



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e  
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

**Dissertação**

**PLANEJAMENTO DE CAMINHOS E EXPLORAÇÃO PARA ROBÔS MÓVEIS COM  
BASE NA INTENSIDADE DO SINAL DE RÁDIO**

**André Luiz Maciel Cid**

**Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil  
2023**

**André Luiz Maciel Cid**

**PLANEJAMENTO DE CAMINHOS E EXPLORAÇÃO PARA ROBÔS MÓVEIS COM  
BASE NA INTENSIDADE DO SINAL DE RÁDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Gustavo Freitas, Ph.D.

Coorientador: Prof. Hector Azpúrua, Ph.D.

Coorientador: Prof. Gustavo Pessin, Ph.D.

Ouro Preto

2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C568p Cid, André Luiz Maciel.

Planejamento de caminhos e exploração para robôs móveis com base na intensidade do sinal de rádio. [manuscrito] / André Luiz Maciel Cid. - 2023.

65 f.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas.

Coorientadores: Prof. Dr. Gustavo Pessin, Dr. Hector Azpúrua.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Robótica - Minas e mineração. 2. Robôs móveis - Planejamento de caminhos. 3. Comunicação. 4. Robôs móveis - Mapeamento e navegação. I. Freitas, Gustavo Medeiros. II. Azpúrua, Hector. III. Pessin, Gustavo. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**André Luiz Maciel Cid**

### Planejamento de caminhos e exploração para robôs Móveis

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração

Aprovada em 20 de outubro de 2023

#### Membros da banca

Doutor - Gustavo Medeiros Freitas - Orientador - Universidade Federal de Minas Gerais  
Doutor - Gustavo Pessin - Instituto Tecnológico Vale  
Doutor - Pedro Henrique Gomes da Silva - Ericsson Telecomunicações  
Doutor - Luciano Cunha de Araújo Pimenta - Universidade Federal de Minas Gerais

Gustavo Medeiros Freitas, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 09/01/2024



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho**,  
**COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST.**  
**CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em  
15/01/2024, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento  
no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0650747** e o código CRC **0E76CA87**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº  
23109.000148/2024-17

SEI nº  
0650747

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: (31)3552-7352 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

*Dedico este trabalho a todos  
aqueles que já me apoiaram com  
incentivo ou boas ideias.*

# Agradecimentos

Durante esta etapa, muitas pessoas participaram direta ou indiretamente no trabalho apresentado nessa dissertação e são essas pessoas que gostaria de ressaltar aqui. Em primeiro lugar, um enorme agradecimento à minha família por todo o apoio dado, em especial a minha mãe Aleçandra. Um agradecimento especial a todos os bolsistas do laboratório de robótica por me ajudarem inclusive nos finais de semana, principalmente Filipe, Jacó, Mário, Nilton e Renato. E por fim, mas não menos importante, aos meus orientadores Gustavo Freitas, Hector Azpúrua e Gustavo Pessin, por todo apoio e conhecimento. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

*“Inteligência é a capacidade de se  
adaptar a mudanças”  
(Stephen Hawking).*

## Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

### PLANEJAMENTO DE CAMINHOS E EXPLORAÇÃO PARA ROBÔS MÓVEIS COM BASE NA INTENSIDADE DO SINAL DE RÁDIO

André Luiz Maciel Cid

Outubro/2023

Orientadores: Gustavo Freitas  
Hector Azpúrua  
Gustavo Pessin

A comunicação é uma das áreas mais críticas em operações de robôs. Manter uma conexão constante entre robô e base é essencial para que as operações funcionem como esperado, reduzindo o risco de acidentes e a necessidade de resgatar o robô. Para sistemas de comunicação sem fio, o risco de perda de comunicação é ainda maior. Assim, a proposta desta dissertação consiste em um sistema de navegação que permita que um robô móvel navegue em um ambiente maximizando a potência do sinal de rádio sem os dados do sinal previamente disponíveis. Para isso, é desenvolvido um planejador que gere caminhos que maximizem a potência total do sinal de rádio entre dois pontos de um mapa de ocupação. O cálculo do caminho ótimo é realizado com o algoritmo bidirecional de Dijkstra em um grafo construído usando as informações do mapa da potência do sinal de rádio, gerado por meio da interpolação e estimação dos sinais de rádio medidos pelo robô. Simulações e experimentos com o EspeleoRobô são realizados a fim de verificar a eficácia do mapeamento do sinal de rádio, planejamento de caminhos e do sistema de navegação. Os resultados desses testes demonstram a eficiência do sistema de navegação para desviar de áreas com baixa potência do sinal de rádio e, conseqüentemente, melhorar a comunicação. Durante os experimentos o planejador de caminhos possibilitou um aumento de no mínimo 22% da média da potência do sinal de rádio em todos os caminhos.

**Palavras-chave:** Planejamento de caminhos, Comunicação, Mapeamento e navegação.

**Macrotema:** Mina/Usina; **Linha de Pesquisa:** Robótica Aplicada à Mineração; **Tema:** Inspeção Automática de Ativos; **Área Relacionada da Vale:** N/A.

## **Abstract**

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

### PATH PLANNING AND EXPLORATION FOR GROUND ROBOTS BASED ON RADIO SIGNAL STRENGTH

André Luiz Maciel Cid

October/2023

Advisors: Gustavo Freitas  
Hector Azpúrua  
Gustavo Pessin

Communication is one of the most critical areas in robot operations. Maintaining a constant connection between robot and base is essential for operations to run as expected, reducing the risk of accidents, damage and the need to rescue the robot. For wireless communication systems, the risk of loss of communication is even greater. Therefore, the proposal of this dissertation consists of a navigation system that allows a mobile robot to navigate in an environment by maximizing the power of the radio signal without the signal data previously available. For that, a planner is developed to generate paths that maximize the total radio signal power between two points on an occupancy map. The optimal path is calculated using Dijkstra's bidirectional algorithm on a graph constructed using information from a radio signal power map, which is generated by interpolating and estimating the radio signals measured by the robot. Some simulations and experiments with EspeleoRobot are carried out in order to verify the effectiveness of the radio signal mapping, path planning and navigation system. The results of these tests demonstrate the efficiency of the navigation system in diverting from areas with low radio signal power and, consequently, improving communication since the path planner, on the other hand, made it possible to increase the average radio signal power on all paths by at least 22%.

