

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

Sofia Pereira Campos

**ESTRATÉGIA DE NAVEGAÇÃO COM MULTI-ROBÔS EM  
AMBIENTES CONFINADOS VISANDO MELHORIA DA  
COBERTURA DE SINAL DE RÁDIO**

Belo Horizonte

2025

Sofia Pereira Campos

**ESTRATÉGIA DE NAVEGAÇÃO COM MULTI-ROBÔS EM  
AMBIENTES CONFINADOS VISANDO MELHORIA DA  
COBERTURA DE SINAL DE RÁDIO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestra em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas

Belo Horizonte

2025

C198e	<p>Campos, Sofia Pereira.  Estratégia de navegação com multi-robôs em ambientes confinados visando melhoria da cobertura de sinal de rádio [recurso eletrônico] / Sofia Pereira Campos. - 2025.  1 recurso online (71 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Gustavo Medeiros Freitas.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Robôs móveis - Teses. 3. Robótica - Teses. 4. Navegação de robôs móveis - Teses. 5. Automação - Teses.  I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**Escola de Engenharia**

COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM Engenharia Elétrica

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**"Estratégia de Navegação Com Multi-robôs em Ambientes Confinados Visando  
Melhoria da Cobertura de Sinal de Rádio"**

**Sofia Pereira Campos**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 16 de maio de 2025.

Por:

**Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas**  
DEE (UFMG) - Orientador

**Prof. Dr. Gustavo Pessin**  
Controle e Robótica (ITV)

**Prof. Dr. Rogério Rodrigues Lima**  
DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Medeiros Freitas, Professor do Magistério Superior**, em 19/05/2025, às 09:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Rodrigues Lima, Professor do Magistério Superior**, em 30/05/2025, às 13:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Pessin, Usuário Externo**, em 02/06/2025, às 12:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4194213** e o código CRC **22304DE9**.

---

Referência: Processo nº 23072.228383/2025-05

SEI nº 4194213

*Dedico este trabalho a meus pais, que sempre me incentivaram na continuidade dos estudos, e a todos que contribuíram de qualquer forma para a conclusão do mesmo.*

# Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof Dr Gustavo Medeiros Freitas por todo apoio técnico durante o desenvolvimento desta dissertação.

À minha família por todo o suporte e apoio emocional e, principalmente, aos meus pais, Sandra e Edmar, pelo incentivo à continuidade dos meus estudos.

Aos meus colegas do laboratório CORO e do Instituto Tecnológico Vale por todo conhecimento compartilhado e apoio no desenvolvimento desta dissertação.

À UFMG, pela oportunidade de estudar num ambiente de excelência, com laboratórios e estruturas adequadas para o desenvolvimento da dissertação.

A todos os mestres que me auxiliaram ao longo de minha formação e me agradeceram com seus sábios ensinamentos.

*“É muito fraco o poder dos nossos órgãos sensitivos e também muito limitado, com relação aos fenômenos conhecidos e por conhecer, que se dão no mundo, e ainda mais com relação a este mesmo mundo..”*

*(Roberto Landell de Moura).*

# Resumo

A comunicação eficiente entre robôs móveis é um fator crítico para a realização de tarefas de inspeção em ambientes confinados, como galerias subterrâneas, dutos e minas. Neste contexto, a propagação do sinal de rádio enfrenta desafios significativos devido à presença de obstáculos, atenuação do sinal e efeitos multipercurso. Esta dissertação propõe uma estratégia de navegação para múltiplos robôs que melhora a cobertura do sinal de rádio, garantindo comunicação estável e contínua durante operações de teleoperação e inspeção. A abordagem é baseada no posicionamento dinâmico de robôs repetidores, levando em consideração a geometria do ambiente e modelos de propagação do sinal. Diferentes modelos de propagação de sinal foram analisados, incluindo o modelo TwoRay, LogNormal e LogNormal Shadowing, permitindo a estimativa da perda de potência do sinal sob diversas condições. Para cada modelo de propagação é realizada uma análise estatística que divide o ambiente inspecionado em diferentes regiões de interesse e retorna qual o melhor modelo para cada região, isolando características locais da propagação. A principal contribuição dessa dissertação é o desenvolvimento de um algoritmo de navegação multi-robô que otimiza a comunicação em ambientes confinados, possibilitando a ampliação do uso de robôs móveis em tarefas críticas. Para a implementação da abordagem, foram coletados dados de potência do sinal de rádio fornecidos pela interface do rádio Ubiquiti M900. Além disso, dois robôs foram controlados: o EspeleoRobô, que funciona como cliente da rede, e o Pioneer 3-DX, que opera como repetidor de sinal. Para validar a estratégia proposta, foram realizados experimentos em cenários controlados e simulações no ambiente CoppeliaSim. Os resultados demonstram que a implementação dos robôs repetidores melhora a cobertura do sinal em mais de 50% e reduz significativamente os pontos de perda de comunicação, possibilitando operações mais seguras e eficientes.

Palavras-chave: navegação multi-robô; cobertura de sinal de rádio indoor; robôs móveis; ambientes confinados.

# Abstract

Efficient communication between mobile robots is a critical factor for performing inspection tasks in confined environments, such as underground galleries, ducts, and mines. In this context, radio signal propagation faces significant challenges due to the presence of obstacles, signal attenuation, and multipath effects. This dissertation proposes a navigation strategy for multiple robots that improves radio signal coverage, ensuring stable and continuous communication during teleoperation and inspection operations. The approach is based on the dynamic positioning of relay robots, considering the environment's geometry and signal propagation models. Different signal propagation models were analyzed, including the TwoRay, LogNormal, and LogNormal Shadowing models, allowing for the estimation of signal power loss under various conditions. For each propagation model, a statistical analysis was conducted that divides the inspected environment into different regions of interest and determines the best model for each region, isolating local propagation characteristics. The main contribution of this dissertation is the development of a multi-robot navigation algorithm that optimizes communication in confined environments, enabling the expanded use of mobile robots in critical tasks. For the implementation of the approach, signal power data were collected from the Ubiquiti M900 radio interface. In addition, two robots were controlled: the EspeleoRobô, which functions as the network client, and the Pioneer 3-DX, which operates as a signal repeater. To validate the proposed strategy, experiments were carried out in controlled scenarios and simulations in the CoppeliaSim environment. The results show that the implementation of relay robots improves signal coverage by more than 50% and significantly reduces communication loss points, enabling safer and more efficient operations.

Keywords: *multi-robot navigation; indoor radio signal coverage; mobile robots; confined environments.*

# Lista de Figuras

Figura 1 – EspeleoRobô sendo teleoperado durante atividades de inspeção em ambientes confinados. Fonte: [Campos et al., 2023a]. . . . .	21
Figura 2 – Ilustração dos fenômenos ondulatórios associados a atenuação das ondas eletromagnéticas. Fonte: [MUNDO EDUCAÇÃO]. . . . .	31
Figura 3 – Ilustração do modelo de dois raios. Adaptado de [da Silva Mello, 2006].	33
Figura 4 – Esquema da metodologia empregada na análise estatística para comparação dos modelos de propagação de sinal. . . . .	39
Figura 5 – Metodologia de divisão das regiões de interesse. . . . .	40
Figura 6 – Esquema da metodologia empregada na estratégia de navegação proposta.	41
Figura 7 – Dispositivo Robótico EspeleoRobô. Fonte: Cid et al. [2024] . . . . .	45
Figura 8 – Dispositivo Robótico Pioneer 3-DX. Fonte: Cid et al. [2024] . . . . .	46
Figura 9 – Antenas e rádios utilizados nos experimentos. Fonte: Adaptado de Cid et al. [2024]. . . . .	47
Figura 10 – Topologia de Rede configurada durante os experimentos. . . . .	48
Figura 11 – Dispositivo Robótico EspeleoRobô simulado. . . . .	48
Figura 12 – Dispositivo Robótico Pioneer 3-DX simulado. . . . .	48
Figura 13 – Simulação desenvolvida no ambiente de simulação virtual CoppeliaSim	49
Figura 14 – Experimentos realizados em um ambiente de corredor no prédio de Engenharia da UFMG. . . . .	51
Figura 15 – Mapa do ambiente explorado com o trajeto (em amarelo) percorrido pelo robô cliente durante o 1 <sup>o</sup> experimento. Fonte: Campos et al. [2023b].	52
Figura 16 – Posição (X/Y) do robô cliente em metros durante o 1 <sup>o</sup> experimento em relação à potência do sinal recebido pela antena do robô cliente ( $P_{re}$ ) em dBm e a potência recebida pela antena da base ( $P_{rb}$ ) em dBm. Fonte: Campos et al. [2023b]. . . . .	53
Figura 17 – Comparação entre os valores medidos e os erros estimados para a potência do sinal. Fonte: Campos et al. [2023b]. . . . .	53
Figura 18 – Posição (X/Y) do robô cliente em metros durante o 2 <sup>o</sup> experimento em relação à potência do sinal recebido para a antena do robô cliente ( $P_{re}$ ) em dBm e a antena da base ( $P_{rb}$ ) em dBm. Fonte: Campos et al. [2023b].	54
Figura 19 – Metodologia de posicionamento dos robôs para o segundo experimento.	55

Figura 20 – Posição (X/Y) do robô cliente em metros durante o 2º experimento em relação à potência do sinal recebido pela antena do robô cliente ( $P_{re}$ ) em dBm e a potência recebida pela antena da base ( $P_{rb}$ ) em dBm. Fonte: Campos et al. [2023b]. . . . .	55
Figura 21 – Teste de normalidade dos resíduos do modelo ANOVA para o segundo experimento. . . . .	56
Figura 22 – Verificação da homocedasticidade (igualdade das variâncias) dos resíduos do modelo ANOVA no segundo experimento. . . . .	56
Figura 23 – Avaliação da independência dos resíduos do modelo ANOVA para o segundo experimento. . . . .	57
Figura 24 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 10 m × 10 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	58
Figura 25 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 20 m × 20 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	59
Figura 26 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 30m × 30 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	60
Figura 27 – Potência de sinal de rádio (dBm) em função da distância (X-Y) em metros. Fonte: adaptado de Cid [2023]. . . . .	61
Figura 28 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 9 m × 4 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	62
Figura 29 – Simulação do sistema de navegação multi-robô em ambiente virtual modelado a partir do ambiente real de testes. . . . .	65

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Expoente de perda de percurso para diferentes ambientes Rappaport [2009] . . . . .	31
Tabela 2 – Resultados dos erros de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo 10 m × 10 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	58
Tabela 3 – Resultados da análise de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 10 m × 10 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	58
Tabela 4 – Resultados dos erros de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 20 m × 20 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	59
Tabela 5 – Resultados da análise de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 20 m × 20 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	59
Tabela 6 – Resultados dos erros de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 30 m × 30 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	60
Tabela 7 – Resultados da análise de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 30 m × 30 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	60
Tabela 8 – Resultados dos erros de ajuste para a segunda base de dados com tamanho fixo de 9 m × 4 m. Fonte: Campos et al. [2024]. . . . .	62
Tabela 9 – Resultados da análise de ajuste para a segunda base de dados com tamanho fixo de 9 m × 4 m. Campos et al. [2024]. . . . .	63

# Lista de Algoritmos

1	Algoritmo para controle de robô com repetidor de sinal . . . . .	41
2	Função para verificação de linha de visada livre . . . . .	43

# Lista de Abreviaturas e Siglas

ANOVA	Análise de Variância
EAM	Erro Absoluto Médio
EQM	Erro Quadrático Médio
LOS	Linha de Visada Direta (Line of Sight)
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (Multiple Input Multiple Output)
NR-33	Norma Regulamentadora 33 (Segurança e Saúde em Espaços Confinados)
NBR 16577	Norma Brasileira para Espaços Confinados
ROS	Sistema Operacional de Robôs (Robot Operating System)

# Lista de Símbolos

$P_r(d)$	Potência recebida a uma distância $d$ em Watts
$P_t$	Potência transmitida em Watts
$G_t$	Ganho da antena transmissora
$G_r$	Ganho da antena receptora
$d$	Distância entre as antenas em metros
$\lambda$	Comprimento de onda da portadora em metros
$n$	Expoente de perda de percurso
$X$	Variável aleatória para sombreamento
$\mu_X$	Média da variável aleatória $X$
$\sigma_X$	Desvio padrão da variável aleatória $X$
$L$	Fator de perda não relacionado à propagação
$P_0(d_0)$	Potência de referência a uma distância conhecida $d_0$
$H_T$	Altura da antena transmissora
$H_R$	Altura da antena receptora
dB	Decibél
$\mu$	Média populacional
$H_0$	Hipótese nula
$H_1$	Hipótese alternativa
$p$	p-valor
$D$	Estatística de teste
$d_e$	Valor observado da estatística

$d_w$	Estatística do teste de Durbin-Watson
$e_t$	Resíduos do modelo de observação
$t$	Modelo de observação
$n_a$	Número total de observações
$\sigma$	Variâncias entre os grupos analisados
$q_\alpha$	Valor crítico da distribuição $q$ de Tukey para um nível de significância $\alpha$
MQE	Média quadrática do erro obtida no ANOVA
$r$	Número de repetições de cada tratamento
$\bar{X}$	Média do grupo
DMS	Diferença Mínima Significativa
$y_i$	valores observados
$\hat{y}_i$	valores previstos pelo modelo

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Motivação	20
1.2	Objetivos	21
1.3	Contribuições	22
1.4	Estrutura da Dissertação	23
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>25</b>
2.1	Soluções de navegação com múltiplos robôs para melhoria da comunicação de rádio em ambientes confinados	25
2.2	Soluções para previsão da potência de sinal de rádio em ambientes confinados durante a navegação com múltiplos robôs	27
<b>3</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>29</b>
3.1	Propagação de Sinal de Rádio	29
3.1.1	Equação de Friss	29
3.1.2	Efeito Multipercurso	31
3.1.3	Modelo Log Normal	32
3.1.3.1	Modelo Log Normal Shadowing	32
3.1.3.2	Modelo de Dois Raios	33
3.2	Análise de Variância (ANOVA)	34
3.2.1	Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk	34
3.2.2	Teste de Independência de Durbin-Watson	35
3.2.3	Teste de Homocedasticidade de Flinger-Killeen	35
3.2.4	Teste das Comparações de Tukey	36
3.2.5	Erro Absoluto Médio (EAM) e Erro Quadrático Médio (EQM)	37
<b>4</b>	<b>Análise da Propagação de Sinais de Rádio e Estratégia de Navegação Multi-Robôs</b>	<b>38</b>
4.1	Análise Estatística do Ajuste de Modelos de Propagação de Sinal com Base na Divisão do Ambiente em Regiões de Interesse	39
4.2	Estratégia de navegação multi-robôs com base na cobertura de sinal de rádio	40
<b>5</b>	<b>Configuração Experimental</b>	<b>44</b>
5.1	Dispositivos Robóticos Utilizados	44
5.1.1	EspeleoRobô	44
5.1.2	Pioneer 3-DX	45
5.2	Rádios e Antenas	46
5.3	Robôs Virtuais e Ambiente de Simulação CoppeliaSim	47

<b>6</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	<b>50</b>
6.1	Descrição do ambiente utilizado nos experimentos	50
6.2	Experimentos com 1 robô para modelagem de sinal	51
6.3	Experimentos com 2 robôs para modelagem de sinal	54
6.4	Divisão de regiões com base na intensidade do sinal	55
6.4.1	Resultados para região de interesse de tamanho fixo $10\text{ m} \times 10\text{ m}$	57
6.4.2	Resultados para região de interesse de tamanho fixo $20\text{ m} \times 20\text{ m}$	59
6.4.3	Resultados para região de interesse de tamanho fixo $30\text{ m} \times 30\text{ m}$	60
6.4.4	Análise estatística para segunda base de dados	60
6.5	Considerações finais sobre os resultados encontrados nos testes	62
6.6	Simulação do sistema de navegação multi-robôs	64
<b>7</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>66</b>
7.1	Trabalhos Futuros	67
	<b>Referências</b>	<b>68</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A utilização de robôs móveis tem se tornado uma alternativa essencial para atuação em ambientes críticos, onde a presença humana representa riscos elevados ou é inviável. Esses dispositivos são amplamente empregados em operações de busca e resgate, inspeção industrial, missões de reconhecimento em zonas de risco biológico, exploração espacial, entre outros cenários que exigem autonomia, robustez e segurança. Em tais contextos, robôs móveis são utilizados para coletar dados, mapear ambientes, detectar anomalias e até mesmo prestar auxílio em tarefas operacionais.

Um campo de aplicação particularmente relevante é a exploração de ambientes confinados, que representam riscos significativos à saúde e segurança de operadores humanos. De acordo com as normas [NR-33 \[2022\]](#) e [NBR 16577 \[2017\]](#), que regulamentam este tipo de trabalho e estabelecem procedimentos técnicos, ambientes confinados podem apresentar diversos riscos à saúde, como a presença de atmosferas perigosas, gases indesejados, temperaturas extremas, além dos riscos de desabamentos e afogamentos. As normas também definem que espaços confinados são caracterizados por terem meios limitados de entrada e saída, o que acarreta riscos adicionais relacionados ao aprisionamento de operadores.

Diante desses desafios, diversos projetos têm buscado soluções robóticas para inspeção e mapeamento em ambientes confinados. Um exemplo é o EspeleoRobô, desenvolvido pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV) em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) [Azpurua et al. \[2019\]](#), utilizado para inspeção e também para mapeamento tridimensional de cavernas e galerias subterrâneas [da Silva \[2021\]](#).

Além das aplicações em ambientes industriais e subterrâneos na Terra, a exploração de ambientes confinados tem ganhado destaque em cenários espaciais. Pesquisas conduzidas pela NASA investigam a possibilidade do uso de robôs móveis, como o cão-robô Spot [Boston Dynamics \[2024\]](#), na exploração de cavernas lunares e marcianas [Lewis \[2021\]](#), demonstrando o crescente interesse e a importância estratégica dessa tecnologia em ambientes hostis e de difícil acesso.

O aumento da demanda por dispositivos robóticos para exploração de ambientes confinados tem impulsionado a pesquisa científica sobre o tema. Um exemplo disso é o estudo de [Wynne et al. \[2022\]](#), que identifica 53 áreas emergentes e cruciais para a exploração de cavernas interplanetárias usando dispositivos robóticos. Dentre estas áreas um dos temas mais abordados é a comunicação nestes ambientes já que a disponibilidade de um link de comunicação entre uma base de controle e um robô que esteja realizando uma exploração possui limitações. A comunicação por ondas de rádio, uma das tecnologias mais utilizadas nesses contextos, enfrenta desafios significativos em relação à manutenção de intensidade do sinal uma vez que experimenta atenuação pelas paredes do ambiente e é afetada por fenômenos como reflexão, difração, espalhamento, dispersão, temperatura, umidade e efeitos multipercurso [Rappaport \[2009\]](#).

Considerando as limitações da tecnologia de comunicação sem fio por ondas de rádio em ambientes confinados esta dissertação propõe uma estratégia de navegação cooperativa com múltiplos robôs para operação em ambientes confinados. Esta estratégia leva em consideração a geometria do ambiente inspecionado e como esta afeta a manutenção do link de comunicação de forma a utilizar robôs repetidores de sinal para reestabelecimento do link de comunicação.

