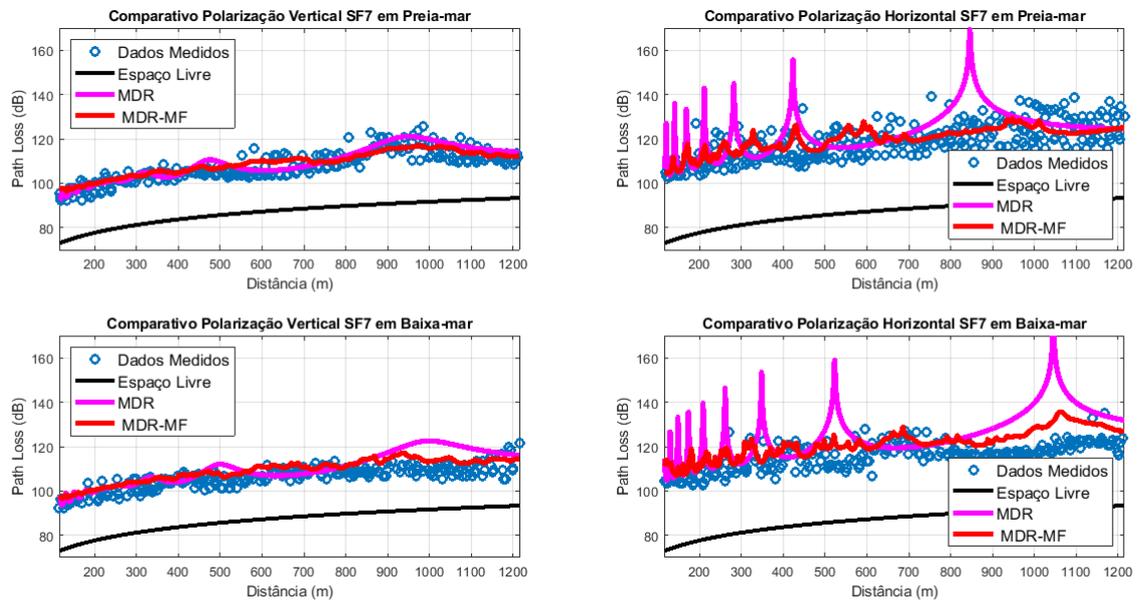
A média dos dados de *pathloss* medidos é comparada com o Modelo de Perda de Propagação em Espaço Livre, nossa referência básica, além de ser comparada com o MDR e o MDR-MF — este último utilizando os dados de velocidades reais das medições, ou seja, com a velocidade variando durante o percurso. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 17 para SF7, e na Figura 18 para SF12, além de apresentar os resultados em dados numéricos na Tabela 8.

Além disso, a quantidade de pacotes perdidos durante as transmissões foi contabilizada e está apresentada na Tabela 7. Apesar da baixíssima quantidade de pacotes perdidos, o resultado está em consonância com trabalhos previamente publicados, como em (PARRI L.; PARRINO, 2019), que demonstram a resiliência do sinal LoRa.

	Percentual médio de perda de pacote (%)
SF7 VV Preiamar	0.7
SF7 HH Preiamar	1.4
SF7 VV Baixamar	2.3
SF7 HH Baixamar	2
SF12 VV Preiamar	0
SF12 HH Preiamar	2.5
SF12 VV Baixamar	2
SF12 HH Baixamar	1.8

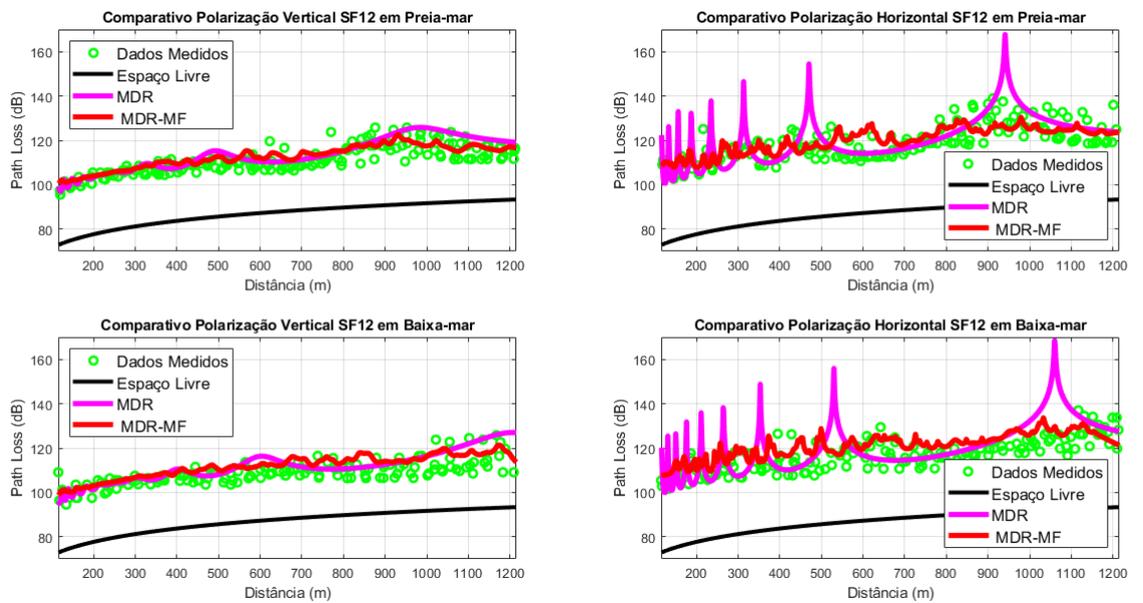
Tabela 7. Valores Médios de perda de pacote