**Keywords:** Path planning, Communication, Mapping and navigation.

**Macrotheme:** mine/plant; **Research Line:** Robotics Applied to Mining; **Theme:** Automatic Asset Inspection; **Related Area of Vale:**Not applicable.

# Lista de Figuras

Figura 1.1	Inspeção utilizando um robô móvel dentro de zona de autossalvamento. Por não ter acesso direto ao emboque/desemboque da galeria, a utilização do cabo limita a distância a ser inspecionada dado que parte de sua extensão é utilizada para chegar com o robô na sua entrada. Fonte: O autor. . . . .	16
Figura 1.2	Imagem da câmera do EspeleoRobô durante uma operação de inspeção de uma galeria de barragem. Apesar de possuir 300 metros de cabo, nessa ocasião, o robô não conseguiu andar mais de 160 metros devido a força de arrasto e o atrito do cabo com a parede, destacado pelo retângulo vermelho na imagem. Fonte: O autor	17
Figura 1.3	Exemplos de ambientes a serem inspecionados pelo EspeleoRobô. Fonte: O autor. . . . .	17
Figura 2.1	Mapa de custo utilizado para teste de eficiência do algoritmo proposto por Suh e Oh (2012), onde a métrica desenvolvida é apresentada pelo caminho azul. O caminho rosa foi calculado com o algoritmo A* e os caminhos vermelho e preto por meio de adaptações do algoritmo RRT. Fonte: Suh e Oh (2012). . . . .	25
Figura 2.2	Resultado de planejador de caminho proposto por Yang <b>et al.</b> (2019) para navegação de veículos aéreos não tripulados minimizando a falta de comunicação. Fonte: Yang <b>et al.</b> (2019) . . . . .	26
Figura 2.3	Planejamento de caminhos proposto por Muralidharan e Mostofi (2021) em um grafo visando a menor distância para realizar a conexão entre robô e base. Fonte: Muralidharan e Mostofi (2021). . . . .	26
Figura 3.1	Representação de um mapa de ocupação. Fonte: O autor. . . . .	30
Figura 3.2	Processo de interpolação de dados utilizado para atribuir valor da potência do sinal de rádio para células livres do mapa de ocupação. Fonte: O autor. . . . .	32
Figura 3.3	Metodologia utilizada para realizar a predição da potência do sinal de rádio em um mapa de ocupação. É calculado qual dos pontos é o mais próximo do ponto central do <i>grid</i> . O ponto mais próximo, assim como a distância desse ponto para a antena, são utilizados como referência para o cálculo da potência do sinal de rádio do <i>grid</i> . Fonte: O autor. . . . .	33
Figura 3.4	Atribuição de vizinhos com base na identificação de um nó. Fonte: O autor.	35

Figura 3.5	Exemplos para a construção de grafo dado as dimensões do robô e o mapa de ocupação (a) e um grafo contendo as células transponíveis (b). Fonte: O autor.	36
Figura 4.1	Sistema de planejamento de caminhos com base na potência do sinal de rádio em um ambiente com mapa da potência do sinal desconhecido. Fonte: O autor.	37
Figura 4.2	Grafo do ROS para o sistema de mapeamento da potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.	39
Figura 4.3	Grafo do ROS para o sistema de navegação autônomo com base na potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.	40
Figura 5.1	EspeleoRobô equipado com antenas omnidirecionais e antena direcional utilizada na base. Fonte: O autor.	41
Figura 5.2	Local de realização dos experimentos - Primeiro andar do prédio do Instituto Tecnológico Vale. Fonte: O autor.	42
Figura 5.3	Processo de mapeamento do ambiente, utilizando um mapa de ocupação, e medição da potência do sinal de rádio simultâneo ao mapeamento. Fonte: O autor.	43
Figura 5.4	Mapa de ocupação completo com 1662 leituras da potência do sinal de rádio ao longo do mapeamento do ambiente e posição da antena direcional utilizada na base. Fonte: O autor.	44
Figura 5.6	Mapa completo gerado pela interpolação de 1662 valores da potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.	44
Figura 5.5	Interpolação das potências do sinal de rádio conforme o robô mapeia o ambiente. Fonte: O autor.	45
Figura 5.7	Mapa da potência do sinal de rádio dado pela estimativa utilizando como base apenas a leitura da potência do sinal de rádio na posição inicial do robô. Fonte: O autor.	46
Figura 5.8	Estimativa da potência do sinal de rádio utilizando o método proposto na Subseção 3.3.2. Fonte: O autor.	47
Figura 5.9	Mapa da potência estimada do sinal de rádio, gerado a partir do método proposto na Subseção 3.3.2. Fonte: O autor.	48
Figura 5.10	Mapa completo da potência do sinal de rádio construído por meio de medição, interpolação e estimativa da potência do sinal. Fonte: O autor.	48
Figura 5.11	Caminho mais curto, apresentado em verde, e caminho com métrica de maximizar a potência do sinal de rádio. Fator de potência = 1. Fonte: O autor.	49
Figura 5.12	Fator de potência da Equação 3.22 alterado para 10, priorizando locais com maior potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.	50
Figura 5.13	Segundo caminho planejado com fator de potência $P$ igual a 10. Fonte: O autor.	51
Figura 5.14	Terceiro caminho planejado com fator de potência $P$ igual a 10. Fonte: O autor.	52

Figura 5.15 Comportamento do planejador de caminhos para cada nova iteração do mapa de potência do sinal de rádio. O ponto de partida, representado pela imagem (a), e a primeira estimativa a partir dele (b). No segundo cálculo dos mapas, a rota permanece semelhante, de acordo com as Figuras (c) e (d). Após detectar uma queda significativa da potência do sinal de rádio (e), o planejador recalcula a rota para evitar um local com comunicação pior (f). Fonte: O autor. . . . . 53