Inicialmente, são realizados experimentos com múltiplos robôs móveis em um ambiente semelhante a um corredor, avaliando a possibilidade de utilizar robôs como repetidores de sinal em regiões críticas, como curvas e quinas, para manter o link de comunicação. Os dados obtidos são então submetidos a uma análise estatística, levando em conta os efeitos da propagação em diferentes regiões de interesse, a fim de compreender o comportamento do sinal de rádio. Para isso, são avaliados três modelos de propagação: LogNormal, LogNormal com sombreamento (Shadowing) e Dois Raios. Com base nos resultados obtidos, é desenvolvida uma simulação da estratégia proposta.

## 1.1 Motivação

Devido à necessidade de realizar atividades de inspeção técnica em ambientes confinados utilizando robôs móveis é necessário garantir uma comunicação eficiente entre os dispositivos e o ambiente externo. Neste contexto normalmente são utilizados rádios para garantir a comunicação entre uma antena externa (base de controle) e outras antenas receptoras fixadas na estrutura dos robôs móveis utilizados na inspeção. Embora a utilização da tecnologia de comunicação por rádio seja eficiente para inspeções em ambiente confinados que estejam em uma configuração de visada direta (linha de visão clara e desobstruída entre a base de controle e os robôs) a tecnologia encontra dificuldades de propagação de sinal de rádio quando o ambiente a ser inspecionado contém curvas ou objetos que possam obstruir a linha de visão do sinal.

No contexto do Instituto Tecnológico Vale conforme ilustrado pela Figura 1 o EspeleoRobô é utilizado para tarefas de inspeção em galerias de barragens, dutos ou túneis que muitas vezes possuem curvas e obstruções além de as paredes dos ambientes serem constituídas por diferentes materiais que podem causar interferência de sinal. Geralmente durante as atividade de inspeção o EspeleoRobô é teleoperado por distâncias curtas e em visada direta onde seja possível obter uma potência de sinal suficiente para não perder a comunicação com a base de controle. Além disso, muitas vezes é conectado um cabo umbilical ao robô como medida de resgaste, o que também possui limitações com o aumento da distância uma vez que o cabo utilizado fica cada vez mais pesado à medida que robô adentra no ambiente inspecionado. Outra limitação é que estes ambientes geralmente podem possuir umidade e terreno irregular o que também limita a instalação de equipamentos roteadores de sinal de rádio, uma vez que devido as condições de periculosidade associadas ao ambiente tornam o acesso humano restrito.



Figura 1 – EspeleoRobô sendo teleoperado durante atividades de inspeção em ambientes confinados. Fonte: [Campos et al., 2023a].

Devido a estes fatores de limitação de cobertura de sinal é essencial desenvolver uma estratégia que seja capaz de melhorar a cobertura de sinal utilizando roteamento de sinal assim como estipular por meio de modelos de propagação de rádio qual o comportamento do sinal para diferentes configurações do ambiente inspecionado. Esta medida é essencial para melhorar a comunicação de rádio entre robôs móveis em atividades de inspeção, principalmente no contexto do EspeleoRobô do Instituto Tecnológico Vale.

## 1.2 Objetivos

Considerando as limitações na cobertura de sinal em atividades de inspeção com robôs móveis em ambientes confinados, esta dissertação tem como objetivo desenvolver um algoritmo de navegação com múltiplos robôs que levem em consideração as condições do ambiente a ser inspecionado e que utilizem uma estratégia de roteamento de sinal com múltiplos robôs. Para tal os seguintes objetivos específicos são implementados:

- Investigar modelos de propagação de sinal de rádio que relacionem as condições do ambiente inspecionado à perda de propagação de sinal de rádio ao longo do caminho percorrido.
- Realizar testes com múltiplos robôs para emular cenários de navegação em ambientes confinados, com foco na simulação de condições de perda de propagação de sinal de rádio. Esses testes devem envolver o uso de robôs móveis como pontos de roteamento de sinal, com o objetivo de ampliar a cobertura de comunicação e avaliar a eficiência da transmissão de dados em áreas com limitações físicas e obstruções.
- Implementar uma metodologia para análise estatística de diferentes modelos de propagação de sinal de rádio, com a comparação do ajuste desses modelos em relação aos dados experimentais obtidos nos testes com múltiplos robôs.
- Implementação e validação de uma simulação de inspeção com múltiplos robôs em ambientes confinados utilizando a estratégia de navegação proposta. Essa simulação permite a comparação dos dados de navegação e cobertura de sinal obtidos experimentalmente com os resultados dos modelos empíricos, visando validar e ajustar os parâmetros da estratégia de navegação de acordo com o desempenho observado nos testes.

### 1.3 Contribuições

Durante o desenvolvimento desta dissertação, foram propostas e avaliadas diferentes abordagens para mitigar os desafios de conectividade em ambientes confinados durante a operação de robôs móveis. Foram realizados testes com múltiplos robôs cujos resultados foram utilizados para realizar uma análise estatística de ajuste de diferentes modelos de propagação de sinal em relação aos dados medidos. Esta metodologia desenvolvida permite segmentar o ambiente explorado em regiões distintas e identificar, para cada uma delas, o modelo que melhor representa a perda de potência do sinal, considerando as características físicas do espaço. A partir dos testes realizados e da análise estatística foi desenvolvido o sistema de navegação proposto nesta pesquisa que permite o deslocamento coordenado de múltiplos robôs, utilizando repetidores móveis que se posicionam com base em informações de visada direta (LOS) e intensidade do sinal modelado, de modo a maximizar a cobertura da rede durante a inspeção.

Essas contribuições foram divulgadas por meio de publicações em congressos e periódico científico:

- [Campos et al., 2024]: artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Automática 2024. Neste artigo intitulado “Análise de ajuste de modelos de cobertura de sinal de

rádio para experimentos indoor com múltiplos robôs” é apresentado um algoritmo que divide um ambiente a ser inspecionado em regiões, sendo que para cada região é feita uma análise de qual modelo de propagação de sinal de rádio melhor se ajusta aos dados. O objetivo principal do artigo é analisar o quanto as características do ambiente influenciam na perda de potência de sinal de rádio ao longo do caminho e inferir quais modelos são mais aptos para cada característica do ambiente.

- [Campos et al., 2023b]: artigo apresentado no 20th IEEE Latin American Robotics Symposium - LARS 2023. Neste artigo intitulado “Navigation Strategy with Multi-Robots in Confined Environments to Improve Radio Signal Coverage” é apresentada uma estratégia de navegação com múltiplos robôs que utiliza de condições de visada direta (LOS) para o posicionamento de robôs repetidores de forma a maximizar a cobertura do sinal de rádio durante atividades de inspeção em ambientes confinados.
- [Cid et al., 2024]: artigo publicado no Journal of Intelligent & Robotic Systems. Neste artigo intitulado “Wireless Communication Strategies for Robot Operation in Hazardous and Confined Environments: Signal Modeling, Path Planning, and Multi-Robot Approaches” é apresentado um conjunto de soluções para mitigar problemas de conectividade em atividades de inspeção utilizando robôs móveis.

### Contribuições Técnicas

Este projeto foi desenvolvido em parceria com o Instituto Tecnológico Vale (ITV) especificadamente no contexto do projeto EspeleoRobô tendo como um dos resultados a seguinte contribuição técnica:

- [Freitas et al., 2023]: relatório técnico publicado no ITVMI no contexto do projeto EspeleoRobô intitulado: Primeiro Relatório Parcial do Projeto “**Localização, Mapeamento e Comunicação em Cavas de Mina e Galerias de Barragens de Grande Extensão**”.
- [Freitas et al., 2024]: relatório técnico publicado no ITVMI no contexto do projeto EspeleoRobô intitulado: Segundo Relatório Parcial do Projeto “**Localização, Mapeamento e Comunicação em Cavas de Mina e Galerias de Barragens de Grande Extensão**”.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre as principais estratégias de aprimoramento da comunicação de sinal de rádio em ambientes confinados.

No Capítulo 3 , são abordados os fundamentos teóricos da propagação de sinal de rádio, incluindo métodos de perda de percurso e atenuação do sinal disponíveis na literatura.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada nesta dissertação, detalhando a estratégia de navegação proposta.

No Capítulo 5, são apresentadas as configurações dos experimentos realizados, com destaque para os dispositivos robóticos e equipamentos utilizados.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos, com ênfase no processo de coleta de dados experimentais, detalhamento dos experimentos e da simulação desenvolvida.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros, destacando as propostas de melhoria para o método de navegação desenvolvido nesta dissertação.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre trabalhos presentes na literatura que se relacionam com comunicação entre múltiplos robôs durante tarefas de navegação em ambientes confinados.

### 2.1 Soluções de navegação com múltiplos robôs para melhoria da comunicação de rádio em ambientes confinados

A competição DARPA Subterranean Challenge tem impulsionado avanços significativos na área de robótica autônoma, incentivando o desenvolvimento de soluções inovadoras para desafios complexos em ambientes subterrâneos. Esta iniciativa tem gerado inúmeros trabalhos relevantes, contribuindo para a evolução de tecnologias como percepção autônoma, mapeamento, planejamento de movimento e comunicação em condições extremas.

Neste contexto alguns trabalhos são relevantes em relação à estratégias de navegação relacionadas à comunicação em ambientes subterrâneos. No trabalho desenvolvido por [Agha et al. \[2021\]](#) a equipe TEAM CoSTAR desenvolveu a plataforma NeBula, um sistema de autonomia robótica projetado para operar em ambientes subterrâneos onde a navegação e a comunicação são desafiadoras. Neste trabalho a equipe implementou a estratégia de navegação CHORD para manter a conectividade e garantir a cobertura de sinal durante a missão subterrânea. Esta estratégia utilizou 3 tipos de agentes: agentes estáticos (estação base), agentes móveis (robôs) e agentes estáticos implantáveis (nós de retransmissão). Utilizando uma rede mesh resiliente, robôs móveis implantam nós de comunicação ao longo do percurso para estender a rede e garantir que os dados críticos cheguem à estação base, mesmo em ambientes com baixa visibilidade e desafios de propagação de sinal. A decisão de posicionar os nós é baseada no mapeamento 3D, nas rotas de dados, na relação sinal/ruído

e na largura de banda estimada, permitindo que a equipe maximize a cobertura de sinal e a comunicação entre robôs em condições complexas. Embora a tecnologia implementada fosse eficiente para aumentar a cobertura de sinal no ambiente explorado, o alcance da rede mesh se restringiu às áreas próximas à estação base (ou seja, à entrada do ambiente), o que apresentou uma limitação de comunicação. Como resultado, os robôs logo saíram do alcance da rede de comunicação e, na maior parte da missão, operaram de forma totalmente autônoma.

Outro trabalho relevante é o de [Hudson et al. \[2021\]](#), que aborda uma estratégia de comunicação em ambientes subterrâneos baseada no uso de uma rede mesh para conectar agentes robóticos a uma estação base. Para lidar com a degradação do sinal nesses ambientes, a equipe implementou nós de retransmissão descartáveis, que os robôs poderiam implantar ao longo do caminho para expandir a rede. Inicialmente, o conceito de operação consistia em os robôs implantarem uma cadeia de pequenos nós leves, criando uma espinha dorsal de comunicação com topologia em árvore, pela qual a maioria dos dados fluía de cada agente até a base. Esse sistema, no entanto, apresentou diversas limitações, pois operava em uma única banda de frequência, o que reduzia a largura de banda pela metade a cada salto e tornava a rede instável. Para contornar essas restrições, a equipe adotou uma nova abordagem, aumentando a autonomia dos agentes e permitindo que operassem fora do alcance da comunicação e retornassem para transmitir dados. Além disso, utilizaram uma combinação de nós de banda dupla (2,4 GHz e 5 GHz) e nós de banda única (5 GHz), o que garantiu maior resiliência e flexibilidade à rede, preservando a conectividade e facilitando a coleta de dados.

[Ohradzansky et al. \[2021\]](#) utilizaram uma estratégia com *beacons* compactos e robustos com antenas integradas e rádios de alta potência, montadas em uma caixa de alumínio resistente para suportar ambientes subterrâneos adversos. Esses *beacons* criavam uma rede mesh personalizada (*meshmerize*), priorizando a reconexão rápida dos robôs e permitindo que eles funcionassem como retransmissores uns para os outros com baixa latência. Fora do alcance da rede, os robôs continuavam a explorar de forma autônoma até atingirem os critérios estabelecidos pela equipe, como a descoberta de artefatos. Após completar a exploração, eles retornavam à área de cobertura de comunicação, onde os *beacons* permitiam a reconexão rápida e a transferência dos dados coletados, como relatórios de telemetria e artefatos. Esse sistema de comunicação garantiu alta eficiência e robustez, minimizando a latência e permitindo a troca contínua de informações entre os robôs e a base, mesmo em condições adversas no ambiente subterrâneo.

No trabalho de [Roucek et al. \[2021\]](#), foi empregada uma estratégia de comunicação em três níveis. A primeira forma de comunicação consistiu na conexão dos robôs móveis a uma rede Wi-Fi padrão, usada para transferir dados de alta demanda, como medições de sensores e vídeo em tempo real. No entanto, essa abordagem não foi suficiente para

cobrir longas distâncias, uma vez que o sinal Wi-Fi se deteriora rapidamente, o que exigiu a transição para o sistema de comunicação de médio alcance. Embora com uma largura de banda limitada a 1 Mbit/s, este sistema possibilitou a transmissão de dados essenciais, como vídeo de baixa qualidade, mapas e imagens de detecção de objetos, embora fosse necessário racionar a largura de banda entre os robôs. Para aumentar a redundância e a cobertura, os autores utilizaram também robôs equipados com módulos de longo alcance, que, apesar de oferecerem baixa largura de banda, permitiram a troca de informações cruciais entre os robôs e a estação base, além de estender a rede de comunicação por meio de nós de retransmissão.

No trabalho de [Tranzatto et al. \[2022\]](#), foram empregados tanto robôs terrestres quanto aéreos. Os robôs terrestres utilizam dispositivos comerciais off-the-shelf (ACKSYS Communications & Systems - EmbedAir1000), que operam nos modos ponto de acesso Wi-Fi, cliente, repetidor e MESH, enquanto os robôs aéreos atuam exclusivamente como clientes, conectando-se aos pontos de acesso mais próximos. Foram implementadas quatro estratégias para garantir a comunicação. A primeira consistiu no uso de uma rede sem fio ad hoc na faixa de 5,8 GHz, com os robôs conectados à rede em malha por meio de uma antena direcional de alta ganho, permitindo a comunicação com a Estação Base. A segunda estratégia envolveu o uso de um robô móvel, que foi equipado com um cabo de fibra óptica de 300 metros, uma antena de painel e um sistema multimodal de percepção. Na terceira, foi utilizada uma antena de painel fixada a um poste de PVC. A quarta estratégia empregou uma esfera de espuma equipada com um rádio Wi-Fi EmbedAir1000 e bateria, que era lançado manualmente para expandir gradualmente a rede sem fio em malha. O Supervisor Humano era responsável por decidir a localização dos nós de malha, levando em consideração a qualidade do sinal e a geometria do ambiente subterrâneo.

## 2.2 Soluções para previsão da potência de sinal de rádio em ambientes confinados durante a navegação com múltiplos robôs

Outra abordagem usual para melhoria da comunicação entre múltiplos robôs em tarefas de navegação em ambientes confinados é utilizar de modelos preditivos de mapas de conectividade. Neste contexto existem trabalhos relevantes na literatura como em [Clark et al. \[2022\]](#) que propõe um framework “Propagation Environment Modeling and Learning (PropEM-L)” que utiliza mapas tridimensionais derivados de sensores em tempo real de um ambiente para extrair informações sobre a linha de visão entre rádios e paredes/obstáculos atenuantes avaliando os impactos destes em termos de sombreamento, reflexão e difração. O trabalho utiliza também de aprendizado de máquina para se adaptar novos ambientes e prever um mapa de conectividade. Destaca-se também neste trabalho a

realização de experimentos com robôs móveis em ambiente subterrâneo, nos quais foram comparados diferentes modelos de propagação de sinal de rádio — Log-Normal, visibilidade direta, heurística de sombreamento, Two-Ray (dois raios), Knife-Edge (gume de faca) e reflexão-difração — em relação aos dados de sinal medidos, evidenciando o desempenho e a acurácia de cada abordagem.

Nesta mesma linha destaca-se o trabalho de [Luo et al. \[2025\]](#), um framework intitulado “Flexible Radio Mapping (FERMI)” que combina um modelo híbrido para previsão da potência de sinal de rádio. A abordagem desenvolvida pelos autores é dividida em três etapas principais: (1) propagação direta de um transmissor (Tx) até seus pontos com linha de visada (LOS), (2) propagação multipercurso entre os pontos LOS de Tx e receptor (Rx), e (3) propagação direta dos pontos LOS do Rx até o próprio Rx. As etapas (1) e (3) são tratadas com modelos de propagação de sinal conhecidos, enquanto a etapa (2), que representa os efeitos mais complexos da propagação multipercurso, é modelada por uma rede neural treinada com dados esparsos e capaz de generalizar para pares Tx-Rx não presentes no treinamento. O framework se destaca por sua capacidade de prever com precisão a intensidade do sinal em posições não vistas, permitir coleta de dados totalmente autônoma com múltiplos robôs e escalar para diferentes tamanhos de equipe, sendo uma solução eficiente e adaptável para mapeamento de sinais com erro médio de previsão inferior a 7 dBm.

Além da aplicação de nós de retransmissão e redes mesh com múltiplos robôs, uma abordagem alternativa, como apresentada por [Saboia et al. \[2022\]](#), considera também fatores característicos da rede, como escalabilidade e largura de banda, para apoiar a tomada de decisão na coordenação da rede. Adicionalmente, os autores implementam um modelo preditivo de sinal, permitindo a integração de adaptações dinâmicas da rede em tempo real.

# Capítulo 3

## Fundamentos Teóricos

Este capítulo aborda os fundamentos teóricos da propagação de sinal de rádio em ambientes confinados e apresenta os principais modelos de propagação. Esses modelos são fundamentais para compreender as limitações e as possibilidades de comunicação sem fio em ambientes confinados permitindo o desenvolvimento da estratégia de navegação proposta nesta dissertação. Além disso, são apresentados os modelos estatísticos utilizados para realizar comparações entre os diferentes modelos de propagação analisados.

### 3.1 Propagação de Sinal de Rádio

Nesta sessão são apresentados os principais modelos utilizados para a análise da propagação de sinal de rádio, abordando as equações fundamentais e os efeitos associados a diferentes cenários de propagação. O foco será dado ao modelo de Friis e suas adaptações, além de modelos alternativos que levam em consideração fenômenos como o multipercurso, que são comuns em ambientes urbanos e confinados.