Figura 17. Comparativo dos resultados Para SF7



Fonte: O autor

Figura 18. Comparativo dos resultados Para SF12



Fonte: O autor

	Espaço Livre	MDR	MDR-MF
SF7VVPreia	21,4493	5,2118	3,3583
SF7HHPreia	32,3665	9,9891	5,5135
SF7VVBaixa	19,54	6,2167	3,919
SF7HHBaixa	29,5017	13,9378	6,7502
SF12VVPreia	24,413	4,5789	3,3276
SF12HHPreia	32,5987	7,5085	5,3541
SF12VVBaixa	22,2907	4,9408	4,2006
SF12HHBaixa	29,922	9,6322	6,4984

Tabela 8. Valores Médios de RMSE das medições para SF7 e SF12 em dB

Notavelmente, os modelos MDR e MDR-MF apresentam resultados semelhantes em polarização vertical. No entanto, o MDR-MF exhibe valores mais próximos da média dos dados medidos. Ao compararmos a polarização horizontal, observamos que o MDR-MF apresenta resultados significativamente mais alinhados aos dados medidos, especialmente ao acompanhar estes mesmos dados nos pontos de inversão de fase do MDR. Isso confirma que o MDR-MF é a melhor escolha para a predição da perda de propagação em um ambiente semelhante ao das medições, especialmente quando as antenas estão em polarização horizontal.

5 Conclusão

O presente trabalho desenvolveu uma metodologia para a proposição de um modelo de propagação baseado em dados coletados e na literatura prévia, teorizou um novo modelo de propagação, e avaliou seus resultados. Além disso, comparou os resultados obtidos com outros modelos de propagação, demonstrando resultados superiores, considerando os dados medidos.

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica avaliando os trabalhos publicados entre 2018 e junho de 2024, em publicações de Qualis A1 disponíveis na plataforma de periódicos da Capes. Entre os trabalhos considerados, poucos avaliaram os efeitos de águas fluviais em florestas tropicais nos modelos de propagação de dispositivos LoRa, e nenhum avaliou os efeitos da mudança de fase ocasionados pelo deslocamento do receptor.

Posteriormente, uma campanha de medições foi realizada em oito configurações diferentes para que os dados reais pudessem ser comparados com o modelo proposto. As coletas de dados ocorreram em preia-mar e baixa-mar, utilizando SF7 e SF12, além de polarizações de antena vertical e horizontal.

Os resultados do modelo proposto, em relação aos dados medidos, foram comparados com os resultados referentes ao modelo de perda de propagação no espaço livre e ao modelo de Dois Raios usual. O modelo proposto apresentou resultados superiores aos demais modelos utilizados neste trabalho, principalmente em polarização horizontal.

5.1 Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, pretende-se aferir o impacto da velocidade de deslocamento do receptor na precisão do MDR-MF e na perda de pacotes.

Referências

- ALTAF C. YUNFEI, e. Z. G. K. A. “effect of user mobility and channel fading on the outage performance of uav communications. *IEEE Trans. Wireless Commun*, v. 9, n. 3, 2020. Citado na página 14.
- ANDREOU C. X. MAVROMOUSTAKIS, J. M. B. E. K. M. G. M. A.; MUMTAZ, S. Uav trajectory optimisation in smart cities using modified a* algorithm combined with haversine and vincenty formulas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 72, n. 8, 2023. Citado na página 30.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc, 2015. ISBN 978-1-118-642060-1. Citado na página 26.
- BARBOSA B.S.D.S.; CRUZ, H. M. A. C. C. F. F. E. L. A. J. C. G. B. F. Application of artificial neural networks for prediction of received signal strength indication and signal-to-noise ratio in amazonian wooded environments. *Sensors*, v. 24, n. 2542, 2024. Citado na página 37.
- BUSHNAQ OSAMA M., A. C.; AL-NAFFOURI., T. Y. The role of uav-iot networks in future wildfire detection. *IEEE internet of things journal*, v. 8, n. 23, 2021. Citado na página 14.
- CALLEBAUT, G.; PERRE, L. V. der. Characterization of lora point-to-point path loss: Measurement campaigns and modeling considering censored data. *IEEE internet of things journal*, v. 7, n. 6488907, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- CARDOSO, M. M. C. *Redes Neurais Aplicadas à Modelagem de Canais de Comunicação Utilizando VANTs e Dispositivos IoT*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2023. Citado na página 33.
- CASTRO, B. S. L. *Modelo de propagação para redes sem fio fixas na banda de 5,8 GHz em cidades típicas da região amazônica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. Citado na página 25.
- CHALL RIDA, S. L. E.; HELOU, M. E. Lorawan network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in lebanon. *IEEE internet of things journal*, v. 6, n. 6488907, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- ERAS D. K. NAKATA DA SILVA, L. C. F. J. B. B. J. P. L. d. A. L. E. C.; CAVALCANTE, G. P. dos S. A radio propagation model for a rainforest–river environment using utd and geometrical optics. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, v. 21, n. 7727, 2022. Citado na página 19.
- GAITAN, M. G. Modeling lora communications in estuaries for iot environmental monitoring systems. *IEEE SENSORS JOURNAL*, v. 22, n. 21, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 44.
- GOVINDAN K. ZENG, e. P. M. K. “probability density of the received power in mobile networks. *IEEE Trans. Wireless Commun*, v. 10, n. 11, 2011. Citado na página 14.