Figura 5.16 Sistema de navegação com base na potência do sinal de rádio aplicado ao EspeleoRobô com comportamento semelhante à simulação mostrada na Figura 5.15. Fonte: O autor. . . . . 57

# Lista de Tabelas

Tabela 5.1	Comparação entre caminho mais curto e caminho considerando a qualidade do sinal de rádio com fator $P$ igual a 1 e 10. Fonte: O autor. . . . .	50
Tabela 5.2	Comparação entre as métricas abordadas para os três caminhos gerados com fator de potência igual a 10. Fonte: O autor. . . . .	54
Tabela 5.3	Dados do caminho planejado para cada iteração. Fonte: O autor. . . . .	54
Tabela 5.4	Caminhos percorridos pelo EspeleoRobô utilizando estratégia de controle. Fonte: O autor. . . . .	55
Tabela 5.5	Tempo médio necessário para realização de cada processo do sistema de navegação com base na potência do sinal de rádio. Fonte: O autor. . . . .	55
Tabela 5.6	Dados do caminho planejado para cada iteração do sistema de navegação autônomo com base na potência do sinal de rádio. Fonte: O autor. . . . .	56

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
1.1	Motivação . . . . .	15
1.2	Objetivos . . . . .	18
1.3	Contribuições . . . . .	19
1.4	Estrutura da dissertação . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>22</b>
2.1	Mapeamento da intensidade do sinal do rádio . . . . .	22
2.1.1	Interpoladores . . . . .	22
2.1.2	Previsores de sinal de rádio . . . . .	23
2.2	Planejamento de caminhos . . . . .	24
2.3	Navegação com base na qualidade de comunicação . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Navegação Baseada em Potência do Sinal de Rádio</b>	<b>27</b>
3.1	Propagação do Sinal de Rádio . . . . .	27
3.1.1	Propagação em Espaço Aberto . . . . .	28
3.1.2	Log Distance . . . . .	29
3.2	Mapeamento do Ambiente . . . . .	29
3.3	Mapa da Potência do Sinal de Rádio . . . . .	30
3.3.1	Interpolação . . . . .	31
3.3.2	Estimação . . . . .	32
3.4	Planejador de Caminhos com Base na Potência do Sinal de Rádio . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Implementação do Sistema de Navegação com Base na Potência do Sinal de Rádio</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>Experimentos e Resultados</b>	<b>41</b>
5.1	Mapeamento da Intensidade do Sinal de Rádio . . . . .	42
5.2	Planejador de Caminhos em Ambiente Simulado . . . . .	49
5.3	Sistema de Navegação Simulado . . . . .	51
5.4	Verificação do Mapa e Estratégia de Navegação . . . . .	52
5.5	Sistema de Navegação Autônomo com Base na Potência do Sinal de Rádio . . . . .	55

<b>6 Conclusão</b>	<b>58</b>
6.1 Trabalhos Futuros . . . . .	58
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>60</b>

# 1. Introdução

Os robôs móveis estão cada vez mais presentes nos processos de mineração devido principalmente a dois fatores: aumento da segurança e da produtividade. Estes robôs desempenham um papel importante em diversas áreas dos processos de extração mineral, atuando em minas abertas e subterrâneas. Em ambientes subterrâneos, a utilização de robôs móveis tem como principal objetivo o aumento da segurança dos operadores, retirando-os de áreas perigosas, principalmente devido à sua capacidade de mover e operar em espaços limitados, de difícil acesso para os humanos. Dentre as possíveis operações realizadas por robôs nesses ambientes estão principalmente as de mapeamento, exploração e inspeção (AZPÚRUA **et al.**, 2023).

Porém, um grande desafio de operações em ambientes subterrâneos é a comunicação entre o robô e a base de operação, sendo que nem sempre é possível estruturar a mina para que essa comunicação seja possível ao longo de toda sua extensão. Em tarefas de mapeamento e inspeção, por exemplo, parte das operações são realizadas em locais inexplorados, dinâmicos ou que precisam de supervisão de tempos em tempos, tornando inviável a implementação de um sistema fixo de comunicação dentro desses ambientes. Logo, a comunicação com um robô é um dos aspectos essenciais ao planejar e realizar tarefas de mapeamento e inspeção. Manter uma boa qualidade de sinal entre o robô e a base de operação é essencial para monitorar o dispositivo de inspeção e o ambiente investigado, de forma que o operador pode tomar consciência de qualquer problema e ser capaz de agir antes de colocar o robô em risco, sendo importante avaliar este fator até mesmo para robôs autônomos.

A comunicação entre um robô e a base de operação pode ser realizada principalmente por meio de ondas eletromagnéticas ou por meio de cabos, de forma que cada método possui vantagens e desvantagens. A comunicação por cabo é ideal em locais de fácil acesso, com poucos obstáculos e curvas. Entretanto, conforme a distância entre o robô e a base de comunicação aumenta, a força de arrasto exercida no robô se amplifica, afetando sua mobilidade no ambiente (MARTZ **et al.**, 2020). Já sistemas de comunicação sem fio permitem maior mobilidade com a desvantagem de o sinal sofrer atenuação, seja pelo aumento da distância, interferência de outras fontes ou da propagação no ambiente que se encontra. A atenuação do sinal afeta a interação do operador com o robô, podendo inclusive acarretar a perda total da comunicação.

Considerando os sistemas de comunicação sem fio e a necessidade de manter a melhor conexão possível, essa dissertação propõe um sistema de navegação que aumente a confiabilidade das inspeções, tornando operações sem fio mais seguras. Esse sistema utiliza de um planejador de caminho em conjunto com um algoritmo de mapeamento da potência do sinal de rádio para maximizar a potência total do sinal durante o deslocamento entre dois pontos. Para isso, primeiro é gerado um mapa da potência do sinal de rádio com base em um mapa de ocupação 2D local junto com algoritmos de interpolação e estimação da potência do sinal de rádio. As informações do mapa da potência do sinal de rádio são passadas para um grafo de modo que cada nó é representado por uma célula do mapa de ocupação que possua um valor

da potência do sinal de rádio atribuída a ela. O peso entre os vértices é dado de forma que o movimento para células com menor potência do sinal de rádio apresentam peso maior.