#### 3.1.1 Equação de Friis

O modelo de Friis é um dos modelos mais amplamente utilizados na literatura para calcular a propagação do sinal de rádio em condições de espaço livre. De acordo com [Rappaport \[2009\]](#), o modelo de espaço livre de Friis é empregado para prever a intensidade do sinal recebido quando há uma linha de visão clara e desobstruída entre as antenas de rádio transmissoras e receptoras. Esse modelo é baseado na propagação de ondas eletromagnéticas em um ambiente ideal, sem obstáculos, onde o sinal viaja diretamente de uma antena para outra, sem sofrer interferências de objetos no ambiente.

Este modelo é representado pela equação (3.1) e fornece a perda de sinal para um conjunto de antenas, obtendo a potência do sinal recebido ( $P_r$ ) em watts como função da potência transmitida ( $P_t$ ) em watts, dos ganhos das antenas transmissora ( $G_t$ ) e receptora ( $G_r$ ), da distância de separação ( $d$ ) em metros entre as antenas transmissora e receptora, do

fator de perda não relacionado à propagação ( $L$ ) e do comprimento de onda da portadora ( $\lambda$ ) em metros.

$$P_r(d) = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}. \quad (3.1)$$

Em condições ideais de espaço livre, o modelo de Friis fornece uma estimativa precisa da potência recebida, permitindo calcular a perda de espaço livre em função da distância e da frequência do sinal. No entanto, em ambientes não ideais, como aqueles com obstáculos ou confinamentos, a propagação é influenciada por fenômenos adicionais, como reflexões, difrações e dispersão, o que torna o modelo menos preciso. Por isso, para cenários complexos, como comunicação em túneis, edifícios ou áreas urbanas densas, o modelo de Friis é frequentemente adaptado ou complementado com outros modelos de propagação. Uma das alternativas é utilizar o modelo de Friis em escala logarítmica (dB), o que facilita a análise prática ao expressar os ganhos e perdas em decibéis. Essa adaptação é especialmente útil para antenas direcionais, que concentram o sinal em uma direção específica e, portanto, apresentam ganhos superiores aos de antenas isotrópicas. Outro aspecto importante deste modelo é o fator  $n$ , conhecido como expoente de perda de percurso, que representa a taxa de atenuação do sinal de acordo com as condições específicas do ambiente de propagação. O valor de  $n$  varia dependendo do tipo de ambiente, sendo maior em áreas com mais obstruções e menor em ambientes abertos. De acordo com [Viswanathan \[2020\]](#), a equação de Friis em escala logarítmica para antenas direcionais é dada pela Equação (3.2), que calcula a potência do sinal recebido  $P_r(d)$  em dBm:

$$P_r(d) = P_t + G_t + G_r + 20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) - 10n \log_{10}(d). \quad (3.2)$$

Conforme [Rappaport \[2009\]](#), o valor de  $n$  pode ser determinado empiricamente, por meio de medições da potência de sinal recebida e transmitida entre duas antenas no ambiente analisado, ou com o uso de valores pré-calculados, como os apresentados na Tabela 1. Esses valores são úteis para ajustar o modelo a diferentes condições de propagação, garantindo previsões mais precisas da intensidade do sinal em diversos tipos de cenários.

Outra forma possível da equação de Friis é uma adaptação do modelo em escala logarítmica para antenas isotrópicas, que irradiam sinais uniformemente em todas as direções. Neste caso, a equação de Friis em escala logarítmica é simplificada conforme a Equação (3.3), onde os ganhos das antenas transmissora e receptora são removidos, já que antenas isotrópicas têm um ganho padrão de 0 dBi. A potência recebida  $P_r(d)$  é então expressa em função apenas da potência transmitida, da frequência do sinal (via comprimento de onda  $\lambda$ ) e da distância  $d$ .

Tabela 1 – Expoente de perda de percurso para diferentes ambientes [Rappaport \[2009\]](#)

Ambiente	Expoente de Perda de Percurso (n)
Espaço livre	2
Rádio celular em área urbana	2,7 a 3,5
Rádio celular urbano sombreado	3 a 5
Dentro de um prédio - linha de visão	1,6 a 1,8
Obstruído em prédio	4 a 6
Obstruído em fábrica	2 a 3

$$P_r(d) = P_t + 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) - 10n\log_{10}(d). \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Efeito Multipercurso

De acordo com [Wang \[2010\]](#), a propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes confinados, como túneis de mina, sofre atenuação significativa devido ao fenômeno de multipercurso. Esse fenômeno ocorre pela presença simultânea de ondas diretas, ondas refletidas, refratadas e difratadas, conforme ilustrado na Figura 2. Em ambientes de mina, essas ondas são particularmente impactadas por características específicas, como a seção transversal do túnel, a frequência de operação, o tamanho do túnel, a rugosidade e a condutividade elétrica das paredes, além de elementos estruturais, como curvas, ramificações, inclinações e estreitamentos. Esses fatores provocam variações na trajetória e intensidade das ondas, resultando em múltiplos percursos que podem interferir entre si, causando efeitos como desvanecimento e distorção no sinal. Essas condições exigem a aplicação de modelos específicos de propagação para prever e otimizar a comunicação.

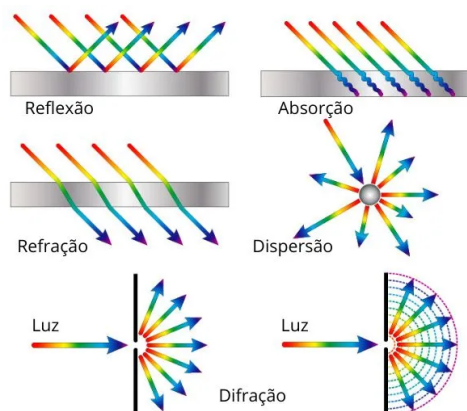


Figura 2 – Ilustração dos fenômenos ondulatórios associados a atenuação das ondas eletromagnéticas. Fonte: [\[MUNDO EDUCAÇÃO\]](#).

Embora o modelo de Friis seja eficiente para prever a perda de propagação de sinal de rádio em condições de visada direta, ele não leva em consideração as perdas

adicionais causadas por fenômenos ondulatórios. Para tratar dessas complexidades, Modelos alternativos foram desenvolvidos, incluindo o modelo Log-Normal, Log-Normal Shadowing e o Modelo de Dois Raios. Cada um desses modelos incorpora diferentes aspectos das interações da onda eletromagnética com o ambiente, permitindo uma estimativa mais precisa da propagação do sinal em situações onde os fenômenos de multipercurso e obstrução são significativos. As seções a seguir detalham esses modelos e discutem suas aplicabilidades e limitações.

### 3.1.3 Modelo Log Normal

Uma alternativa simplificada ao modelo de Friis em escala logarítmica é o modelo Log-Normal, que, segundo Rappaport [2009], é um modelo estatístico utilizado para descrever a perda de percurso de um sinal de rádio em função da distância entre as antenas. Este modelo assume que a perda de sinal segue uma distribuição logarítmica normal, o que permite capturar as variações aleatórias na propagação do sinal, frequentemente causadas por fatores como reflexões, difrações e interferências de múltiplos caminhos. O modelo Log-Normal considera a potência do sinal de rádio em uma distância de referência conhecida e incorpora o expoente de perda de percurso ( $n$ ) para quantificar a atenuação do sinal em função da distância. A relação é expressa na equação (3.4), que fornece uma estimativa da perda de percurso.

$$P(d) = P_0(d_0) - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (3.4)$$

#### 3.1.3.1 Modelo Log Normal Shadowing

O modelo Log-Normal com sombreamento incorpora variabilidade extra no decaimento do sinal, expandindo o modelo Log-Normal ao considerar flutuações ambientais na propagação do sinal. Este modelo assume que a variável aleatória  $X$ , que representa o sombreamento, segue uma distribuição Log-Normal, caracterizada por uma média  $m_X$  e um desvio padrão  $\sigma_X$ , conforme descrito na Equação (3.5).

$$X \sim \mathcal{LN}(m_X, \sigma_X). \quad (3.5)$$

Assim, a potência do sinal em uma distância  $d$  é expressa pela Equação (3.6), onde  $P_0(d_0)$  é a potência de referência a uma distância conhecida  $d_0$ , e o termo  $-10n \log_{10}(d/d_0)$  representa o decaimento do sinal com o aumento da distância, considerando o expoente de perda de percurso  $n$ . O componente  $X$  introduz uma variabilidade que modela as flutuações do ambiente, como a presença de obstáculos ou superfícies reflexivas, resultando em uma atenuação mais realista do sinal

$$P(d) = P_0(d_0) - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X. \quad (3.6)$$

### 3.1.3.2 Modelo de Dois Raios

De acordo com Rappaport [2009], o modelo de propagação de dois raios é uma abordagem que considera tanto o caminho direto percorrido pelo sinal de rádio, descrito pela equação de Friis, quanto uma componente refletida no solo, conhecida como o raio refletido. Essa abordagem é ilustrada na Figura 3. Neste modelo o sinal transmitido atinge o receptor por duas rotas principais: uma linha de visada direta (em amarelo) e uma rota refletida na superfície do solo (em vermelho). Este modelo é especialmente relevante em cenários onde há superfícies planas e refletivas, como estradas, corpos d'água, ou áreas abertas com poucas obstruções, onde a reflexão é uma fonte significativa de interferência ou reforço de sinal.

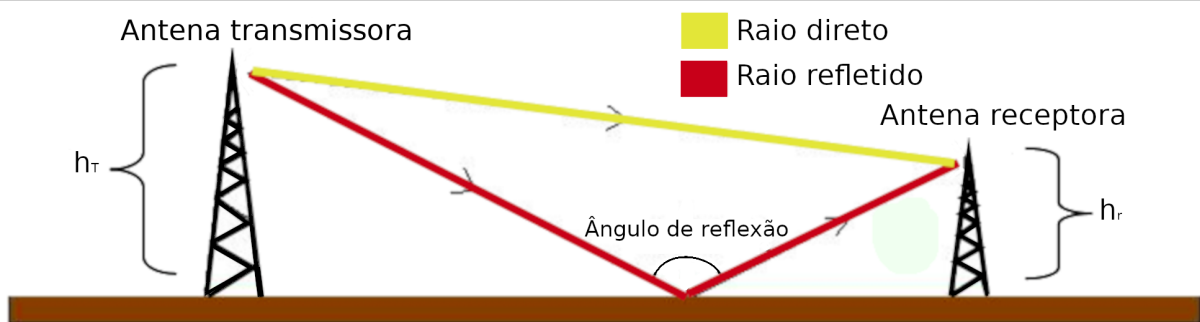


Figura 3 – Ilustração do modelo de dois raios. Adaptado de [da Silva Mello, 2006].

O modelo de dois raios é descrito em (3.7) onde  $P_R$  é a potência recebida, medida em watts (W),  $P_T$  é a potência transmitida, medida em watts (W),  $G_T$  é o ganho da antena transmissora,  $G_R$  é o ganho da antena receptora,  $h_T$  é a altura do transmissor, medida em metros (m),  $h_R$  é a altura do receptor, medida em metros (m) e  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor, medida em metros (m). Nesse modelo, o efeito de reflexão dos raios refletidos no solo se torna mais pronunciado à medida que a distância  $d$  diminui. Em distâncias menores, a interferência entre o raio direto e o raio refletido é mais intensa, levando a padrões de interferência construtiva e destrutiva que afetam a potência recebida. Esse comportamento reflete a sensibilidade do modelo de dois raios às condições geométricas e topológicas do ambiente, especialmente em cenários onde o solo é uma superfície refletiva importante.

$$P_R = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{h_T \cdot h_R}{d^2}\right)^2. \quad (3.7)$$

O modelo de dois raios para a propagação de ondas de rádio pode ser expresso em uma escala logarítmica, considerando tanto o sinal direto quanto o sinal refletido.

As potências recebidas para cada caminho podem ser representadas de acordo com as equações 3.8 e 3.9.

$$\frac{P_r}{P_t}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_R}{P_T} \right). \quad (3.8)$$

$$\frac{P_r}{P_t}(dB) = 40 \log_{10}(d) - 10 \log_{10}(G_t) - 10 \log_{10}(G_r) - 20 \log_{10}(h_t) - 20 \log_{10}(h_r). \quad (3.9)$$

## 3.2 Análise de Variância (ANOVA)

De acordo com [Triola \[2008\]](#), o método ANOVA ou Análise de variância é um teste estatístico cujo objetivo é comparar a igualdade de três ou mais médias populacionais por meio de análise das variâncias amostrais. Conforme (3.10) duas hipóteses são comparadas no teste ANOVA, a Hipótese Nula ( $H_0$ ) de que as médias não possuem diferenças significativas e a Hipótese Alternativa ( $H_1$ ) de que as médias entre os grupos possuem diferenças significativas.

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 \\ H_1 : \mu_1 \neq \mu_2. \end{cases} \quad (3.10)$$

O teste ANOVA é uma ferramenta estatística essencial para avaliar se as diferenças observadas entre grupos são atribuíveis a fatores experimentais ou simplesmente a variações aleatórias. Nesta dissertação, o teste ANOVA é aplicado para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias dos modelos de propagação de rádio LogNormal, LogNormalShadowing e Dois Raios em relação aos dados experimentais obtidos. Para garantir a validade do teste, é necessário atender às premissas de normalidade, independência e homogeneidade dos dados amostrais populacionais. A seguir, são apresentados os três testes estatísticos que são utilizados para verificar o cumprimento dessas condições.

### 3.2.1 Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk

O teste de normalidade Shapiro-Wilk, proposto por [Shapiro and Wilk \[1965\]](#), é amplamente utilizado para avaliar se um conjunto de dados amostrais segue uma distribuição normal. O teste compara o padrão dos dados observados com uma distribuição esperada, verificando o grau de desvio em relação à normalidade. Nesta dissertação, a distribuição esperada utilizada para a comparação é a distribuição t-Student.

O teste gera um *p-valor*, que reflete a probabilidade de que os desvios observados dos dados em relação à normalidade sejam devidos ao acaso. O *p-valor* é definido como:

$$p = P(D \geq d_e | H_0), \quad (3.11)$$

onde  $H_0$  representa a hipótese nula (os dados seguem uma distribuição normal),  $D$  é a estatística do teste, e  $d_e$  é o valor observado dessa estatística.

De acordo com a convenção estatística, se  $p > 0,05$ , aceita-se a hipótese nula, indicando que os dados podem ser considerados aproximadamente normais. Caso contrário ( $p \leq 0,05$ ), rejeita-se a hipótese nula, sugerindo que os dados não seguem uma distribuição normal.

De acordo com [Montgomery and Runger \[2010\]](#) para amostras grandes ( $\geq 30$ ), o Teorema Central do Limite estabelece que a soma ou a média de variáveis independentes, mesmo que não sejam originalmente normais, tende a seguir uma distribuição normal conforme o tamanho da amostra aumenta. Assim, mesmo que o teste de normalidade de Shapiro-Wilk rejeite a hipótese nula em amostras maiores, os dados podem ser considerados aproximadamente normais para fins práticos, especialmente em análises que dependem dessa suposição.

### 3.2.2 Teste de Independência de Durbin-Watson

O teste de independência, introduzido por [Durbin and Watson \[1950\]](#), é utilizado para avaliar a presença de autocorrelação nos resíduos de um modelo estatístico. A estatística do teste, conhecida como Durbin-Watson, é denotada pela letra  $d_w$  e é representada em (3.12).

$$d_w = \frac{\sum_{t=2}^{n_a} (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{n_a} e_t^2}, \quad (3.12)$$

onde  $e_t$  são os resíduos do modelo na observação  $t$  e  $n_a$  é o número total de observações.

Os valores de  $d_w$  fornecem informações sobre a autocorrelação serial nos resíduos sendo que se  $d_w$  estiver próximo de 2, indica que não há autocorrelação serial nos resíduos. Se  $d_w$  estiver significativamente menor que 2, sugere autocorrelação positiva, enquanto que se estiver significativamente maior que 2, sugere autocorrelação negativa.

### 3.2.3 Teste de Homocedasticidade de Fligner-Killeen

O teste de homocedasticidade, introduzido por [Fligner and Killeen \[1976\]](#), é amplamente utilizado para verificar a homogeneidade das variâncias entre dois ou mais grupos de dados. O procedimento do teste envolve a formulação de uma hipótese nula ( $H_0$ ), que postula que as variâncias dos grupos são iguais, e uma hipótese alternativa ( $H_1$ ), que indica desigualdade entre elas. Essas hipóteses são expressas em (3.13) onde  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  representam as variâncias entre os grupos analisados.

$$\begin{cases} H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2. \\ H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2. \end{cases} \quad (3.13)$$

O teste calcula uma estatística baseada nas variâncias observadas nos diferentes grupos e compara com um valor crítico para determinar a significância. Um *p-valor* é gerado, permitindo interpretar os resultados:

- Se  $p > 0,05$ , aceita-se  $H_0$ , indicando homogeneidade das variâncias.
- Se  $p \leq 0,05$ , rejeita-se  $H_0$ , sugerindo heterogeneidade das variâncias.

### 3.2.4 Teste das Comparações de Tukey

O teste ANOVA é capaz de identificar a existência de diferenças significativas entre médias populacionais, mas não quantifica essas diferenças. Para isso, a literatura apresenta o Teste das Comparações Múltiplas de Tukey, introduzido por Tukey [1949]. Esse teste é aplicado para avaliar diferenças significativas entre pares de grupos, com o objetivo de identificar quais grupos diferem entre si. Ele compartilha os mesmos pressupostos do ANOVA: normalidade, homocedasticidade e independência. No entanto, ao contrário do ANOVA, o teste de Tukey realiza comparações todos contra todos, permitindo determinar as diferenças entre todos os pares de grupos analisados.

O teste das comparações de Tukey fornece dois principais indicadores para a análise: a Diferença Mínima Significativa (DMS) e o Intervalo de Confiança (IC). A DMS, apresentada na equação 3.14, representa o valor mínimo necessário para que a diferença entre as médias dos grupos seja considerada estatisticamente significativa, de acordo com o nível de significância definido.

$$DMS = q_\alpha \cdot \sqrt{\frac{MQE}{r}} \quad (3.14)$$

onde  $q_\alpha$  é o valor crítico da distribuição  $q$  de Tukey para o nível de significância  $\alpha$ , MQE é a média quadrática do erro obtida no ANOVA e  $r$  é o número de repetições de cada tratamento.

O intervalo de confiança corresponde a um intervalo que possui uma estimativa da magnitude das diferenças entre as médias dos grupos. De posse desses valores é possível estimar um valor-p que indica o resultado do teste para cada grupo, ou seja, tem seu valor associado a hipótese de que as diferenças entre as médias dos grupos é estatisticamente significativa. É usual considerar um nível de significância de 5% ou seja, valores-p menores que 0,05 indicam que as médias entre os grupos são estatisticamente diferentes.

A comparação entre as médias de dois grupos  $i$  e  $j$  será significativa se a diferença absoluta entre as médias for maior ou igual à DMS, conforme a equação 3.15

$$|\bar{X}_i - \bar{X}_j| \geq \text{DMS}, \quad (3.15)$$

onde  $\bar{X}_i$  e  $\bar{X}_j$  são as médias dos grupos  $i$  e  $j$ , respectivamente e DMS é a Diferença Mínima Significativa.