GUTIÉRREZ-GÓMEZ A.; RANGEL, V. E. R. D. J. A. R. L.-D. I. C. J. M.-C. O. L.-G. M. G. Y. A propagation study of lora p2p links for iot applications: The case of near-surface measurements over semitropical rivers. *Sensors*, v. 21, n. 6872, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

GUTIÉRREZ-GÓMEZ VÍCTOR RANGEL, R. M. E. J. G. D. R. A. J. L.-D. I. C. O. M.-C. M. L.-G. Y. G. A. A propagation study of lora p2p links for iot applications: The case of near-surface measurements over semitropical rivers. *Sensors*, v. 21, n. 6872, 2021. Citado na página 14.

HAXHIBEQIRI INGRID MOERMAN, J. H. J. Design and performance evaluation of a lora-based mobile emergency management system (locate). *Ad Hoc Networks*, v. 6, n. 2, 2019. Citado na página 14.

HWANG CHAO-SHUN CHEN, T.-T. K. W.-C. S. L.-C. A bridge between the smart grid and the internet of things: Theoretical and practical roles of lora. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, v. 113, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 16, 19 e 42.

LORA. *LoRa*. 2023. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/>>. Citado na página 14.

NETO, N. C. M. *Fuzzy C-Means Based Gateway Placement Algorithm for LoRaWAN*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2020. Citado na página 23.

PARRI L.; PARRINO, S. P. G. P.-A. Low power wide area networks (lpwan) at sea: Performance analysis of offshore data transmission by means of lorawan connectivity for marine monitoring applications. *Sensors*, v. 19, n. 3239, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 46.

PARSONS, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc, 2000. ISBN 0-470-84152-4. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 42.

RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall PTR, 2002. ISBN 0-13-042232-0. Citado 8 vezes nas páginas 24, 26, 27, 29, 31, 37, 38 e 42.

RIBEIRO CAIO M. M. CARDOSO, A. B. S. C.-D. F. M. K. S. d. O. J. P. L. A. M. C. d. A. N. F. J. B. B. L. Modelo de perda de propagação para lora em terreno misto:terra-rio. *Anais da XIII Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação: Encom 2023*, 2023. Citado na página 19.

RODRIGUES, M. *Técnicas de traçado de raios em três dimensões para cálculo de campos em ambientes interiores e exteriores*. Dissertação (Mestrado) — PUC/Rio, Rio de Janeiro, 2000. Citado na página 27.

SCIULLO ANGELO TROTTA, M. D. F. L. Design and performance evaluation of a lora-based mobile emergency management system (locate). *Ad Hoc Networks*, v. 96, n. 101993,, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.

SCIULLO ANGELO TROTTA, M. D. F. L. Low overhead scheduling of lora transmissions for improved scalability. *IEEE internet of things journal*, v. 6, n. 101993, 2020. Citado na página 14.

SEMTECH. *About LoRa Alliance®*. 2015. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>>. Citado na página 19.

SEMTECH. *LoRa™ Modulation Basics*. 2015. Disponível em: <<https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJk/yDEcfAkD9qEz6oG3PJryoHKas3UMsMDa3TFqz1UQOkM>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 24.

SEMTECH. *137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*. 2016. Disponível em: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>>. Citado na página 23.

SEMTECH. *LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview*. 2019. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

SIGFOX. *Sigfox*. 2023. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/>>. Citado na página 14.

SILVA, F. L. da. *Metodologia para obtenção dos pontos de segmentação do modelo larga escala multi declive usando algoritmo genético*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2021. Citado na página 26.

SOARES, A. J. P. *Avaliação da Propagação do Sinal LoRa e Desenvolvimento de um Método para Auxiliar o Planejamento de Redes IoT usando Otimização do Modelo Hata*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Citado na página 22.

U-BLOX. *NB-IoT*. 2023. Disponível em: <<https://www.u-blox.com/en/narrowband-iot-nb-iot>>. Citado na página 14.

WANG, Y.; ZHENG, X.; LIU, L.; MA, H. Polartracker: Attitude-aware channel access for floating low power wide area networks. *IEEE Press*, v. 30, n. 4, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

XU, W. Measurement, characterization, and modeling of lora technology in multifloor buildings. *IEEE internet of things journal*, v. 7, n. 1, 2020. Citado na página 14.