Para o planejamento de caminho, o algoritmo bidirecional de Dijkstra é utilizado de forma a encontrar o caminho em que o robô priorize locais com melhor qualidade do sinal. Os resultados deste planejador de caminhos são comparados com um outro planejador utilizando uma métrica do caminho mais curto.

Dada a posição inicial do robô em um mapa de ocupação conhecido e um ponto de chegada nesse mapa, definido pelo operador ou outra fonte externa, é possível começar a navegação com base na potência do sinal de rádio. Inicialmente, ocorre o primeiro planejamento de caminho dado o mapa da potência do sinal de rádio gerado pela leitura da potência do sinal na posição inicial. À medida que o robô percorre o caminho originalmente planejado, o mapa da potência do sinal de rádio é atualizado utilizando os novos valores da potência do sinal de rádio lidos pelo robô. Então, com esse mapa atualizado, o caminho é replanejado para a posição atual do robô como novo ponto de partida. Este processo se repete até o robô alcançar o ponto de chegada dado na etapa inicial.

A validação do planejamento de caminhos e do sistema de navegação com base na potência do sinal de rádio são realizados por meio de experimentos realizados em simulação e em laboratório. A comparação do planejador em três simulações demonstrou a melhora do valor total, máximo e mínimo da potência do sinal de rádio quando comparado com uma métrica de menor distância. Já a simulação da proposta de navegação com base na potência do sinal de rádio demonstrou a capacidade desse sistema de desviar de uma área com baixa potência do sinal de rádio, melhorando a comunicação entre o robô e a base.

Os experimentos com o robô no laboratório apresentaram resultados próximos aos obtidos pelas simulações dado que a média e os valores mínimo e máximo da potência do sinal de rádio foram semelhantes ao replicar com o robô um dos caminhos simulados. Essa semelhança demonstra a eficiência tanto do planejador de caminhos quanto do mapeamento da potência do sinal de rádio. Para o sistema de navegação, o robô novamente desviou de uma área com baixa potência do sinal de rádio antes de ter que percorrer essa área, demonstrando mais uma vez a eficiência do sistema em melhorar a comunicação.

## **1.1. Motivação**

Devido a necessidade de realizar inspeções em locais de difícil ou nenhum acesso por operadores, o Instituto Tecnológico Vale desenvolveu o EspeleoRobô (AZPURUA *et al.*, 2019), um robô móvel voltado para a inspeção de ambientes confinados como cavidades, dutos e galerias de barragens. Por atuar em diferentes áreas, que possuem demandas diferentes nos dados a serem inspecionados, o EspeleoRobô é construído de forma modular, podendo ser equipado com sensores específicos, a depender do local de inspeção e dos dados a serem analisados. Alguns exemplos englobam a medição de temperatura e umidade, inspeções visuais e mapeamento

tridimensional do local.

Considerando ainda sua modularidade, o EspeleoRobô possui dois modos principais de comunicação (THIAGO FILHO, 2019). O primeiro é por meio de cabo umbilical e de segurança, utilizando duas placas *Fathom-X board*, conectadas por um cabo de 300 metros. O segundo é por meio de comunicação sem fio por ondas de rádio, utilizando dois transmissores *Ubiquiti Rocket M900*, operando em frequências na faixa de 902MHz a 928MHz.

Operações com cabo são normalmente preferíveis pois a chance de perder a comunicação entre o robô e a base existe apenas se o cabo ou base forem danificados. Apesar de trazer mais segurança para a operação, foi observado que diversas operações com o EspeleoRobô apresentam dificuldades quando realizadas com cabo. Dentre estas dificuldades, as principais são: tamanho do cabo, limitando as operações a até aproximadamente 300 metros, como visto na Figura 1.1; força de arrasto, que aumenta gradativamente conforme o robô se locomove para frente, conforme ilustrado na Figura 1.2; possibilidade de ficar preso em algum obstáculo; necessidade de mais dois operadores (além do operador do EspeleoRobô) durante as inspeções.



Figura 1.1: Inspeção utilizando um robô móvel dentro de zona de autossalvamento. Por não ter acesso direto ao emboque/desemboque da galeria, a utilização do cabo limita a distância a ser inspecionada dado que parte de sua extensão é utilizada para chegar com o robô na sua entrada. Fonte: O autor.

A utilização do sinal de rádio como meio de comunicação é recomendada em ocasiões que os problemas citados acima sejam limitadores da operação. Porém, o uso do rádio também possui desvantagens, principalmente em ambientes confinados, conforme ilustrado na Figura 1.3.

A propagação do sinal nestes ambientes se torna complexa graças a permeabilidade e



Figura 1.2: Imagem da câmera do EspeleoRobô durante uma operação de inspeção de uma galeria de barragem. Apesar de possuir 300 metros de cabo, nessa ocasião, o robô não conseguiu andar mais de 160 metros devido a força de arrasto e o atrito do cabo com a parede, destacado pelo retângulo vermelho na imagem. Fonte: O autor



Figura 1.3: Exemplos de ambientes a serem inspecionados pelo EspeleoRobô. Fonte: O autor.

material das paredes, reflexão e refração do sinal. Logo, o robô está sujeito a passar em áreas que o sinal não é o ideal, dificultando/impossibilitando a interação do operador com a plataforma. Outro ponto importante é que caso a comunicação com o robô não esteja ideal, a teleoperação se torna extremamente difícil, com grande *delay* entre comandos e ações do robô, redução da qualidade e atraso nas imagens das câmeras e até mesmo a perda total de comunicação. Esses fatores colocam em risco a integridade física do robô e acarretam a necessidade de uma operação de resgate. Porém, também não há a garantia que o sinal de rádio dentro destes locais permita operações com o robô. Atualmente, quando a operação não pode ser realizada com o cabo, o EspeleoRobô é levado primeiro para realizar o teste de comunicação e, conseqüentemente, analisar se será possível ou não realizar a inspeção. Desta forma, a previsão da potência do sinal de rádio auxiliará na realização desses testes.