### 3.2.5 Erro Absoluto Médio (EAM) e Erro Quadrático Médio (EQM)

O erro absoluto médio (EAM) é uma métrica estatística que avalia a discrepância entre os valores medidos e os valores previstos por um modelo, utilizando as diferenças em termos absolutos Hodson [2022]. Essa métrica é calculada conforme a Equação 3.16 e é particularmente útil para reduzir o impacto de *outliers* na análise do erro, pois não amplifica desvios grandes.

$$EAM = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} |y_i - \hat{y}_i|, \quad (3.16)$$

onde  $n_a$  representa o número total de observações,  $y_i$  são os valores observados e  $\hat{y}_i$  correspondem aos valores previstos pelo modelo.

Por outro lado, o erro quadrático médio (EQM) é amplamente utilizado para medir o ajuste de um modelo em relação a um conjunto de dados reais James et al. [2013]. A métrica é calculada pela Equação 3.17 e penaliza de forma mais severa os erros maiores, uma vez que eleva ao quadrado as diferenças entre os valores observados e previstos. Essa característica torna o EQM útil para identificar modelos que precisam de ajustes mais rigorosos em cenários com desvios significativos.

$$EQM = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (3.17)$$

onde  $n_a$  é o número total de observações,  $y_i$  são os valores observados, e  $\hat{y}_i$  são os valores previstos pelo modelo.

Ambas as métricas, EAM e EQM, são amplamente utilizadas na avaliação de modelos para verificar seu desempenho em relação a dados experimentais. No contexto desta dissertação, elas desempenham um papel crucial na comparação de diferentes modelos de propagação de sinal de rádio, avaliando a qualidade de ajuste desses modelos em relação aos dados medidos experimentalmente.

## Capítulo 4

# Análise da Propagação de Sinais de Rádio e Estratégia de Navegação Multi-Robôs

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a realização desta dissertação. O trabalho foi conduzido em duas etapas principais, correspondentes aos objetivos específicos definidos previamente: (i) a análise do comportamento do sinal de rádio em ambientes internos, com foco na segmentação de regiões com características similares de propagação; e (ii) o desenvolvimento de uma estratégia de navegação multi-robôs baseada na cobertura de sinal de rádio.

A primeira etapa compreende a coleta de dados empíricos em um ambiente físico com presença de barreiras estruturais, utilizando sensores e módulos de comunicação sem fio. A partir desses dados, foram empregadas técnicas de estatística descritiva e análise de agrupamento para identificar padrões no comportamento do sinal e, assim, permitir a divisão do ambiente em regiões de interesse.

A segunda etapa envolve a formulação de uma estratégia de navegação cooperativa para múltiplos robôs móveis, considerando a segmentação obtida na etapa anterior. A proposta visa orientar os robôs de forma a maximizar a cobertura de sinal de rádio em ambientes confinados, aproveitando o conhecimento prévio da propagação do sinal no ambiente.

## 4.1 Análise Estatística do Ajuste de Modelos de Propagação de Sinal com Base na Divisão do Ambiente em Regiões de Interesse

A metodologia de análise estatística, conforme publicado em Campos et al. [2024] consiste em uma comparação de dados obtidos em experimentos com múltiplos robôs com os modelos de propagação de rádio disponíveis na literatura. Como ilustrado na Figura 4, essa abordagem envolve a comparação do ajuste de três modelos de propagação – Dois Raios (TwoRay), LogNormal e LogNormal Shadowing – em relação à dados experimentais, divididos em regiões de interesse.

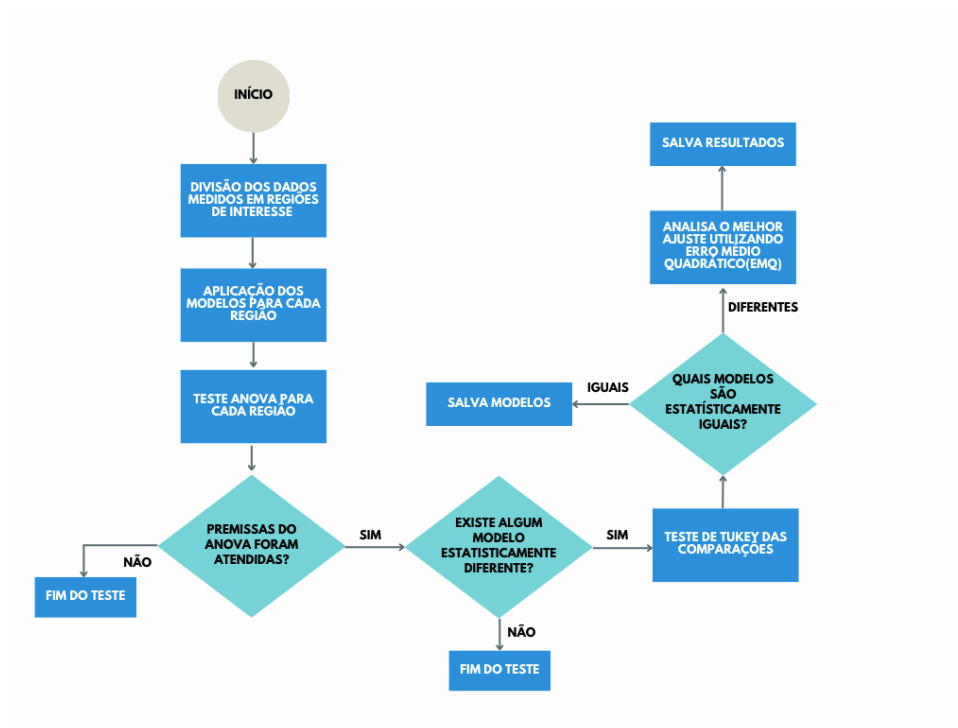


Figura 4 – Esquema da metodologia empregada na análise estatística para comparação dos modelos de propagação de sinal.

Para essa análise, os valores de propagação de sinal, originalmente expressos em decibéis-miliwatt (dBm), são convertidos para miliwatt (mW), a fim de garantir uma escala linear apropriada para as operações estatísticas. A metodologia inicia com a divisão dos dados em regiões de interesse, conforme ilustrado pela Figura 5. A definição do tamanho de cada região de interesse deve considerar a delimitação de um espaço fechado no qual se presume que as condições de propagação do sinal de rádio permaneçam relativamente homogêneas.

Após a divisão em regiões de interesse e o isolamento dos padrões locais de propagação, cada região é comparada aos modelos de propagação de sinal de rádio quanto ao grau de ajuste, por meio de análises estatísticas. Inicialmente é feita a aplicação do

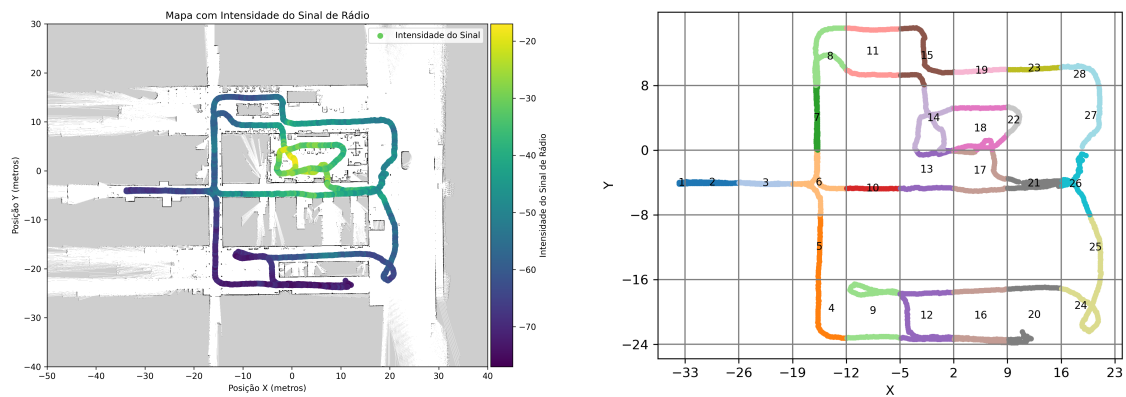


Figura 5 – Metodologia de divisão das regiões de interesse.

teste ANOVA, utilizado para verificar se existiam diferenças estatisticamente significativas entre os modelos avaliados. Caso diferenças sejam identificadas, o teste de comparações múltiplas de Tukey é aplicado para determinar quais modelos apresentam discrepâncias significativas em relação aos dados experimentais, comparando-os entre si. Na presença dessas discrepâncias, os resíduos são analisados com o auxílio de duas métricas adicionais: o erro quadrático médio (EQM) e o erro absoluto médio (EAM), permitindo identificar o modelo que melhor se ajustava aos dados medidos em cada região analisada.

## 4.2 Estratégia de navegação multi-robôs com base na cobertura de sinal de rádio

Conforme resultados adaptados de Campos et al. [2023b] a estratégia de navegação proposta nesta dissertação é ilustrada na Figura 6 e descrita no Algoritmo 1. Esta estratégia utiliza robôs móveis como roteadores de sinal em uma rede de comunicação por rádio, assegurando que cada robô mantenha uma linha de visão direta com pelo menos um outro robô da rede. Isso facilita a comunicação eficaz entre os robôs e uma base de controle. A antena da base de controle é posicionada na entrada do ambiente a ser inspecionado, enquanto o operador controla remotamente o primeiro robô, que atua como o cliente inicial da rede.

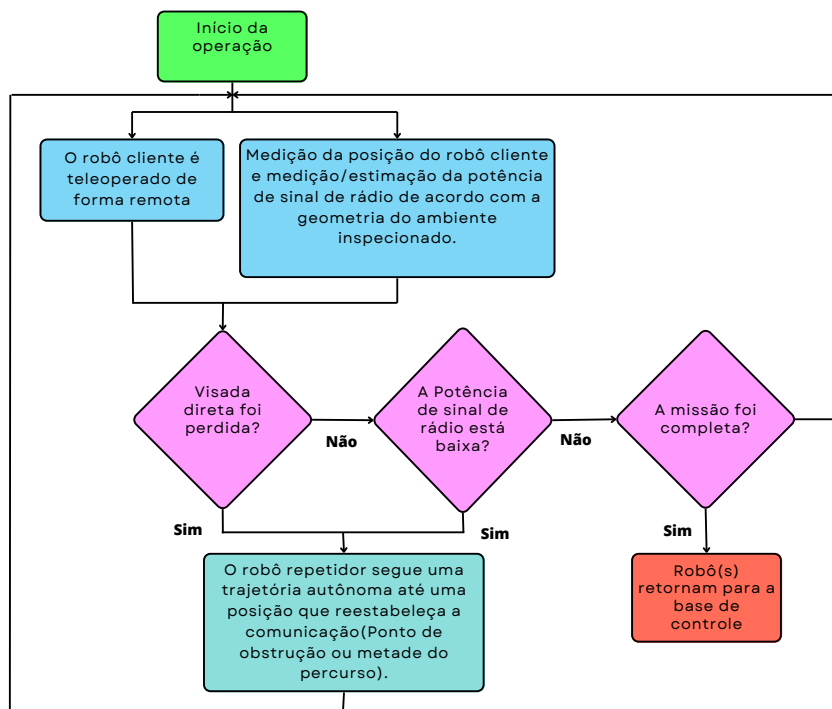


Figura 6 – Esquema da metodologia empregada na estratégia de navegação proposta.

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo para controle de robô com repetidor de sinal

---

**Data:** Posição inicial do robô, potência de sinal de rádio em relação à base

**Result:** Retorno dos robôs à base após completar a operação

```

1 while operação não completa do
2   Meça a posição e a potência do sinal de rádio;
3   if distância entre robô e base ≤ 10 metros then
4     | Estime potência do sinal usando o modelo de dois raios;
5   else
6     | Estime potência do sinal usando o modelo lognormal;
7   end
8   Use dados do sensor LiDAR para verificar linha de visada;
9   if linha de visada direta then
10    | if potência do sinal está baixa then
11    | | Posicione um robô repetidor a metade do caminho entre o robô e a base;
12    | end
13  else
14    | Posicione um robô repetidor no ponto de obstrução para roteamento de
15    | sinal;
16  end
17 Retorne todos os robôs para a base;
  
```

---

Durante a teleoperação, é realizada uma verificação contínua para monitorar a linha de visão direta e a força do sinal de rádio entre o robô cliente e a base de controle utilizando os dados captados pelo sensor Velodyne e aplicando a estratégia demonstrada no Algoritmo 2. Neste algoritmo, a verificação de visibilidade é realizada com base na posição da antena da base, na posição do robô cliente e em uma lista de obstáculos representada por uma nuvem de pontos. Uma reta é traçada entre a antena da base e o robô cliente, e verifica-se se algum ponto da nuvem de pontos intercepta essa reta dentro de uma margem de tolerância. Caso um ou mais pontos sejam identificados ao longo da reta, considera-se que há obstrução da linha de visada.

A estratégia considera diferentes modelos de propagação de sinal de rádio dependendo de característica do ambiente explorado, como proximidade com a antena ou modelo de perda de caminho (LogNormal). Caso um obstáculo seja identificado entre o robô e a base, obstruindo a linha de visão direta, ou se a intensidade do sinal medida cair abaixo de um limite predefinido, o sistema aciona um robô repetidor. Esse robô repetidor segue o caminho percorrido pelo robô cliente até posicionar-se em um ponto onde a linha de visão direta seja restabelecida ou onde a força do sinal esteja adequada, garantindo assim a continuidade da comunicação e da teleoperação.

Quando a operação de inspeção é concluída, todos os robôs devem retornar à base de controle. O robô cliente é teleoperado de volta, enquanto os robôs repetidores seguem trajetórias sincronizadas e retornam autonomamente à base, garantindo a segurança e a eficiência na fase de encerramento da operação.

Este capítulo apresentou a base metodológica que sustenta a dissertação, abordando desde a análise estatística do comportamento da propagação do sinal de rádio até o desenvolvimento de uma estratégia de navegação multi-robôs voltada à manutenção da conectividade em ambientes confinados. As abordagens discutidas aqui fundamentam os experimentos conduzidos e os resultados analisados nos capítulos seguintes, os quais visam validar empiricamente a eficácia das técnicas propostas e sua aplicabilidade em cenários reais.

**Algoritmo 2:** Função para verificação de linha de visada livre**Data:** Posição da antena, posição do robô, lista de obstáculos**Result:** True se linha de visada estiver livre, False caso contrário

```

1 Função is_lo_clear(antenna_pos, robot_pos, point_list, tolerance):
  Input: antenna_pos: Coordenadas da antena ( $x_a, y_a, z_a$ )
  Input: robot_pos: Coordenadas do robô ( $x_b, y_b, z_b$ )
  Input: point_list: Lista de obstáculos  $\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots\}$ 
  Input: tolerance: Tolerância máxima para considerar um obstáculo como
    obstrução
  Output: True se linha de visada estiver livre, False caso contrário
2 line_vec  $\leftarrow (x_b - x_a, y_b - y_a, z_b - z_a)$ ;
3 line_length  $\leftarrow \|\textit{line\_vec}\|$ ;
4 if line_length = 0 then
5   | return True
6 end
7 line_unit_vec  $\leftarrow \textit{line\_vec} / \textit{line\_length}$ ;
8 foreach point in point_list do
9   | point_vec  $\leftarrow (x_p - x_a, y_p - y_a, z_p - z_a)$ ;
10  | proj_length  $\leftarrow \text{dot}(\textit{point\_vec}, \textit{line\_unit\_vec})$ ;
11  | if  $0 \leq \textit{proj\_length} \leq \textit{line\_length}$  then
12  |   | proj_point  $\leftarrow (x_a, y_a, z_a) + \textit{proj\_length} * \textit{line\_unit\_vec}$ ;
13  |   | distance_to_line  $\leftarrow \|\textit{point\_vec} - (\textit{proj\_point} - (x_a, y_a, z_a))\|$ ;
14  |   | if distance_to_line  $\leq \textit{tolerance}$  then
15  |   |   | return False (Obstrução detectada)
16  |   | end
17  | end
18 end
19 return True (Sem obstrução detectada)

```

# Capítulo 5

## Configuração Experimental

Neste Capítulo são apresentados os tópicos relativos aos experimentos realizados, sendo tratadas as implementações utilizadas, os dispositivos robóticos e os sensores empregados nos experimentos reais e nas simulações, além dos ambientes escolhidos para a geração de resultados.

### 5.1 Dispositivos Robóticos Utilizados

Esta seção descreve os dispositivos robóticos utilizados nos experimentos desta dissertação, abordando tanto suas versões físicas quanto simuladas. O foco principal está nos robôs EspeleoRobô e Pioneer 3-DX, que desempenham papéis fundamentais na coleta de dados e no estabelecimento de redes de comunicação em ambientes confinados. Serão apresentadas, ainda, as tecnologias empregadas para a configuração da rede de rádios, incluindo os dispositivos utilizados e a topologia de rede adotada, essencial para garantir uma comunicação eficiente entre os robôs durante os experimentos. Por fim, será detalhado o ambiente de simulação CoppeliaSim, utilizado para modelar e testar os robôs de forma virtual.

#### 5.1.1 EspeleoRobô

De acordo com [Azpurua et al. \[2019\]](#) o EspeleoRobô é um dispositivo robótico desenvolvido pelo Instituto Tecnológico Vale projetado para a inspeção de espaços confinados em operações de mineração. Originalmente desenvolvido para inspeção de cavernas em missões teleoperadas, o robô agora é também utilizado no monitoramento de galerias de barragens, tubulações e outros espaços industriais confinados. Equipado com múltiplos sensores, como câmeras, LiDAR e IMU, o EspeleoRobô permite realizar mapeamentos de ambiente como uma nuvem de pontos 3D colorida.

Neste trabalho, o EspeleoRobô atua como o robô cliente da rede e é responsável pela coleta de dados operacionais. Ele registra a posição do robô utilizando o algoritmo

EKF-LOAM desenvolvido por Júnior et al. [2022], além de coletar informações sobre a potência do sinal de rádio e a nuvem de pontos gerada pelo sensor LiDAR. Para a comunicação com a base de controle, conforme ilustrado na Figura 7, o EspeleoRobô é equipado com o rádio Ubiquiti M900, que opera na frequência de 900 MHz e está conectado a duas antenas omnidirecionais de 6 dBi de ganho. A escolha de utilizar duas antenas visa garantir redundância e diversidade no link de comunicação, aumentando a robustez e melhorando a qualidade do sinal entre os pontos da rede de rádios.



Figura 7 – Dispositivo Robótico EspeleoRobô. Fonte: Cid et al. [2024]

### 5.1.2 Pioneer 3-DX

O dispositivo Robótico Pioneer 3-DX, conforme ilustrado na Figura 8, é uma plataforma robótica móvel amplamente utilizada em pesquisas acadêmicas e em aplicações de desenvolvimento robótico. De acordo com Robots [2011] ele é equipado com sensores ultrassônicos para detecção de obstáculos, um sistema de locomoção diferencial para manobras, e encoders nas rodas para monitoramento de movimento. Alimentado por uma bateria recarregável, o robô é compatível com o ROS, permitindo integração com algoritmos de navegação e controle.

Durante os experimentos, o Pioneer 3-DX foi equipado com um rádio Ubiquiti M900 e duas antenas omnidirecionais de 6 dBi de ganho, desempenhando a função de robô repetidor de sinal. Esse papel foi essencial para restabelecer o link de comunicação sempre que o robô cliente enfrentava uma perda de sinal com a base de controle.



Figura 8 – Dispositivo Robótico Pioneer 3-DX. Fonte: [Cid et al. \[2024\]](#)

## 5.2 Rádios e Antenas

Para a transmissão de dados na estação base, conforme ilustrado pela Figura 9, foi utilizado um rádio Ubiquiti M900, ideal para longas distâncias [Ubiquiti Networks, 2016]. Este rádio foi configurado com duas antenas direcionais Aquário de 14 dBi de ganho, que oferecem uma boa performance em termos de alcance e concentração de sinal. Uma vez que o rádio Ubiquiti M900 é compatível com a tecnologia MIMO (Multiple Input, Multiple Output), foi possível utilizar as duas antenas para maximizar a eficiência da comunicação e aumentar a taxa de transmissão de dados.

Para otimizar a recepção e a transmissão do sinal em um ambiente com múltiplos reflexos e possíveis obstáculos, as antenas foram posicionadas a  $90^\circ$  uma da outra. Esse posicionamento visa criar uma diversidade de sinal, aproveitando os diferentes caminhos de propagação para a transmissão de dados. A diversidade de sinal melhora a robustez da conexão, especialmente em locais com alta interferência ou múltiplos reflexos, como é o caso de ambientes confinados ou com obstáculos.

Durante os experimentos, as antenas da base de controle e dos dispositivos robóticos foram posicionadas de modo que a distância inicial entre elas fosse de 1 metro. Essa medida foi adotada com o objetivo de minimizar os efeitos de propagação associados ao campo eletromagnético próximo.

A topologia de rede utilizada neste experimento conforme ilustrado pela Figura

10, foi baseada em um modelo WDS (Wireless Distribution System), onde a configuração do rádio foi adaptada para suportar uma rede dinâmica de dispositivos móveis. A base, equipada com a antena direcional, foi configurada no modo Station, atuando como o ponto central de comunicação. Esse modo permite que a base receba sinais de forma direcionada e seja capaz de se conectar eficientemente aos robôs equipados com antenas omnidirecionais, as quais foram configuradas no modo repetidor de sinal. As antenas omnidirecionais nos robôs garantem uma cobertura  $360^\circ$  ao redor de cada dispositivo, permitindo a retransmissão do sinal sem fio para outras unidades da rede.



Figura 9 – Antenas e rádios utilizados nos experimentos. Fonte: Adaptado de [Cid et al. \[2024\]](#).

### 5.3 Robôs Virtuais e Ambiente de Simulação Coppeliasim

Para simular a comunicação entre os dispositivos robóticos e testar a estratégia desenvolvida nesta dissertação, foram utilizados modelos tridimensionais dos robôs móveis no ambiente de simulação virtual Coppeliasim Edu.

O modelo tridimensional do robô Pioneer 3-DX, ilustrado na Figura 12, está disponível nativamente no simulador. Esse modelo possui duas rodas (robô direcional) e dezesseis sensores ultrassônicos (sonares). Adicionalmente, foi incorporado ao robô um sensor Hokuyo 2D LIDAR, também disponível no simulador, utilizado para detecção de obstáculos durante a execução autônoma da trajetória na estratégia de roteamento de sinal proposta nesta dissertação.

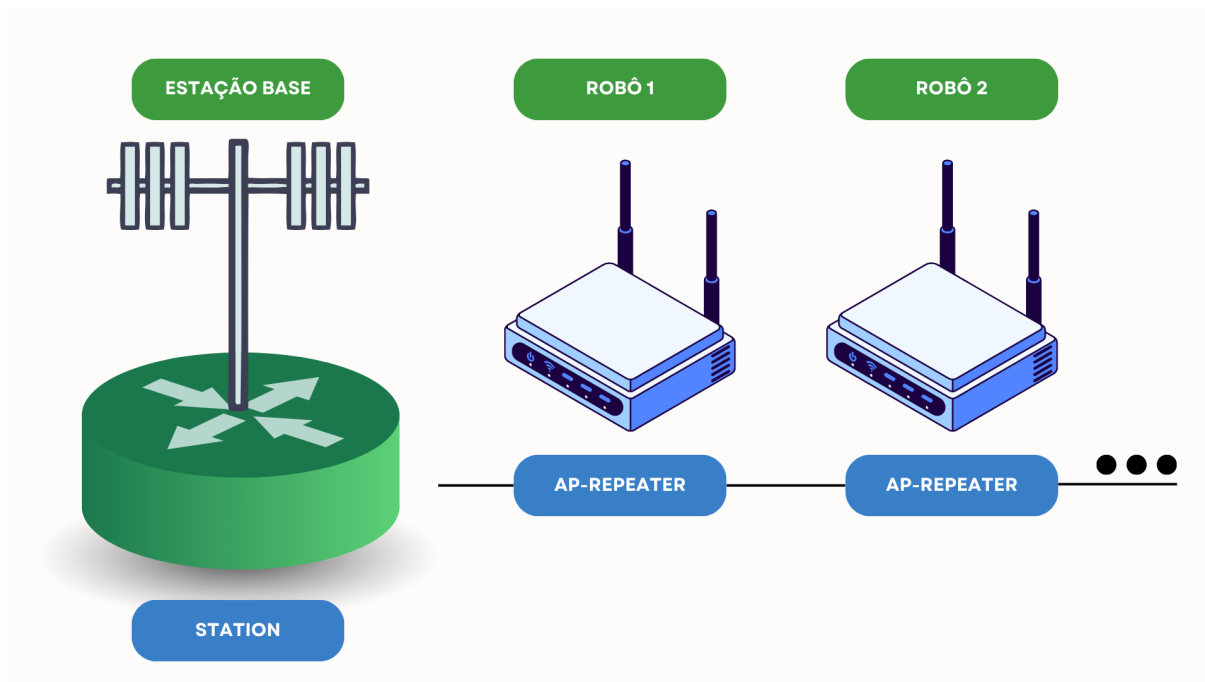


Figura 10 – Topologia de Rede configurada durante os experimentos.

Já o modelo tridimensional do EspeleoRobô foi obtido a partir do pacote `espeleo_vrep_simulation`, disponível em [ITVRoC \[2020\]](#). Esse modelo representa o robô com seis rodas, câmeras frontal e traseira, sensores do tipo IMU e giroscópio, além de um sensor LIDAR Velodyne.



Figura 11 – Dispositivo Robótico Espeleo-Robô simulado.

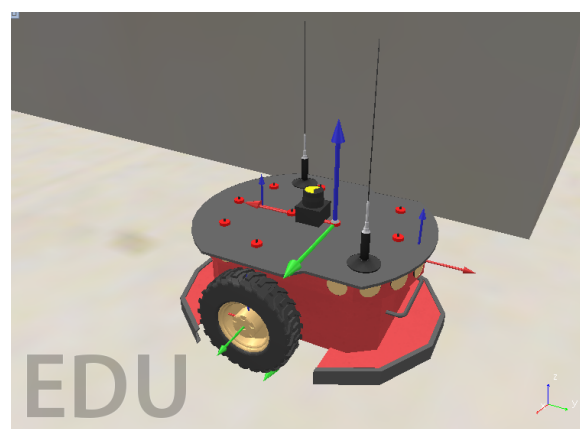


Figura 12 – Dispositivo Robótico Pioneer 3-DX simulado.

A simulação foi desenvolvida a partir da modelagem de um ambiente representativo de um corredor da Escola de Engenharia da UFMG, com o objetivo de reproduzir condições realistas para a navegação autônoma dos robôs móveis. Esse ambiente simulado permitiu avaliar o desempenho da estratégia de roteamento de sinal em cenários semelhantes aos que podem ser encontrados em aplicações reais de inspeção ou monitoramento.

O ambiente virtual foi implementado no simulador CoppeliaSim, conforme ilus-

trado na Figura 13 que oferece uma série de recursos para simulações robóticas, como modelagem tridimensional, controle dinâmico, detecção de colisões, sensores virtuais (LIDAR, câmeras, ultrassônicos, etc.) e integração com linguagens de programação externas por meio de APIs. Tais recursos possibilitaram a criação de um cenário interativo de simulação do comportamento dos robôs e de seus sensores durante a execução da estratégia proposta.

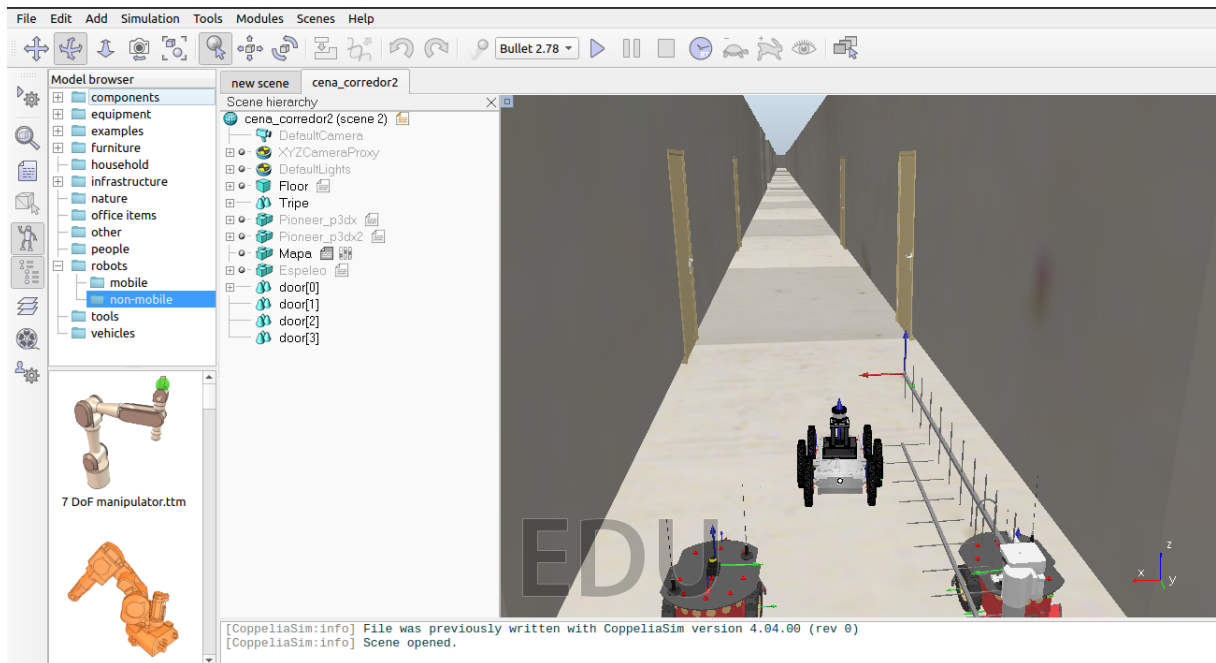


Figura 13 – Simulação desenvolvida no ambiente de simulação virtual CoppeliaSim

# Capítulo 6

## Experimentos e Resultados

Este capítulo apresenta os experimentos realizados em ambiente real e simulado, com o objetivo de validar a estratégia de roteamento de sinal proposta nesta dissertação. Para isso, foram conduzidos testes com robôs móveis em corredores da Escola de Engenharia da UFMG. O mesmo ambiente foi modelado virtualmente no simulador CoppeliaSim Edu, que permite a representação tridimensional e a simulação realista de sensores e atuadores.

Inicialmente, é descrito o ambiente real utilizado nos experimentos. Em seguida, são apresentados os testes realizados com um robô móvel, os quais permitiram a coleta de dados para a modelagem da intensidade do sinal Wi-Fi no ambiente simulado. Na sequência, foram conduzidos experimentos com dois robôs, com o objetivo de analisar o comportamento do sinal em cenários com maior mobilidade e interação entre os dispositivos.

Com base nos dados obtidos, os resultados do segundo teste foram submetidos a uma análise estatística, em que o ambiente foi dividido em regiões de acordo com a intensidade do sinal modelado, possibilitando a construção de um mapa de zonas com diferentes níveis de cobertura. Uma segunda base de dados também foi analisada, com o intuito de complementar e validar os resultados.

Por fim, é apresentada a simulação do sistema de navegação multi-robôs, no qual os agentes atuam de forma coordenada para explorar o ambiente, mantendo a conectividade com a rede sem fio.

Um vídeo ilustrando os experimentos e a simulação está disponível [online](#)<sup>1</sup>.

### 6.1 Descrição do ambiente utilizado nos experimentos

O ambiente real escolhido para realização dos experimentos foi um ambiente de corredor do edifício da Escola de Engenharia da UFMG. Devido às restrições de acesso a

---

<sup>1</sup> <https://github.com/SofiaPeCa/Radio-Lars.git>

ambientes confinados, como galerias de barragens e cavernas, o ambiente selecionado foi aquele que, embora não fosse exatamente um espaço subterrâneo, possuía características similares. Desta forma o ambiente foi escolhido por apresentar as condições típicas de um espaço fechado, com amplos corredores, características que se aproximam dos cenários de interesse desta pesquisa. Na Figura 14, é possível visualizar o espaço escolhido, bem como a disposição dos dispositivos robóticos e das antenas de transmissão durante os experimentos.



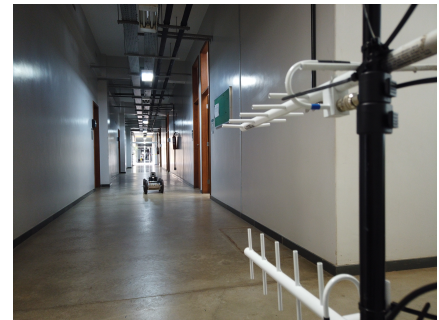
(a) Robô cliente na posição inicial esperando comando



(b) Robô repetidor na posição inicial esperando comando



(c) EspeleoRobô sendo teleoperado



(d) Exploração do ambiente de corredor

Figura 14 – Experimentos realizados em um ambiente de corredor no prédio de Engenharia da UFMG.

## 6.2 Experimentos com 1 robô para modelagem de sinal

Para demonstrar a efetividade do método de utilização de robôs repetidores de sinal e coletar os dados necessários para a simulação, foram realizados dois experimentos. No primeiro experimento, ilustrado na Figura 15, foi realizada a coleta de informações sobre a potência do sinal de rádio durante a navegação de um robô em um ambiente de corredor reto seguido de uma curva, conforme a trajetória destacada em amarelo. Para isso, foram utilizadas três antenas: uma antena direcional posicionada na base de controle e duas antenas omnidirecionais fixadas no dispositivo robótico. Neste experimento, o critério

de parada da inspeção esteve relacionado à obtenção de uma imagem nítida da câmera do robô cliente. Como o robô era teleoperado, essa informação visual era essencial para garantir a continuidade da inspeção de forma segura.

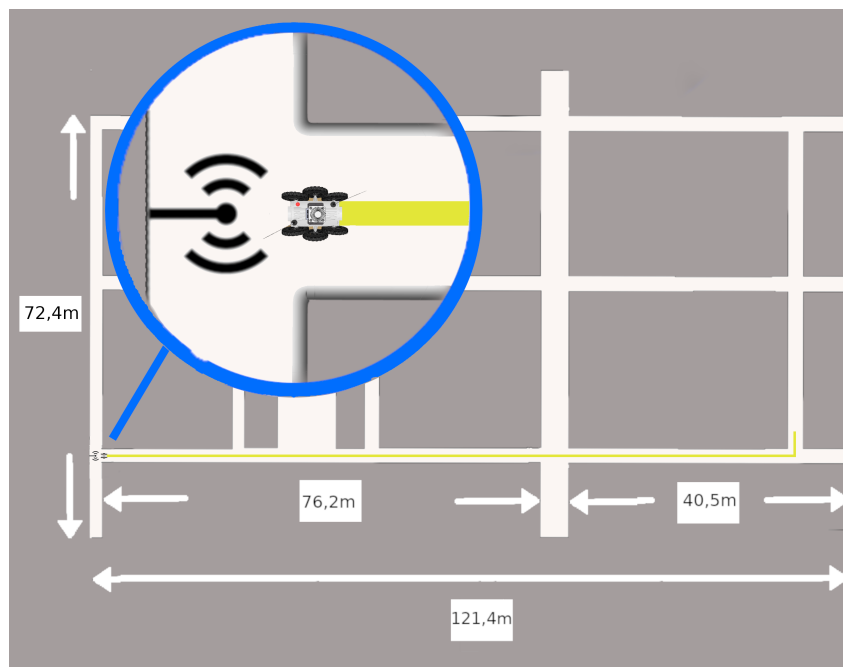


Figura 15 – Mapa do ambiente explorado com o trajeto (em amarelo) percorrido pelo robô cliente durante o 1º experimento. Fonte: Campos et al. [2023b].

Os resultados do experimento estão apresentados na Figura 16. Como esperado, foi identificado que a potência do sinal decai acentuadamente quando o robô realiza a curva. Esse comportamento pode ser explicado pelos efeitos de reflexões e refrações causados pelas paredes do ambiente, que alteram a propagação do sinal de rádio. Esses fenômenos confirmam a complexidade de manter a comunicação em ambientes fechados com obstáculos.

Adicionalmente, a dependência da potência do sinal em relação à distância percorrida foi analisada com base nos modelos teóricos de propagação de Friis para antenas direcionais (Base) e isotrópicas (Cliente). Essa relação e seus respectivos erros de medição podem ser observados na Figura 17. A Figura 17a apresenta a interpolação dos dados medidos no experimento tanto para o robô cliente quanto para a base, juntamente com os modelos teóricos de Friis. Já a Figura 17b mostra a estimativa do expoente de perda de percurso calculada por meio do menor erro médio quadrático associado, validando os resultados experimentais frente aos modelos teóricos.