Já o sistema de navegação será utilizado de forma que o robô se locomova nos locais com melhor qualidade do sinal de rádio, reduzindo novamente os riscos da operação. Além disto, tal sistema abrirá precedente para a realização de inspeções com múltiplos robôs, dado que o planejador de caminhos pode ser utilizado para que a movimentação destes robôs ocorra de forma a maximizar o sinal entre eles e a base. A operação com múltiplos robôs será ideal para locais em que apenas um rádio ou o cabo não sejam suficientes para a inspeção completa.

## 1.2. Objetivos

Considerando a dificuldade de navegar com um robô móvel em um local sem conhecimento prévio do comportamento do sinal de rádio e que uma comunicação de rádio não ideal abre precedentes para acidentes com o robô e falha na operação, esta dissertação tem como objetivo propor uma nova estratégia de navegação com base na potência do sinal de rádio de forma a minimizar os riscos de operações com rádio. Dado um robô móvel em um mapa local, capaz de se localizar e medir a intensidade do sinal na antena receptora, é proposto que esse robô se movimente da posição atual até um ponto de chegada maximizando a potência do sinal de rádio sem o conhecimento prévio do comportamento do sinal no ambiente. Para isso, os seguintes objetivos específicos podem ser citados:

- Desenvolver um sistema de mapeamento da potência do sinal de rádio;
- Desenvolver método para estimar um mapa inicial da potência do sinal de rádio;
- Calcular um caminho entre dois pontos que maximize a conectividade entre base e robô;
- Atualizar mapa da potência do sinal de rádio e recalcular caminho planejado conforme robô locomove no ambiente até alcançar o ponto de chegada;
- Validação dos algoritmos desenvolvidos em simulação e em laboratório.

### 1.3. Contribuições

A principal contribuição deste projeto é o desenvolvimento de um sistema que aumente a confiabilidade de operações realizadas com o EspeleoRobô utilizando sinal de rádio como meio de comunicação. Desta forma, um conjunto de algoritmos para mapeamento e previsão do sinal de rádio e a implementação de uma nova métrica para o planejador de caminhos do EspeleoRobô foi desenvolvido.

Como resultado, a pesquisa descrita por este documento foi publicada em:

- A. Cid, M. Sathler, M. Delunardo, J. Domingues, H. Azpúrua, G. Pessin, G. Freitas. **“Path planning for ground robots based on radio signal strength”**. In 19th IEEE Latin American Robotics Symposium - LARS 2022, 14th Brazilian Symposium on Robotics - SBR 2022 and 2022 Workshop on Robotics in Education (WRE).
- S. Campos, A. Cid, A. Vangasse, G. Júnior, J. Baião, L. Pimenta, L. Barros, G. Pessin, G. Freitas. **“Navigation Strategy with Multi-Robots in Confined Environments to Improve Radio Signal Coverage”**. In 20th IEEE Latin American Robotics Symposium - LARS 2023, 15th Brazilian Symposium on Robotics - SBR 2023 and 2023 Workshop on Robotics in Education (WRE).

O artigo “Path planning for ground robots based on radio signal strength” foi um dos 15 melhores apresentados no LARS 2022, sendo convidado a ser publicado em versão estendida no *Journal of Intelligent & Robotic Systems (JINT)* e está em processo de revisão até o momento:

- A. Cid, A. Vangasse, S. Campos, M. Delunardo, G. Júnior, N. Thiago, L. Pimenta, J. Domingues, L. Barros, H. Azpúrua, G. Pessin, G. Freitas. **“Wireless Communication Strategies for Robot Operation in Hazardous and Confined Environments: Signal Modeling, Path Planning, and Multi-Robot Approaches”**. In *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Special Issue: Topical Collection on Robotics in South America, 2023.

Este projeto foi desenvolvido no Laboratório de Robótica e Controle (ITVRoC) do Instituto Tecnológico Vale (ITV), em Ouro Preto, dentro do contexto do projeto EspeleoRobô. Desta forma, outras contribuições científicas, técnicas e industriais podem ser citadas:

#### Contribuições científicas:

- F. Rocha, A. Cid, M. Delunardo, R. Junior, N. Thiago, L. Barros, J. Domingues, G. Pessin, G. Freitas, R. Costa **“Body posture controller for Actively Articulated Tracked Vehicles moving over rough and unknown terrains”**. In: 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2023).

- L. Barros, A. Cid, J. Domingues, V. Medeiros, G. Pessin, M. Becker. **“An Adaptable Paw Design for Quadruped Robots Operation in Mining Environments”**. In 20th IEEE Latin American Robotics Symposium - LARS 2023, 15th Brazilian Symposium on Robotics - SBR 2023 and 2023 Workshop on Robotics in Education (WRE).
- G. Júnior, A. Rezende, V. Miranda, H. Azpúrua, A. Cid, N. Neto, L. Barros, G. Pessin, G. Freitas. **“Unidade de Mapeamento e Navegação Autônoma Embarcável em Diferentes Dispositivos Robóticos.”** In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2023, Manaus. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2023.
- M. Sathler; A. Cid; G. Freitas; G. Pessin; H. Azpúrua. **“Localização de Fontes de Gás Usando Aprendizagem por Reforço com Robôs Móveis na Indústria da Mineração.”** In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2021, Online. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2021.

#### **Contribuições técnicas:**

Por estar dentro do contexto de pesquisa do EspeleoRobô, parte da pesquisa desse documento foi utilizada no relatório técnico: *“Primeiro Relatório Parcial do Projeto ‘Localização, Mapeamento e Comunicação em Cavas de Minas e Galerias de Barragens de Grande Extensão’*. Outros relatórios técnicos relacionados ao EspeleoRobô também foram desenvolvidos.

- G. Freitas; G. Cruz; A. Vangasse; G. Gomes; S. Campos; I. Amaral; A. Cid; M. Delunardo; N. Neto; R. Júnior; L. Barros; J. Domingues; G. Pessin. **“Primeiro Relatório Parcial do Projeto ‘Localização, Mapeamento e Comunicação em Cavas de Minas e Galerias de Barragens de Grande Extensão’**. (2023).
- G. Freitas; G. Cruz; I. Amaral; D. Marques; D. Coutinho; G. Pereira; C. Duarte; J. Baião; G. Machado; J. Domingues; L. Barros; A. Cid; A. Filho; M. Delunardo; N. Neto; R. Júnior; M. Oliveira; H. Azpúrua; G. Pessin. **“Relatório técnico final do projeto ‘Dispositivo Robótico de Inspeção de Ambientes Restritos e Confinados.’** (2023).
- G. Freitas; A. Rezende; V. Miranda; G. Cruz; R. Silva; A. Araujo; C. Fany; D. Marques; D. Coutinho; L. Matos; L. Leão; H. Azpúrua; J. Domingues; L. Guilherme Dias; A. Cid; M. Torres; M. Nazário; M. Sathler; P. Alves; R. Teotônio; G. Pessin. **“Quinto relatório técnico de acompanhamento do projeto Dispositivo Robótico de Inspeção de Ambientes Restritos e Confinados.”** (2022).
- G. Freitas; A. Rezende; V. Miranda; G. Cruz; R. Silva; A. Araujo; C. Fany; D. Marques; D. Coutinho; L. Matos; L. Leão; H. Azpúrua; J. Domingues; L. Guilherme Dias; A. Cid; M. Torres; M. Nazário; M. Sathler; P. Alves; R. Teotônio; G. Pessin. **“Quarto relatório técnico de acompanhamento do projeto Dispositivo Robótico de Inspeção de Ambientes Restritos e Confinados.”** (2021).

### **Contribuições Industriais:**

Como contribuição industrial, diversas inspeções foram realizadas com os robôs e dispositivos presentes no laboratório de robótica do Instituto Tecnológico Vale. No total, foram realizadas 40 inspeções (dentre galerias, dutos, bueiros de ferrovia, ambientes industriais e cavernas) em diversos locais. Estas inspeções permitiram notar a importância da comunicação em operações realizadas em ambientes confinados sendo que parte dessas inspeções evidenciaram alguns problemas da utilização do cabo como meio de comunicação:

## **1.4. Estrutura da dissertação**

O restante da dissertação está organizado conforme o descrito a seguir.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre métodos de interpolação do sinal de rádio, planejamento de caminhos, algoritmos de previsão de sinal de rádio e sistemas de navegação baseados no sinal de comunicação.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia a ser utilizada, descrevendo o comportamento do sinal de rádio assim como as possíveis atenuações sofridas e métricas para avaliar a comunicação, os métodos para a geração do mapa da potência do sinal de rádio utilizando um algoritmo de interpolação e outro de estimação do sinal além do princípio do planejador de caminhos e sistema de navegação propostos.

O Capítulo 4 apresenta como foi realizada a implementação dos sistemas propostos no Capítulo 3.

O Capítulo 5 começa apresentando o processo de mapeamento do ambiente com um robô móvel. Em seguida duas simulações são apresentadas com foco no planejador de caminhos com base na potência do sinal de rádio e o sistema de navegação proposto. Por fim, são realizados alguns experimentos com o robô para validar os dados obtidos das simulações.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros, apresentando as propostas da continuação desta dissertação, com foco na exploração de ambientes confinados com múltiplos robôs e melhorias do sistema atual.

## 2. Trabalhos Relacionados

Este Capítulo apresenta inicialmente uma revisão bibliográfica da representação de uma mapa da potência do sinal de rádio utilizando um mapa de calor, assim como a geração desse mapa por meio de algoritmos de interpolação e estimação da potência do sinal. Em seguida, são apresentados alguns planejadores de caminhos que podem ser utilizados no mapa da potência do sinal de rádio para encontrar um caminho que maximize a conexão entre base e robô móvel. Por fim, diferentes sistemas de navegação com base no sinal de comunicação são apresentados.

### 2.1. Mapeamento da intensidade do sinal do rádio

O mapeamento do sinal de rádio tem como objetivo principal representar como os valores da potência do sinal estão distribuídos em um ambiente. Essa potência pode ser utilizando tanto para auxiliar na localização do robô (BISWAS e VELOSO, 2010), (EVENNOU e MARX, 2006), quanto uma forma de parâmetro para planejar a movimentação de um conjunto de robôs (LI *et al.*, 2008).

Parte dos mapas utilizados para quantificar o sinal de rádio são representados por mapas de calor (*heatmaps*). Esses são mapas geométricos onde as posições estão associadas a um valor de potência do sinal de rádio, representado por uma cor, em relação à antena da base do sistema de comunicação. Seu uso se dá principalmente por facilitar a visualização das informações no mapa.

Desta forma, a maneira mais simples de gerar um mapa dos sinais de rádio é a leitura manual destes. A antena da base é posicionada em um local fixo e, em seguida, o robô é movimentado por todo ambiente de forma a coletar o sinal de rádio em pequenos intervalos de distância. Entretanto, este método é bastante demorado, especialmente para ambientes de média e larga escala. Além disso, qualquer mudança no ambiente ou na posição da antena tornará necessário coletar novos dados e construir um novo mapa, tornando-o impraticável na maioria dos casos. Devido a este problema, algumas abordagens têm sido criadas visando reduzir o tempo de coleta de dados e facilitar a construção do mapa de sinais de rádio.

#### 2.1.1. Interpoladores

Uma abordagem para facilitar a geração do mapa da potência do sinal de rádio é a interpolação do dados, onde alguns pontos são coletados em locais diferentes, e então um algoritmo de interpolação é utilizado para “preencher” o espaço vazio entre os pontos lidos. Portanto, métodos de interpolação de dados esparsos são comumente usados para criar um mapa contínuo, como a função base (RBF) (KRUMM e PLATT, 2003) e Kriging (ZHAO *et al.*, 2016). Outra alternativa é utilizar algoritmos mais simples, permitindo que o mapa de rádio seja gerado durante a exploração. Um desses métodos é o inverso do quadrado da distância (IDW), que usa o valor médio ponderado entre os pontos para preencher o mapa (BI *et al.*, 2018).