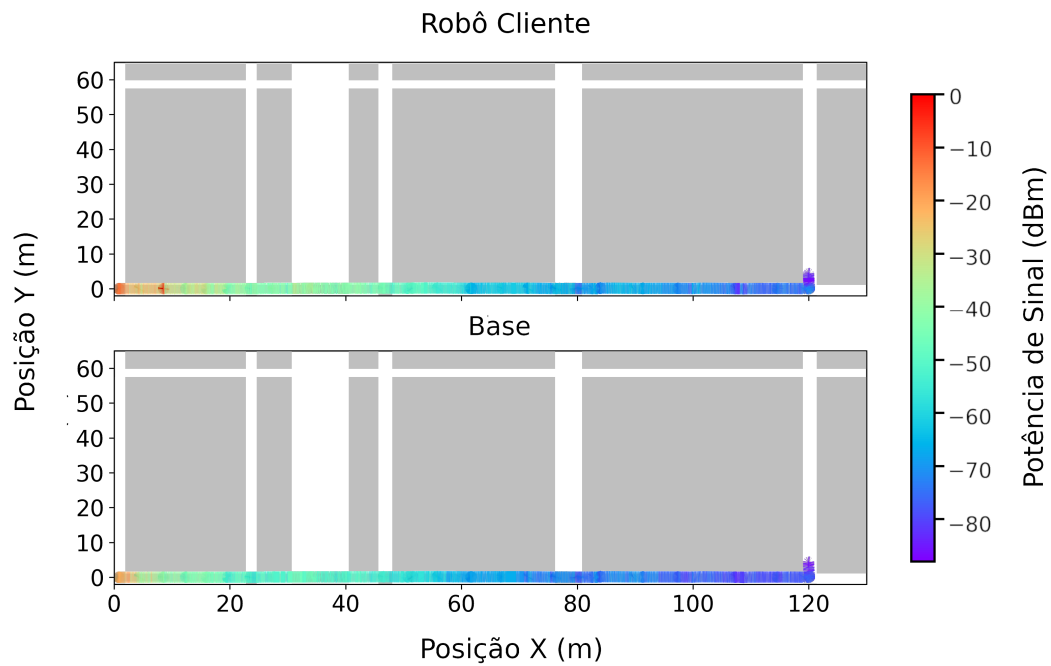
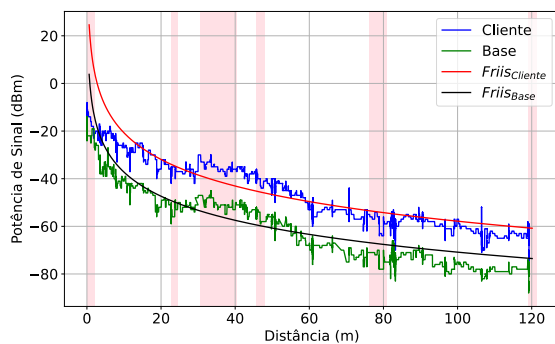
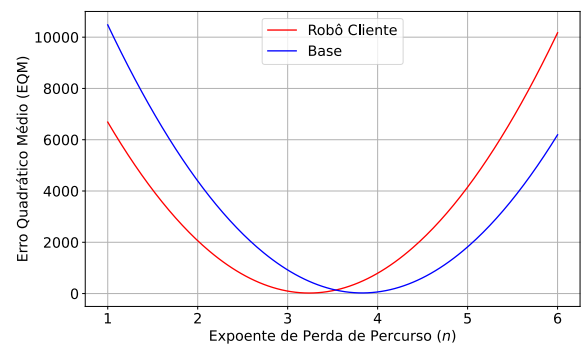


Figura 16 – Posição (X/Y) do robô cliente em metros durante o 1º experimento em relação à potência do sinal recebido pela antena do robô cliente ( $P_{re}$ ) em dBm e a potência recebida pela antena da base ( $P_{rb}$ ) em dBm. Fonte: Campos et al. [2023b].



(a) Potência de sinal recebido para o robô cliente ( $P_{re}$ ) e para a base ( $P_{rb}$ ) em função da distância percorrida pelo robô cliente.



(b) Erro médio quadrático para a estimativa de  $n$  para a potência recebida do robô cliente ( $P_{re}$ ) e da base de controle ( $P_{rb}$ ).

Figura 17 – Comparação entre os valores medidos e os erros estimados para a potência do sinal. Fonte: Campos et al. [2023b].

### 6.3 Experimentos com 2 robôs para modelagem de sinal

O segundo experimento consistiu na utilização de dois robôs: um atuando como cliente da rede e o outro como repetidor de sinal, conforme ilustrado na Figura 18. O robô cliente seguiu a trajetória demarcada em amarelo, iniciando em linha reta e fazendo uma curva até o ponto onde a potência de sinal diminuiu consideravelmente, conforme observado no primeiro experimento. Nesse momento, o robô repetidor foi teleoperado até o ponto de obstrução, conforme ilustrado pela Figura 19a, de modo a garantir a visada direta entre a antena da base e o robô repetidor, bem como entre o robô repetidor e o robô cliente, como mostrado pela trajetória laranja.

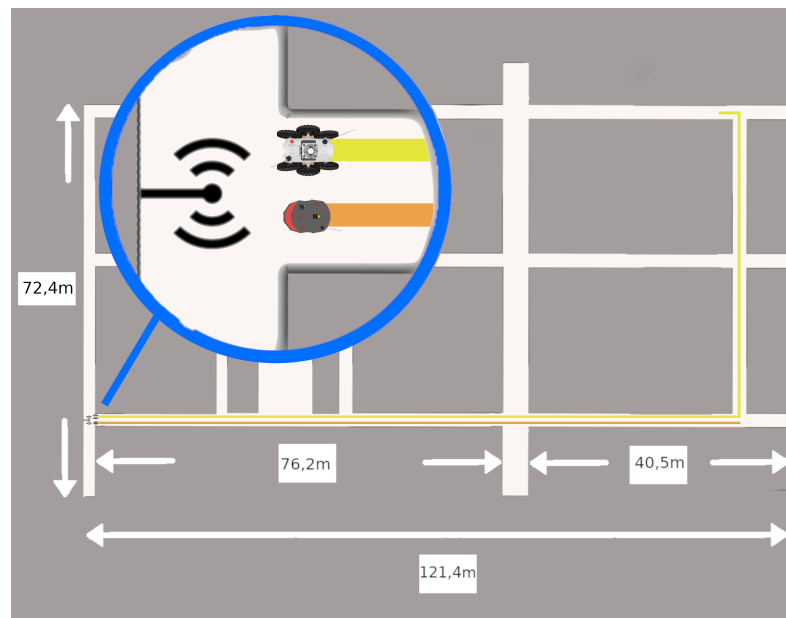
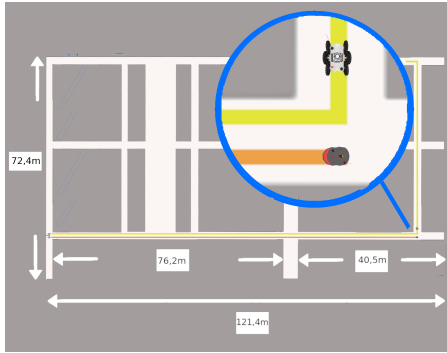
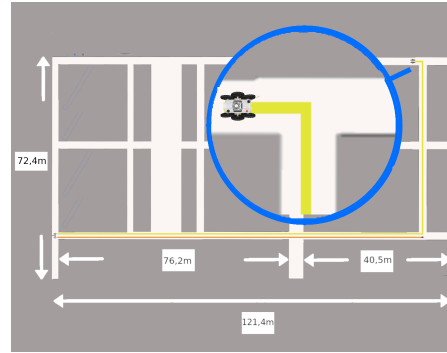


Figura 18 – Posição (X/Y) do robô cliente em metros durante o 2º experimento em relação à potência do sinal recebido para a antena do robô cliente ( $P_{re}$ ) em dBm e a antena da base ( $P_{rb}$ ) em dBm. Fonte: Campos et al. [2023b].

Após posicionar adequadamente o robô repetidor, a potência de sinal do robô cliente foi restabelecida, permitindo que a exploração continuasse até o final do corredor. No entanto, ao realizar uma nova curva, conforme ilustrado na Figura 19b, o robô cliente novamente apresentou queda significativa na potência de sinal para comunicação com a base de controle. Os dados coletados sobre a potência de sinal em função da distância percorrida estão ilustrados na Figura 20, onde é possível observar a variação da potência recebida pelo robô cliente durante o experimento, com ênfase na atenuação ocorrida nas quinas dos corredores.



(a) Robô repetidor sendo posicionado na quina para roteamento de sinal ( $P_{re}$ ).



(b) Robô cliente realizando uma curva novamente e perdendo sinal com a estação base

Figura 19 – Metodologia de posicionamento dos robôs para o segundo experimento.

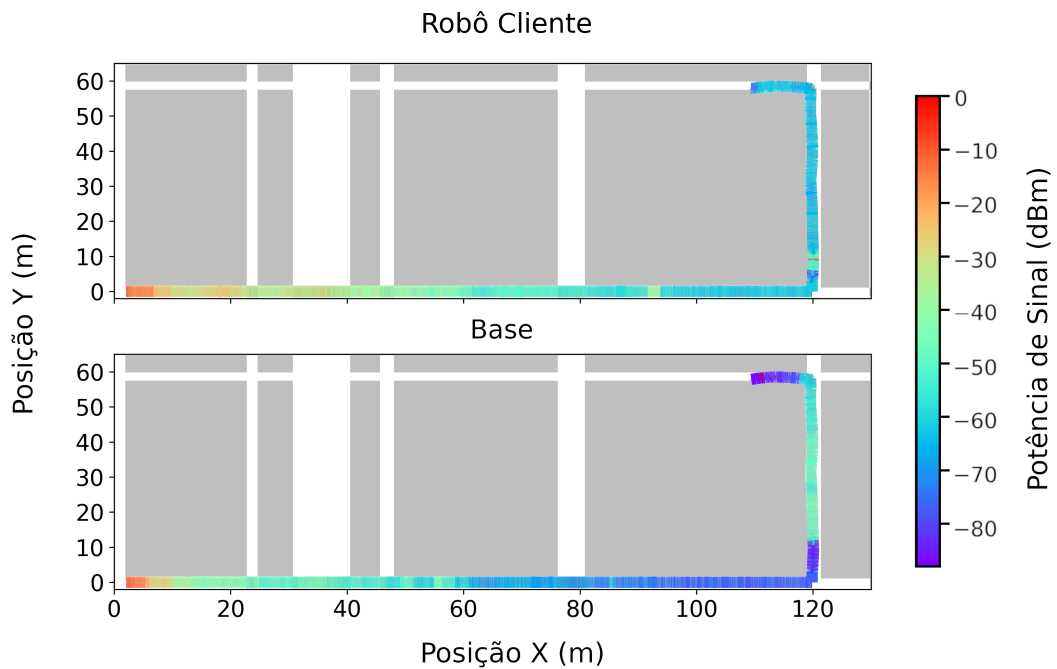


Figura 20 – Posição (X/Y) do robô cliente em metros durante o 2º experimento em relação à potência do sinal recebido pela antena do robô cliente ( $P_{re}$ ) em dBm e a potência recebida pela antena da base ( $P_{rb}$ ) em dBm. Fonte: Campos et al. [2023b].

## 6.4 Divisão de regiões com base na intensidade do sinal

Conforme resultados publicados em Campos et al. [2024] os testes realizados no segundo experimento foram analisados, conforme a metodologia apresentada na Figura 4 seguindo a abordagem de análise estatística. Para garantir a validade da análise ANOVA, foram verificadas as premissas de normalidade dos resíduos, homocedasticidade (igualdade das variâncias) e independência dos resíduos, cujos gráficos estão apresentados nas Figuras 21, 22 e 23, respectivamente. Observou-se que as premissas da ANOVA não

foram plenamente atendidas, possivelmente devido à influência do campo próximo no início do experimento. Essa condição pode ter introduzido uma variabilidade atípica nos dados iniciais, comprometendo a estabilidade dos resíduos e afetando as suposições de independência e homocedasticidade. Isso se reflete na concentração da maior parte dos resíduos em torno de zero, com valores extremos concentrados nas primeiras observações — um padrão compatível com os efeitos do campo próximo. Ainda assim, o grande número de observações permite assumir a validade da suposição de normalidade dos resíduos, conforme justificado pelo Teorema Central do Limite.

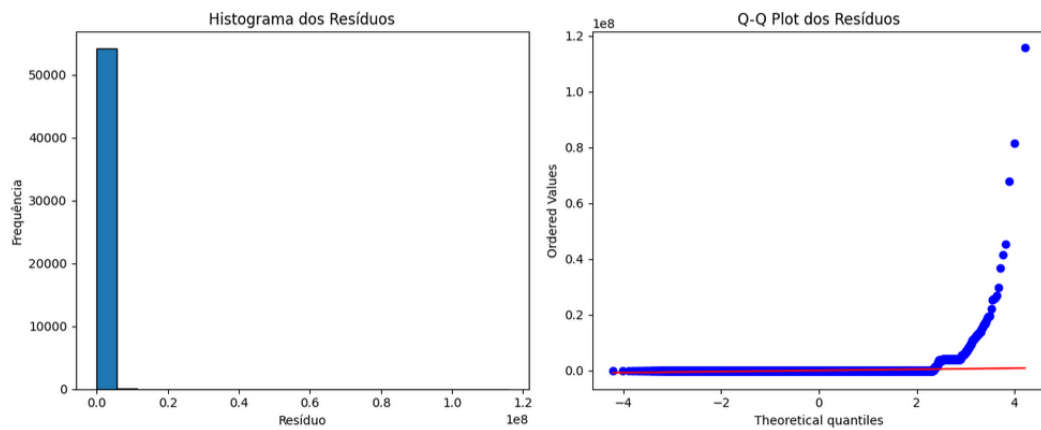


Figura 21 – Teste de normalidade dos resíduos do modelo ANOVA para o segundo experimento.

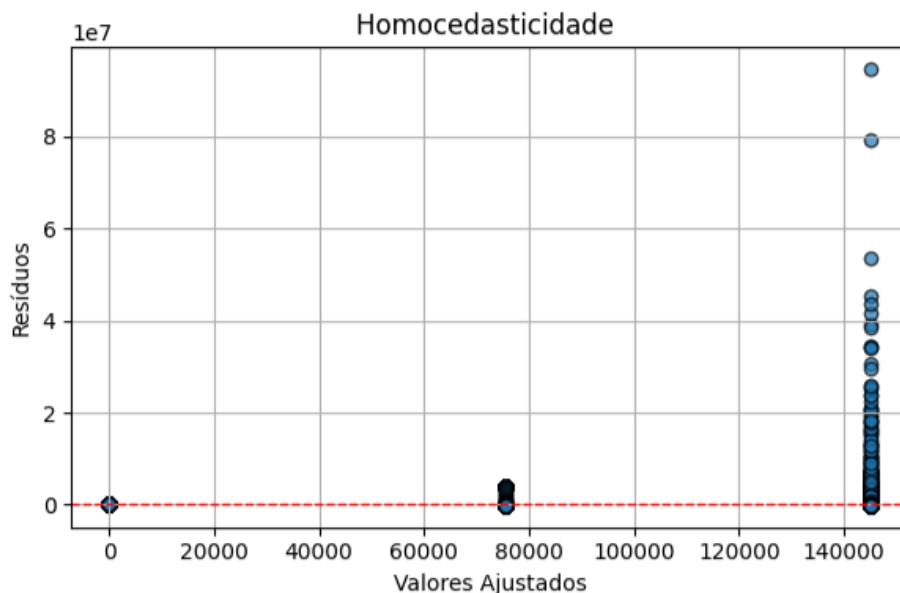


Figura 22 – Verificação da homocedasticidade (igualdade das variâncias) dos resíduos do modelo ANOVA no segundo experimento.

Após a verificação do ANOVA, os dados foram segmentados em regiões com dimensões fixas de  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  e  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ , conforme ilustrado nas Figuras 24, 25 e 26. Essa divisão foi adotada para analisar os impactos locais da propagação

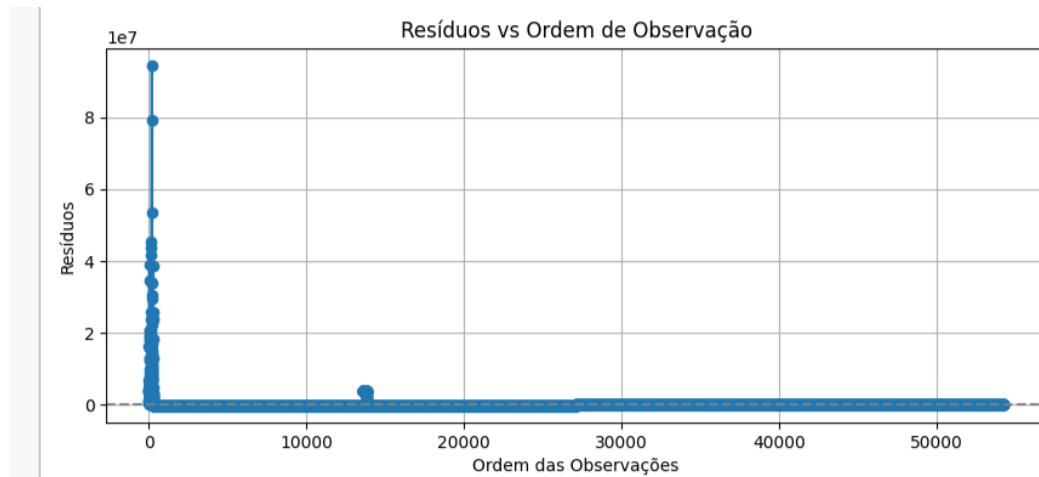


Figura 23 – Avaliação da independência dos resíduos do modelo ANOVA para o segundo experimento.

de sinal e avaliar a adequação dos modelos de propagação em diferentes escalas espaciais. Cada região é identificada por um número, com as grades pretas delimitando as regiões, a escala de cores representando a potência do sinal de rádio associada e as áreas em branco indicando ambientes de corredor.

#### 6.4.1 Resultados para região de interesse de tamanho fixo 10 m $\times$ 10 m

Os resultados obtidos para a região de interesse de tamanho 10 m x 10 m estão apresentados nas Tabelas 2 e 3. A Tabela 2 exibe o erro absoluto médio (Mean Absolute Error – MAE) e o erro médio quadrático (Mean Squared Error – MSE) para cada modelo de propagação de sinal de rádio analisado em cada região e as respectivas médias dos erros associados. Já a Tabela 3 apresenta os modelos que se mostraram estatisticamente equivalentes, bem como o melhor modelo identificado para cada região de acordo com o menor erro.

Os resultados indicam que, para regiões de interesse próximas à antena, o modelo de dois raios (TwoRay) demonstrou maior eficiência na representação da perda de propagação do sinal, conforme previsto pelos modelos teóricos, apresentando os menores erros nas regiões 1, 2, 3 e 4. Nas demais regiões, o modelo LogNormal, em geral, mostrou-se mais eficaz, embora em algumas áreas não tenham sido observadas diferenças estatisticamente significativas entre os modelos.

Nas regiões da curva (13 e 14), onde ocorreu uma queda na propagação do sinal durante os testes devido à perda da visada direta, verificou-se um aumento no erro, evidenciando os efeitos locais dos obstáculos sobre a transmissão do sinal.