Outras funções comumente utilizadas são a interpolação com a triangulação Delaunay (ALONAZI *et al.*, 2017), (TALVITIE *et al.*, 2015)). Este método consiste em gerar uma envoltória convexa (*convex hull*) com os pontos de sinal de rádio coletados e depois triangular estes pontos para que nenhum esteja contido no círculo formado por qualquer triângulo. Após a triangulação, alguns métodos podem ser usados para interpolar os dados de rádio, tais como interpolação linear, cúbica ou de vizinho mais próxima Getreuer (2011).

### 2.1.2. Previsores de sinal de rádio

Apesar de apresentarem bons resultados para o mapeamento do sinal de rádio, algoritmos de interpolação tem uma grande desvantagem quando relacionada com exploração: a necessidade de coletar vários pontos para que o resultado da interpolação seja mais próxima do real. Deste modo, em operações de inspeção, mapeamento e exploração, é necessário que o robô meça o sinal de rádio no ambiente em que vai atuar para logo em seguida levantar o mapa, o que pode tornar esse processo inviável.

Previsores mais simples funcionam com base na fórmula de Friis (SHAW, 2013). Esta tem como fim encontrar a potência do sinal (em decibéis) que o receptor terá, dado a potência do transmissor, o ganho e a distância das antenas utilizadas. Ela descreve uma boa aproximação para a propagação em ambiente abertos e com visada direta, porém, para ambientes fechados, o seu uso se torna mais complexo pois há outras variáveis que atuarão diretamente no sinal do receptor como o multipercurso, difração, dispersão, absorção e interferência. Extensões da fórmula de Friis também podem ser utilizadas, principalmente as equações voltadas para a atenuação do sinal (PHILLIPS *et al.*, 2013). Um exemplo é a fórmula de atenuação logarítmica *Log-Normal Shadowing Model* (LNSM) que, diferente da fórmula de potência do sinal, não leva em consideração os dados das antenas diretamente mas sim a potência do sinal em um local conhecido e também o sombreamento do sinal.

Outro modo que pode ser utilizado como previsor de sinal é a extrapolação (KATAGIRI *et al.*, 2022). Este método se aplica após a realização da interpolação, isto pois parte dos algoritmos de interpolação são realizados dentro da envoltória convexa dos dados lidos, que representa o menor conjunto convexo que contenha todos os pontos a serem interpolados. Logo, utilizando a extrapolação, é possível estender a envoltória convexa, aumentando o alcance do mapa interpolado a ser gerado, porém, tendo como maior desvantagem a propagação de erro ao longo da extrapolação.

Softwares especializados também são utilizados, como o *Wireless InSite* (REMCOM, 2023), um software proprietário que se baseia em modelos de propagação de ondas (*Ray-Tracing*) para calcular o sinal em diversos pontos, dado uma representação 3D do local. Além da prever o comportamento das ondas no ambiente, o *Wireless InSite* também considera variáveis como a difração, multicaminho, reflexão e absorção para sinais com até 100GHz de frequência.

Pela necessidade de utilizar o algoritmo de previsão de sinal em robôs com o foco princi-

pal em exploração, é preciso de um algoritmo que consiga calcular em tempo hábil a propagação do sinal sem a necessidade de um mapa pronto do ambiente. Logo, há alternativas que utilizam mais de um método para cumprir estes requisitos. Uma delas é a fusão utilizando um filtro de Kalman discreto dos dados da fórmula de atenuação logarítmica e de um variograma espacial, contendo a média da atenuação de sinais (PARASURAMAN et al., 2022).

Outro modelo, chamado PropEM-L (CLARK et al., 2022), propõe a utilização de um sistema que considera os dados 3D fornecidos por um sensor, levando em consideração as possíveis atenuações do sinal e modelos de propagação do mesmo e calculando a intensidade do sinal de maneira adaptativa a novos ambientes por meio de aprendizado de máquina.

## 2.2. Planejamento de caminhos

Dado um mapa e uma representação da qualidade do sinal de rádio neste mapa, a modelagem baseada em grafos pode ser feita para estimar a melhor rota entre dois pontos específicos. Existem vários algoritmos para estimar os caminhos ideais entre dois pontos em um grafo, como busca em profundidade (TRÉMAUX, 2010), busca por largura (GIESBRECHT, 2004), A\* (HART et al., 1968), Dijkstra (DIJKSTRA, 1959), Dijkstra bidirecional (NICHOLSON, 1966) e D\* (STENTZ, 1994), que possuem vantagens e desvantagens. Santos (2019) apresenta um estudo contendo a comparação desses métodos com o foco na robótica móvel assim como exemplos de robôs que os utilizam.

A\*, Dijkstra bidirecional e Dijkstra são amplamente utilizadas como planejadores de caminhos para robôs móveis. A\* usa uma heurística para escolher o caminho ideal e pode ser descrito pela equação:  $f(n) = g(n) + h(n)$ , onde  $g(n)$  é o custo para mover da posição inicial para a posição atual e  $h(n)$  é a heurística que estima o custo para mover da posição atual para a posição final. A diferença entre o algoritmo de Dijkstra e A\* é que  $h(n) = 0$ , ou seja,  $g(n)$  é igual a  $f(n)$  e, portanto, não utiliza nenhuma heurística, mas expande o caminho até que o ponto final seja encontrado.

Outra diferença é que A\* só garante uma solução ótima se o  $h(n)$  heurístico for admissível. O Dijkstra bidirecional é uma adaptação do algoritmo do Dijkstra e é mais eficiente porque realiza a busca em ambas as direções ao invés de apenas expandir o caminho do ponto inicial para o ponto final Goldberg e Harrelson (2004).