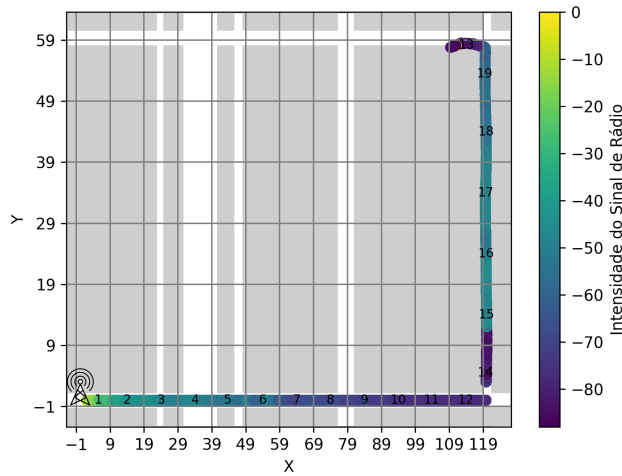


Figura 24 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 10 m × 10 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	TwoRay		LogNormal		LogShadowing	
	MAE	MSE	MAE	MSE	MAE	MSE
1	0,080	<b>0,008</b>	2,93e6	1,15e13	4,84e06	7,36e13
2	0,074	<b>0,007</b>	49,270	6,810e3	67,476	1,59e04
3	0,065	<b>0,004</b>	0,729	0,832	1,317	7,641
4	0,061	<b>0,004</b>	0,063	0,005	0,121	0,053
5	0,063	0,004	0,012	<b>0,000</b>	0,019	0,001
6	0,063	0,004	0,003	<b>0,000</b>	0,006	<b>0,000</b>
7	0,064	0,004	0,001	<b>0,000</b>	0,002	<b>0,000</b>
8	0,062	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
9	0,062	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
10	0,061	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
11	0,064	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
12	0,064	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
13	0,152	<b>0,082</b>	0,090	0,090	0,090	0,090
14	0,076	0,012	<b>0,009</b>	<b>0,009</b>	<b>0,009</b>	<b>0,009</b>
15	0,072	0,007	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>	<b>0,003</b>
16	0,068	0,005	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
17	0,068	0,005	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
18	0,068	0,005	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
19	0,066	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Média	0,071	0,009	1,54e05	6,05e11	2,54e05	3,87e12

Tabela 2 – Resultados dos erros de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo 10 m × 10 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	Modelos Estatisticamente Iguais	Melhor Modelo
1		TwoRay
2		TwoRay
3		TwoRay
4	[(LogNSha, TwoRay)]	TwoRay
5		LogNormal
6		LogNormal
7	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
8	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
9	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
10	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
11	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
12	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
13	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
14	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal Shadowing
15	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal Shadowing
16	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
17	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
18	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
19	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal

Tabela 3 – Resultados da análise de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 10 m × 10 m. Fonte: Campos et al. [2024].

### 6.4.2 Resultados para região de interesse de tamanho fixo 20 m × 20 m

Os resultados obtidos para a região de interesse com tamanho de 20 m × 20 m estão apresentados nas Tabelas 4 e 5. Ao reduzir o número de subdivisões das regiões, que possuem dimensões maiores em relação à divisão de 10 m × 10 m, observou-se que o padrão local foi mantido, indicando que os erros associados aos dados medidos se aproximam mais do modelo TwoRay quando o robô está mais próximo da antena da base. No entanto, conforme mostrado na Tabela 4, houve um aumento significativo nas médias dos erros para cada modelo, evidenciando que o aumento nas dimensões das regiões de interesse (tanto em comprimento quanto em altura) resulta em um aumento no erro ao comparar os modelos em cada região.

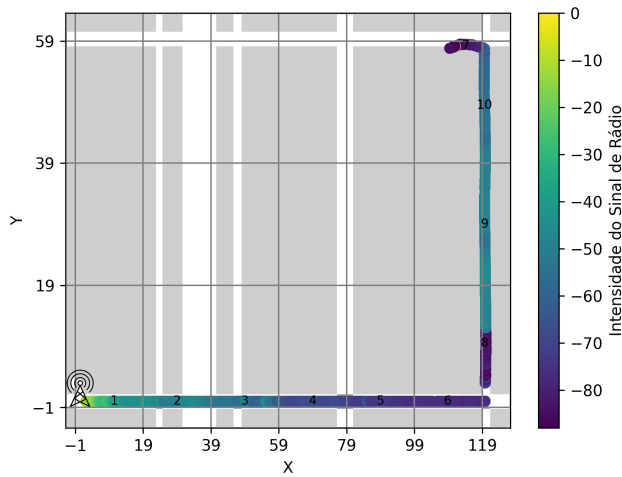


Figura 25 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 20 m × 20 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	TwoRay		LogNormal		LogShadowing	
	MAE	MSE	MAE	MSE	MAE	MSE
1	0,056	<b>0,006</b>	2e06	7,85e12	3,61e06	9,88e13
2	0,047	<b>0,003</b>	0,413	0,440	0,760	2,797
3	0,053	0,003	0,008	<b>0,000</b>	0,014	0,001
4	0,055	0,003	0,001	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
5	0,049	0,002	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
6	0,056	0,003	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
7	0,152	<b>0,082</b>	0,090	0,090	0,090	0,090
8	0,072	0,009	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
9	0,067	0,005	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
10	0,065	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Média	0,067	0,012	2e05	7,85e11	3,61e05	9,88e12

Tabela 4 – Resultados dos erros de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 20 m × 20 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	Modelos Estatisticamente Iguais	Melhor Modelo
1		TwoRay
2		TwoRay
3		LogNormal
4	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
5	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
6	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
7	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
8	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal Shadowing
9	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
10	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal

Tabela 5 – Resultados da análise de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 20 m × 20 m. Fonte: Campos et al. [2024].

### 6.4.3 Resultados para região de interesse de tamanho fixo 30 m × 30 m

Os resultados obtidos para a região de interesse com tamanho de 30 m × 30 m estão apresentados nas Tabelas 6 e 7. Conforme indicaram os resultados para as regiões com tamanho fixo de 10 m × 10 m e 20 m × 20 × novamente houve um aumento do erro com o aumento da região de análise e uma tendência de melhor ajuste do modelo de dois raios em relação às regiões mais próximas da antena da base.

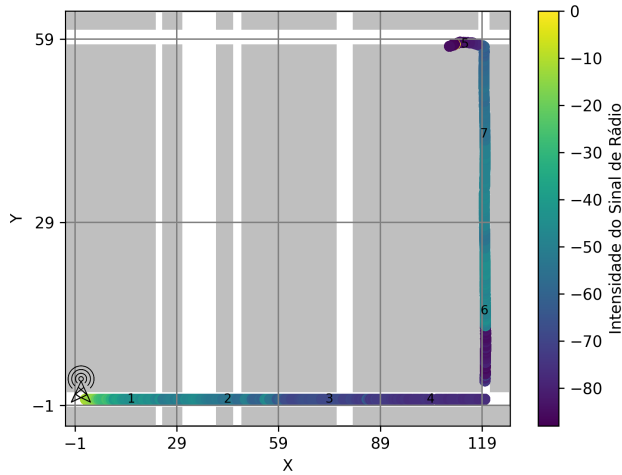


Figura 26 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 30m × 30 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	TwoRay		LogNormal		LogShadowing	
	MAE	MSE	MAE	MSE	MAE	MSE
1	0,042	<b>0,004</b>	1,48e06	5,79e12	2,31e06	3,17e13
2	0,040	<b>0,002</b>	0,025	<b>0,002</b>	0,043	0,013
3	0,046	0,002	0,001	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
4	0,060	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
5	0,152	<b>0,082</b>	0,090	0,090	0,090	0,090
6	0,072	0,009	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b>
7	0,064	0,004	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Média	0,068	0,015	2,11e05	8,27e11	3,30e05	4,52e12

Tabela 6 – Resultados dos erros de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 30 m × 30 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	Modelos Estatisticamente Iguais	Melhor Modelo
1		TwoRay
2		LogN
3	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
4	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
5	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
6	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal Shadowing
7	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal

Tabela 7 – Resultados da análise de ajuste para a primeira base de dados com tamanho fixo de 30 m × 30 m. Fonte: Campos et al. [2024].

### 6.4.4 Análise estatística para segunda base de dados

Após a análise inicial realizada com a primeira base de dados, foi introduzida uma segunda base com o objetivo de complementar os resultados e aprofundar a investigação. Essa nova base, coletada por Cid [2023], contém informações sobre a potência do sinal e a distância percorrida, obtidas a partir de testes com um robô móvel em um ambiente

de corredores do prédio do Instituto Tecnológico Vale, da Universidade Federal de Ouro Preto. A Figura 27 ilustra esses dados, evidenciando o trajeto realizado pelo robô no mapa e as respectivas medições de potência de sinal de rádio em cada posição ocupada.

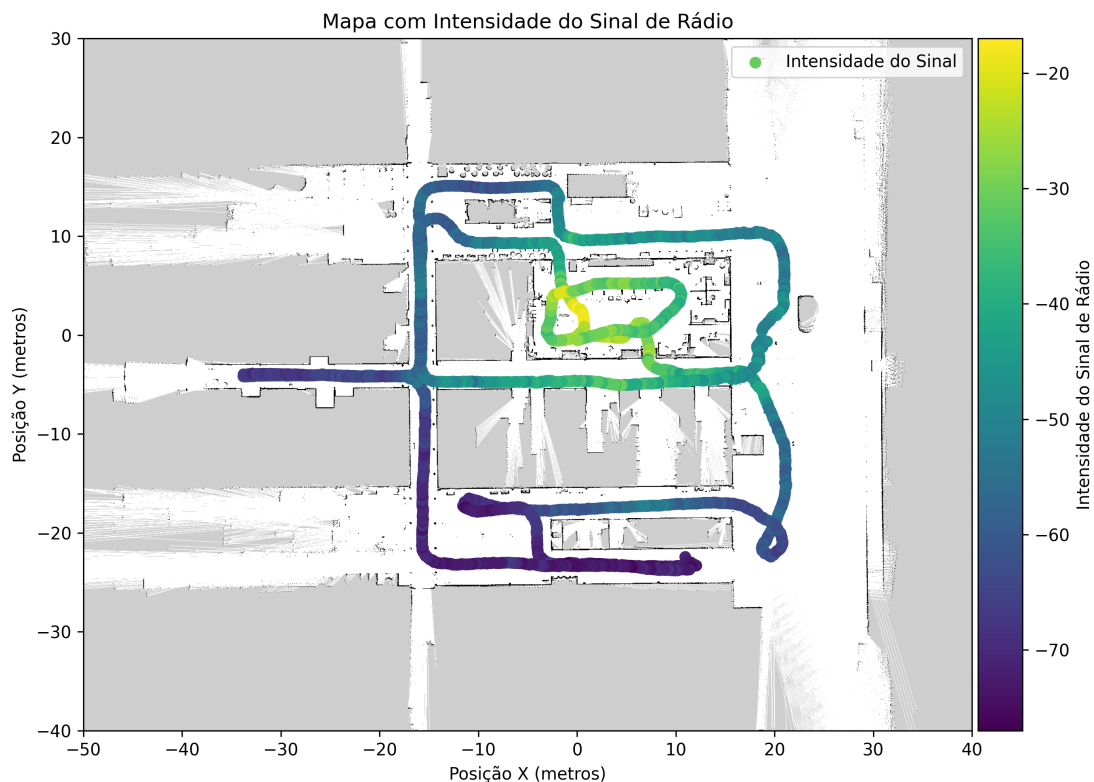


Figura 27 – Potência de sinal de rádio (dBm) em função da distância (X-Y) em metros. Fonte: adaptado de Cid [2023].

A divisão das regiões de interesse nesta base de dados seguiu um critério distinto, voltado a abranger o máximo possível de informações relevantes do ambiente. O processo de delimitação considerou, por exemplo, interseções entre corredores e salas. Com isso, as regiões foram definidas com dimensões fixas de  $9\text{ m} \times 4\text{ m}$ .

Os resultados obtidos para a segunda base de dados são ilustrados na Figura 28. A partir dessa divisão, foram calculados os erros associados a cada modelo para cada região de interesse, conforme apresentado na Tabela 8.

Para a segunda base de dados, também foram identificados os modelos com melhor desempenho em cada região, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. Esses resultados estão disponíveis na Tabela 9. A análise dos dados revela um padrão semelhante ao observado previamente: nas regiões 17, 22 a 26 e 30 a 34 — todas localizadas próximas à antena e com linha de visada direta — o modelo que obteve melhor desempenho foi, novamente, o TwoRay. Nas demais regiões, situadas a distâncias superiores a 10 metros da antena, o modelo LogNormal mostrou-se mais adequado.

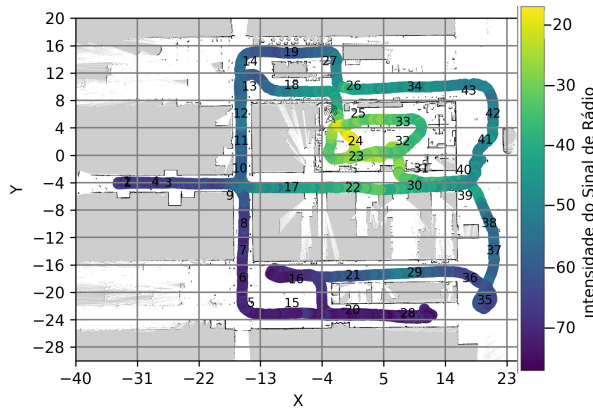


Figura 28 – Divisão dos dados em regiões de interesse com tamanho fixo de 9 m × 4 m. Fonte: Campos et al. [2024].

Região	TwoRay		LogNormal		LogShadowing	
	MAE	MSE	MAE	MSE	MAE	MSE
1	0,078	0,006	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
2	0,093	0,009	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
3	0,072	0,005	0,002	<b>0,000</b>	0,003	<b>0,000</b>
4	0,099	0,010	0,001	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
5	0,092	0,009	0,001	<b>0,000</b>	0,002	<b>0,000</b>
6	0,112	0,013	0,003	<b>0,000</b>	0,004	<b>0,000</b>
7	0,121	0,015	0,006	<b>0,000</b>	0,007	<b>0,000</b>
8	0,131	0,017	0,014	<b>0,000</b>	0,019	0,001
9	0,113	0,014	0,021	<b>0,001</b>	0,033	0,003
10	0,143	0,020	0,034	<b>0,001</b>	0,064	0,010
11	0,125	0,016	0,035	<b>0,001</b>	0,054	0,007
12	0,114	0,013	0,024	<b>0,001</b>	0,033	0,002
13	0,105	0,011	0,013	<b>0,000</b>	0,021	0,001
14	0,101	0,010	0,007	<b>0,000</b>	0,011	<b>0,000</b>
15	0,072	0,005	0,003	<b>0,000</b>	0,007	<b>0,000</b>
16	0,100	0,010	0,010	<b>0,000</b>	0,020	0,001
17	0,093	<b>0,011</b>	2,765	21,651	5,888	147,090
18	0,287	0,096	0,216	<b>0,081</b>	0,522	1,391
19	0,161	0,027	0,023	<b>0,001</b>	0,039	0,003
20	0,090	0,008	0,003	<b>0,000</b>	0,006	<b>0,000</b>
21	0,123	0,015	0,017	<b>0,000</b>	0,041	0,006
22	0,270	<b>0,073</b>	53,564	3,98e3	87,750	1,87e4
23	0,038	<b>0,003</b>	7,53e9	2,47e21	9,53e9	3,91e21
24	0,024	<b>0,003</b>	2,53e10	3,64e22	9,75e9	5,14e21
25	0,336	<b>0,115</b>	56,146	5,59e3	56,738	8,92e3
26	0,265	<b>0,073</b>	0,783	0,775	1,058	2,047
27	0,171	0,031	0,082	<b>0,009</b>	0,097	0,015
28	0,087	0,008	0,002	<b>0,000</b>	0,004	<b>0,000</b>
29	0,138	0,019	0,010	<b>0,000</b>	0,017	0,001
30	0,245	<b>0,077</b>	1,185	3,741	1,218	5,534
31	0,112	<b>0,016</b>	2,252	10,376	4,248	73,858
32	0,093	<b>0,010</b>	11,937	3,62e2	20,202	1,41e3
33	0,116	<b>0,015</b>	1,626	5,085	3,477	76,413
34	0,099	<b>0,011</b>	0,126	0,026	0,193	0,107
35	0,083	0,007	0,001	<b>0,000</b>	0,001	<b>0,000</b>
36	0,102	0,011	0,002	<b>0,000</b>	0,004	<b>0,000</b>
37	0,088	0,008	0,002	<b>0,000</b>	0,003	<b>0,000</b>
38	0,090	0,008	0,004	<b>0,000</b>	0,007	<b>0,000</b>
39	0,118	0,015	0,020	<b>0,001</b>	0,021	<b>0,001</b>
40	0,087	0,008	0,022	<b>0,001</b>	0,055	0,014
41	0,122	0,015	0,008	<b>0,000</b>	0,016	<b>0,000</b>
42	0,109	0,012	0,005	<b>0,000</b>	0,008	<b>0,000</b>
43	0,080	0,007	0,008	<b>0,000</b>	0,012	<b>0,000</b>

Tabela 8 – Resultados dos erros de ajuste para a segunda base de dados com tamanho fixo de 9 m × 4 m. Fonte: Campos et al. [2024].

## 6.5 Considerações finais sobre os resultados encontrados nos testes

A partir dos resultados obtidos nos testes com múltiplos robôs e das análises estatísticas realizadas, os dados foram empregados como base para a simulação do sistema de navegação proposto. Em distâncias de até 10 metros da antena da base, onde a propagação tende a ser mais direta e menos sujeita a obstáculos, foi adotado o modelo de dois raios. Esse modelo considera tanto o sinal direto quanto o sinal refletido, proporcionando uma estimativa precisa da potência em curtas distâncias, onde o impacto da linha de visão e das reflexões é mais previsível. O valor de 10 metros foi estimado com base nos resultados experimentais e nas características do modelo de dois raios uma vez que para valores próximos da antena ocorre maior interferência em relação aos raios refletidos no solo.

Região	Modelos Estatisticamente Iguais	Melhor Modelo
1	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
2	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
3	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
4	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
5	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
6	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
7	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
8	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
9	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
10	∅	LogNormal
11	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
12	[(LogN, TwoRay)]	LogNormal
13	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
14	∅	LogNormal
15	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
16	∅	LogNormal
17	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
18	[(LogNSha, TwoRay)]	LogNormal
19	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
20	∅	LogNormal
21	∅	LogNormal
22	∅	TwoRay
23	NEDS.	TwoRay
24	NEDS.	TwoRay
25	∅	TwoRay
26	∅	TwoRay
27	∅	LogNormal
28	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
29	∅	LogNormal
30	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
31	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay), (LogNSha, TwoRay)]	TwoRay
32	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
33	[(LogN, LogNSha)]	TwoRay
34	[(LogN, LogNSha), (LogNSha, TwoRay)]	TwoRay
35	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
36	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
37	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
38	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
39	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal
40	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
41	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
42	[(LogN, LogNSha)]	LogNormal
43	[(LogN, LogNSha), (LogN, TwoRay)]	LogNormal

Tabela 9 – Resultados da análise de ajuste para a segunda base de dados com tamanho fixo de 9 m × 4 m. Campos et al. [2024].

Apesar de o modelo de dois raios ser adequado para distâncias intermediárias, outra limitação está associada às regiões muito próximas à antena, onde pode ocorrer o chamado campo próximo. Embora as antenas tenham sido posicionadas a cerca de 1 metro de distância, os elevados erros observados nessas proximidades podem indicar a presença desse fenômeno.

Para distâncias superiores a 10 metros, onde o sinal tende a sofrer atenuações mais complexas devido a obstáculos e à dispersão, foi aplicado o modelo lognormal. Esse modelo leva em conta a variabilidade e a perda de sinal associadas à obstrução e à reflexão múltipla, sendo mais adequado para cenários onde o sinal se degrada com a distância e a presença de barreiras.

Embora a abordagem apresentada tenha gerado resultados significativos no uso dos modelos de propagação de sinal para diferentes regiões, ao analisar detalhadamente as regiões 13 e 14 (para a divisão de  $10\text{m} \times 10\text{m}$ ), as regiões 7 e 8 (para a divisão de  $20\text{m} \times 20\text{m}$ ) e as regiões 5 e 6 (para a divisão de  $30\text{m} \times 30\text{m}$ ), é evidente que essas áreas, localizadas na curva, apresentam os maiores erros nos modelos de propagação. Isso sugere que os modelos utilizados não conseguem capturar adequadamente as condições de propagação nestas regiões específicas. Uma alternativa interessante seria adotar um modelo diferente, como o modelo com múltiplos Gumes de Faca proposto por [Deygout \[1966\]](#). Este modelo considera o desvanecimento causado por obstáculos localizados entre a antena transmissora e a receptora, oferecendo uma estimativa mais precisa para essas áreas em termos das atenuações causadas pelos multipercursos.

## 6.6 Simulação do sistema de navegação multi-robôs

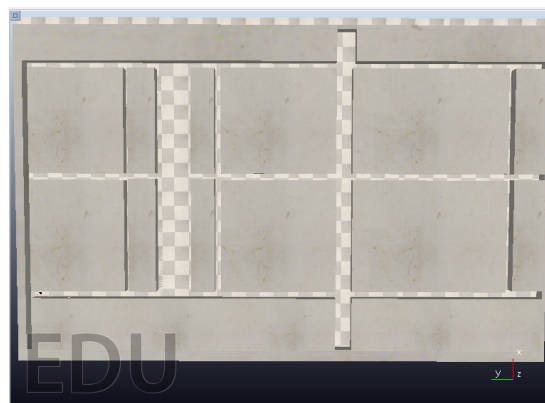
Após testar os modelos de propagação de sinal de rádio com dados experimentais e definir uma metodologia para previsão do sinal com base nas condições ambientais, foi desenvolvida uma simulação utilizando o software CoppeliaSim e o framework ROS (Robot Operating System), conforme ilustrado na Figura 29. Nesta simulação, o robô cliente é teleoperado em um ambiente de corredor, o qual foi modelado a partir do ambiente real de testes. O robô está equipado com um laser tridimensional Velodyne, que coleta informações de geometria do ambiente, detectando obstáculos e realizando a verificação de visada direta.

Quando são detectados obstáculos, como curvas ou áreas com perda significativa de propagação de sinal, o robô repetidor é deslocado para uma posição que assegure a manutenção da visada direta ou do roteamento de sinal. Essa estratégia segue a metodologia apresentada na Figura 6, com a inclusão das informações sobre qual modelo de propagação de sinal deve ser utilizado com base na proximidade da antena.

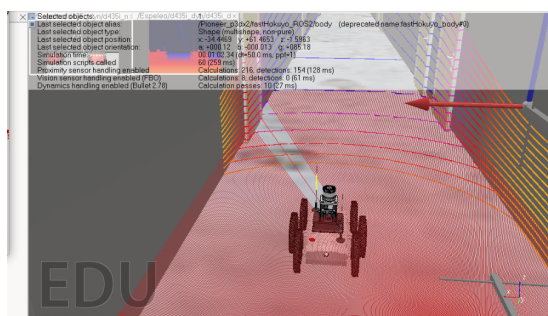
As vantagens de utilizar um ambiente simulado incluem a possibilidade de obter



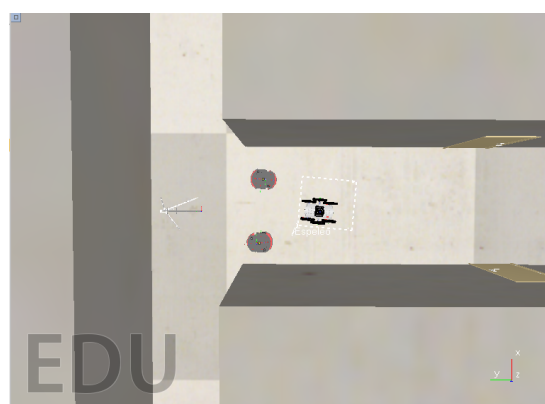
(a) Robôs na posição inicial esperando comando.



(b) Mapa do ambiente de corredor na simulação - Vista Superior



(c) EspeleoRobô sendo teleoperado



(d) Posicionamento dos robô - Vista Superior

Figura 29 – Simulação do sistema de navegação multi-robô em ambiente virtual modelado a partir do ambiente real de testes.

uma estimativa prévia da propagação de sinal de rádio em um mapa de ambiente conhecido, o que é essencial para o planejamento de missões com robôs móveis. Além disso, como o software CoppeliaSim atualmente não possui um simulador de propagação de sinal de rádio integrado em seus scripts, a simulação desenvolvida se torna útil para outros projetos que necessitam modelar esse tipo de propagação.

Embora a simulação ofereça contribuições relevantes, ela apresenta limitações na implementação relacionada ao uso de múltiplos robôs, principalmente devido à dificuldade em modelar com precisão os sinais de rádio e suas variações em ambientes com curvas e obstáculos. Além disso, a simulação não contempla as perdas de propagação causadas por efeitos de multipercurso, o que pode impactar significativamente a comunicação em cenários reais. Ressalta-se também que os efeitos de interação e comunicação entre mais de dois robôs não foram abordados neste estudo, sendo uma limitação que deve ser considerada em trabalhos futuros.

## Capítulo 7

# Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta dissertação apresentou uma estratégia de navegação cooperativa com múltiplos robôs móveis em ambientes confinados, com foco na manutenção da conectividade da comunicação sem fio. Foram analisados diferentes modelos de propagação de sinal e sua aplicabilidade em cenários distintos. A abordagem proposta combina dados experimentais e simulações computacionais para avaliar o comportamento do sinal de rádio em diferentes regiões do ambiente e, a partir disso, posicionar dinamicamente robôs repetidores de forma a garantir cobertura contínua.

Um dos principais aprendizados deste trabalho foi a constatação de que a comunicação em ambientes confinados depende fortemente da geometria local e da existência de linha de visada entre os dispositivos. A utilização de modelos distintos de propagação — o modelo de dois raios (TwoRay) para regiões próximas à antena, e o modelo LogNormal para regiões mais distantes — mostrou-se eficaz na previsão da perda de sinal. A análise estatística regionalizada permitiu uma adaptação mais precisa da estratégia de navegação, possibilitando a identificação de padrões de propagação e falhas potenciais na comunicação.

Os resultados dos experimentos reais demonstraram que a introdução de robôs atuando como repetidores dinâmicos contribui significativamente para a estabilidade da transmissão, sobretudo em ambientes com obstáculos estruturais, como curvas e quinas. Por outro lado, observou-se que, mesmo com a aplicação de modelos clássicos, certas regiões — especialmente aquelas com forte atenuação ou sem linha de visada — apresentaram erros consideráveis na estimativa do sinal, evidenciando limitações dos modelos utilizados em contextos mais complexos.

A principal contribuição deste trabalho reside na metodologia proposta para integrar modelos de propagação ao planejamento de navegação multi-robôs, resultando em uma solução adaptativa e viável para operação em ambientes confinados.

Dessa forma, os resultados obtidos contribuem para o avanço da aplicação de robôs móveis em ambientes de difícil acesso, fornecendo uma base sólida para futuros

aprimoramentos e incentivando o desenvolvimento de novas soluções voltadas à comunicação sem fio em cenários críticos.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Como continuidade desta dissertação, diversas direções podem ser exploradas com o objetivo de aprimorar a estratégia proposta. Uma possibilidade é a adoção de modelos de propagação mais sofisticados, como o modelo Gume de Faca, que leva em consideração a presença de obstáculos entre o transmissor e o receptor. Esse modelo pode oferecer maior precisão na estimativa da potência do sinal, especialmente em regiões com elevada obstrução e ausência de linha de visada direta.

Outra linha promissora é a incorporação de técnicas de aprendizado de máquina para a predição da perda de sinal, utilizando dados empíricos e características do ambiente. Com isso, os robôs repetidores poderiam tomar decisões de forma mais dinâmica e em tempo real, adaptando-se melhor às variações do ambiente.

Também se destaca como potencial aprimoramento o aumento da escala do sistema, com a utilização de um maior número de robôs roteadores. Isso possibilitaria a formação de redes em malha (*mesh networks*) capazes de se reorganizar dinamicamente de acordo com a topologia e os obstáculos do ambiente.

Adicionalmente, sugere-se a realização de testes em ambientes reais mais variados e desafiadores, como galerias subterrâneas, instalações industriais complexas e locais com alta interferência eletromagnética. Também seria pertinente empregar a estratégia proposta por meio da simulação desenvolvida para estimar a potência do sinal de rádio nesses ambientes e comparar os resultados simulados com os dados reais coletados, a fim de avaliar a eficácia da metodologia proposta.

Por fim, uma perspectiva interessante seria adaptar a estratégia para permitir a detecção de outros tipos de obstruções além de curvas, de maneira automática e em tempo real, o que contribuiria para uma análise ainda mais precisa da conectividade do ambiente.

# Referências

- A. Agha, K. Otsu, B. Morrell, D. Fan, R. Thakker, A. Santamaria-Navarro, S. Kim, A. Bouman, X. Lei, J. Edlund, et al. Nebula: Quest for robotic autonomy in challenging environments. *TEAM CoSTAR at the DARPA Subterranean Challenge*, 2021.
- H. Azpurua, F. Rocha, G. Garcia, A. S. Santos, E. Cota, L. G. Barros, A. S. Thiago, G. Pessin, and G. M. Freitas. Espeleorobô - a robotic device to inspect confined environments. In *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 17–23, 2019. doi: 10.1109/ICAR46387.2019.8981627.
- Boston Dynamics. Spot® - the agile mobile robot. Online, 2024. Disponível em: <https://bostondynamics.com/products/spot/>.
- S. P. Campos, A. L. M. Cid, A. D. C. Vangasse, G. Júnior, J. Baião, L. Pimenta, L. Barros, G. Pessin, and G. Freitas. Navigation strategy with multi-robots in confined environments to improve radio signal coverage. In *2023 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2023 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2023 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. IEEE, Oct. 2023a.
- S. P. Campos, A. L. M. Cid, A. D. C. Vangasse, G. Júnior, J. Baião, L. Pimenta, L. Barros, G. Pessin, and G. Freitas. Navigation strategy with multi-robots in confined environments to improve radio signal coverage. In *2023 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2023 Brazilian Symposium on Robotics (SBR), and 2023 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 313–318, 2023b. doi: 10.1109/LARS/SBR/WRE59448.2023.10333021.
- S. P. Campos, A. L. M. Cid, M. Bessani, and G. Freitas. Análise de ajuste de modelos de cobertura de sinal de rádio para experimentos indoor com múltiplos robôs. In *Congresso Brasileiro de Automática 2024*, 2024.
- A. Cid, A. Vangasse, S. Campos, M. Delunardo, G. C. Júnior, N. Neto, L. Pimenta, J. Domingues, L. Barros, H. Azpúrua, G. Pessin, and G. Freitas. Wireless communication-aware path planning and multiple robot navigation strategies for assisted inspections. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110:88, 2024. doi: 10.1007/s10846-024-02112-4.

- A. L. M. Cid. Planejamento de caminhos e exploração para robôs móveis com base na intensidade do sinal de rádio. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2023.
- L. Clark, J. A. Edlund, M. S. Net, T. S. Vaquero, and A.-a. Agha-mohammadi. Propeml: Radio propagation environment modeling and learning for communication-aware multi-robot exploration. *arXiv preprint arXiv:2205.01267*, 2022.
- R. F. G. da Silva. Estudo de métodos de mapeamento baseados em informação visual utilizando robôs móveis em ambientes confinados. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.
- L. A. R. da Silva Mello. *Redes de Acesso em Banda Larga Utilizando Sistemas VSAT e WiFi*. PhD thesis, PUC-Rio, 2006.
- J. Deygout. Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(4):480–489, 1966. doi: 10.1109/TAP.1966.1138719.
- J. Durbin and G. S. Watson. Testing for serial correlation in least squares regression: I. *Biometrika*, 37(3–4):409–428, Dec. 1950. ISSN 1464-3510.
- M. A. Fligner and T. J. Killeen. Distribution-free two-sample tests for scale. *Journal of the American Statistical Association*, 71(353):210–213, Mar. 1976. ISSN 1537-274X.
- G. M. Freitas, G. P. d. Cruz Júnior, A. d. C. Vangasse, G. Gomes, S. P. Campos, I. F. S. Amaral, A. L. M. Cid, M. C. D. Torres, N. C. P. d. S. T. Neto, R. S. Pereira Júnior, L. G. D. d. Barros, J. D. Domingues, and G. Pessin. Localização, Mapeamento e Comunicação em Cavas de Minas e Galerias de Barragens de Grande Extensão: Primeiro Relatório Parcial do Projeto. Relatório Técnico ITV MI PROD. TEC. ITV MI N006/2023, Instituto Tecnológico Vale, Belo Horizonte, MG, August 2023.
- G. M. Freitas, G. P. d. Cruz Júnior, A. d. C. Vangasse, G. Gomes, S. P. Campos, I. F. S. Amaral, A. L. M. Cid, M. C. D. Torres, N. C. P. d. S. T. Neto, R. S. Pereira Júnior, L. G. D. d. Barros, J. D. Domingues, and G. Pessin. Localização, Mapeamento e Comunicação em Cavas de Minas e Galerias de Barragens de Grande Extensão: Segundo Relatório Parcial do Projeto. Relatório Técnico ITV MI PROD. TEC. ITV MI N006/2023, Instituto Tecnológico Vale, Belo Horizonte, MG, August 2024.
- T. O. Hodson. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14):5481–5487, July 2022. ISSN 1991-9603.

- N. Hudson, F. Talbot, M. Cox, J. Williams, T. Hines, A. Pitt, B. Wood, D. Frousheger, K. L. Surdo, T. Molnar, et al. Heterogeneous ground and air platforms, homogeneous sensing: Team CSIRO data61's approach to the DARPA subterranean challenge. *arXiv preprint arXiv:2104.09053*, 2021.
- ITVRoC. espeleo\_vrep\_simulation - v-rep simulation for espeleorobo. [https://github.com/ITVRoC/espeleo\\_vrep\\_simulation](https://github.com/ITVRoC/espeleo_vrep_simulation), 2020. Acesso em: abr. 2025.
- G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani. *An introduction to statistical learning*, volume 112. Springer, 2013.
- G. P. C. Júnior, A. M. Rezende, V. R. Miranda, R. Fernandes, H. Azpúrua, A. A. Neto, G. Pessin, and G. M. Freitas. EKF-LOAM: an adaptive fusion of LiDAR SLAM with wheel odometry and inertial data for confined spaces with few geometric features. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19(3):1458–1471, 2022.
- S. Lewis. Nasa is training human-like robots to explore caves on mars, Aug. 2021. URL <https://www.cbsnews.com/news/nasa-human-like-robots-boston-dynamics-spot-explore-caves-mars/>. Accessed: 2024-06-21.
- Y. Luo, Y. Wang, H. Chen, C. Wu, X. Lyu, J. Zhou, J. Ma, F. Zhang, and B. Zhou. Fermi: Flexible radio mapping with a hybrid propagation model and scalable autonomous data collection. *arXiv preprint arXiv:2504.14862*, 2025.
- D. C. Montgomery and G. C. Runger. *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & sons, 2010.
- MUNDO EDUCAÇÃO. Fenômenos ondulatórios. UOL, [s.d.]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/fenomenos-ondulatorios.htm>. Acesso em: 1 out. 2024.
- NBR 16577. *Espaço confinado - Prevenção de acidentes, procedimentos e medidas de proteção*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, Mar. 2017.
- NR-33. *Segurança e Saúde nos Trabalhos em Espaços Confinados*. Ministério do Trabalho e Emprego, Brasília, June 2022.
- M. T. Ohradzansky, E. R. Rush, D. G. Riley, A. B. Mills, S. Ahmad, S. McGuire, H. Biggie, K. Harlow, M. J. Miles, E. W. Frew, et al. Multi-agent autonomy: Advancements and challenges in subterranean exploration. *arXiv preprint arXiv:2110.04390*, 2021.
- T. S. Rappaport. *Comunicações sem Fio: Princípios e Práticas, 2/E*. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2009.

- A. M. Robots. Pioneer 3-dx, 2011. URL <https://www.generationrobots.com/media/Pioneer3DX-P3DX-RevA.pdf?srsltid=AfmB0orQ4Hya1hjH1DKW8-kCqKadnwTzv80XhYNB3j-616crIv0S0QJM>. Acessado em: 05/03/2025.
- T. Roucek, M. Pecka, P. Cizek, T. Petricek, J. Bayer, V. Šalansky, T. Azayev, D. Hert, M. Petrlik, T. Báca, et al. System for multi-robotic exploration of underground environments ctu-cras-norlab in the darpa subterranean challenge. *arXiv preprint arXiv:2110.05911*, 2021.
- M. Saboia, L. Clark, V. Thangavelu, J. A. Edlund, K. Otsu, G. J. Correa, V. S. Varadharajan, A. Santamaria-Navarro, T. Touma, A. Bouman, H. Melikyan, T. Pailevanian, S.-K. Kim, A. Archanian, T. S. Vaquero, G. Beltrame, N. Napp, G. Pessin, and A.-a. Aghamohammadi. Achord: Communication-aware multi-robot coordination with intermittent connectivity. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4):10184–10191, 2022.
- S. S. Shapiro and M. B. Wilk. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4):591–611, Dec. 1965. ISSN 1464-3510.
- M. Tranzatto, F. Mascarich, L. Bernreiter, C. Godinho, M. Camurri, S. Khattak, T. Dang, V. Reijgwart, J. Loeje, D. Wisth, et al. Cerberus: Autonomous legged and aerial robotic exploration in the tunnel and urban circuits of the darpa subterranean challenge. *arXiv preprint arXiv:2201.07067*, page 3, 2022.
- M. F. Triola. *Introdução à estatística*. LTC, Rio de Janeiro, 2008.
- J. W. Tukey. Comparing individual means in the analysis of variance. *Biometrics*, 5(2):99, June 1949. ISSN 0006-341X.
- Ubiquiti Networks. *RocketM Series Quick Start Guide*, 2016. URL [https://dl.ubnt.com/guides/Rocket\\_M/RocketM\\_Series\\_QSG.pdf](https://dl.ubnt.com/guides/Rocket_M/RocketM_Series_QSG.pdf). Acessado em: março de 2025.
- M. Viswanathan. *Wireless Communication Systems in Matlab*, volume Second edition. Independently published, 2020.
- S. Wang. Radio wave attenuation character in the confined environments of rectangular mine tunnel. *Modern Applied Science*, 4(2):65, 2010.
- J. J. Wynne, T. N. Titus, A.-a. Agha-Mohammadi, A. Azua-Bustos, P. J. Boston, P. de León, C. Demirel-Floyd, J. De Waele, H. Jones, M. J. Malaska, et al. Fundamental science and engineering questions in planetary cave exploration. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(11):e2022JE007194, 2022.