## 2.3. Navegação com base na qualidade de comunicação

A qualidade do sinal de rádio utilizada para sistemas de navegação robótica já é utilizada, porém com grande foco na localização do robô (BISWAS e VELOSO, 2010); (EVENNOU e MARX, 2006).

Além da localização, a qualidade do sinal também pode ser utilizada em situações com múltiplos pontos de acesso, onde o robô decidirá a direção de navegação conforme quais destes

pontos estão mais próximos (BATALIN *et al.*, 2004) ou como forma de controle para otimização do sinal. Li *et al.* (2008) utilizam da intensidade do sinal de comunicação para realizar uma estratégia de controle para múltiplos robôs de forma que estes se reorganizem visando uma maior intensidade do sinal de comunicação.

Suh e Oh (2012) tratam o problema de planejamento de caminhos de maneira mais genérica. Eles utilizam do algoritmo *Rapidly-exploring Random Tree* (RRT) (LAVALLE *et al.*, 1998) em conjunto com o método de entropia cruzada (BOTTEV *et al.*, 2013) com o intuito de planejar um caminho para um robô móvel dado métricas como temperatura, umidade ou intensidade do sinal. Para realizar o planejamento, basta utilizar um mapa de custo da métrica escolhida para que o planejador encontre um caminho com o custo mínimo, conforme Figura 2.1.

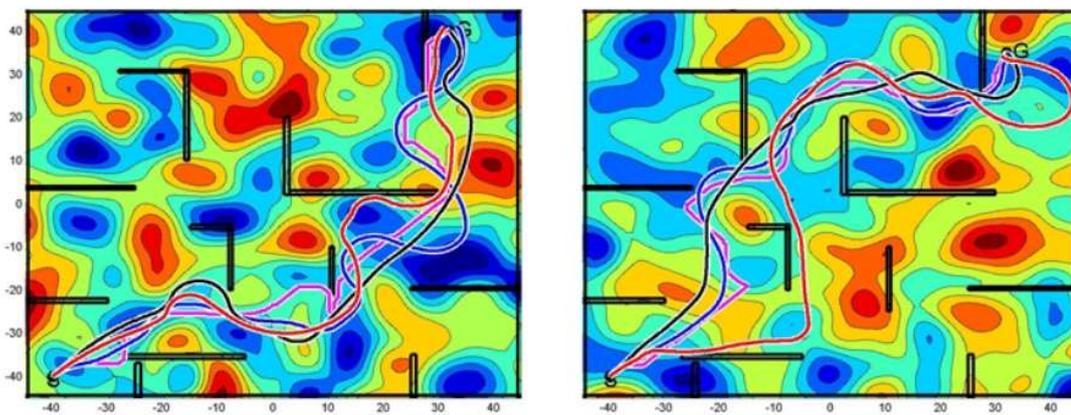


Figura 2.1: Mapa de custo utilizado para teste de eficiência do algoritmo proposto por Suh e Oh (2012), onde a métrica desenvolvida é apresentada pelo caminho azul. O caminho rosa foi calculado com o algoritmo A\* e os caminhos vermelho e preto por meio de adaptações do algoritmo RRT. Fonte: Suh e Oh (2012).

Considerando ainda a qualidade de comunicação como métrica de navegação, Yang *et al.* (2019) propuseram a utilização de um planejador de caminhos para veículos aéreos não tripulados de forma que este caminho priorize locais com melhor sinal de comunicação. Para isto, um grafo foi implementado para representar o ambiente e duas métricas foram utilizadas sendo uma a porcentagem das unidades da rede que exibem locais sem cobertura aérea (COR) e a outra a duração da interrupção da conectividade (COD). É considerado também que estes veículos possam se movimentar apenas em oito direções diferentes no plano x, y. Para o planejador de caminhos, uma adaptação do algoritmo A\* foi utilizada. O resultado pode ser visto na Figura 2.2.

Já Xie *et al.* (2021) implementaram um algoritmo de aprendizado por reforço para realizar o planejamento de caminhos em três dimensões para um veículo aéreo não tripulado. Este veículo é utilizado como o agente da rede e tem disponível um mapa contendo a probabilidade de cobertura do sinal de cada local.

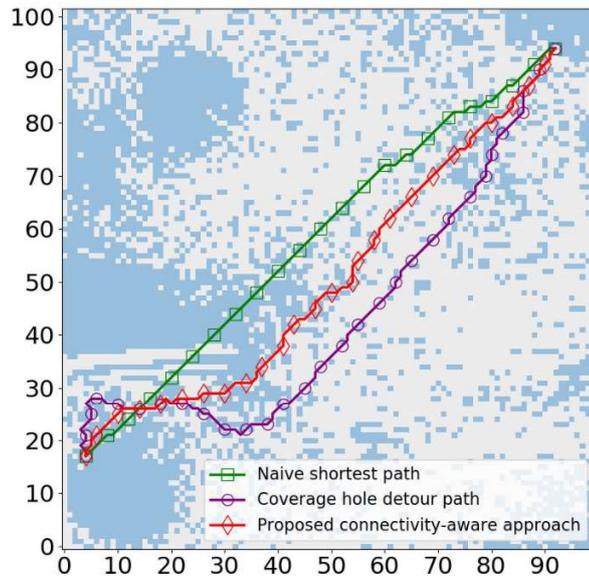


Figura 2.2: Resultado de planejador de caminho proposto por Yang **et al.** (2019) para navegação de veículos aéreos não tripulados minimizando a falta de comunicação. Fonte: Yang **et al.** (2019)

Muralidharan e Mostofi (2021) realizam o planejamento de um ou mais robôs com base na comunicação de forma que o robô se locomova o mínimo até estabelecer a comunicação com a base. Para isso, eles começam com a modelagem e estimação da potência do sinal de rádio para os locais não visitado pelo robô. Em seguida, é utilizado um grafo para representar o ambiente em duas dimensões. Esse grafo contém as informações de distância entre um célula e outra assim como um valor de 0 a 1 que representa a probabilidade da célula possuir conectividade ou não. A Figura 2.3 mostra o grafo e o planejamento de caminhos utilizado para buscar a conexão.

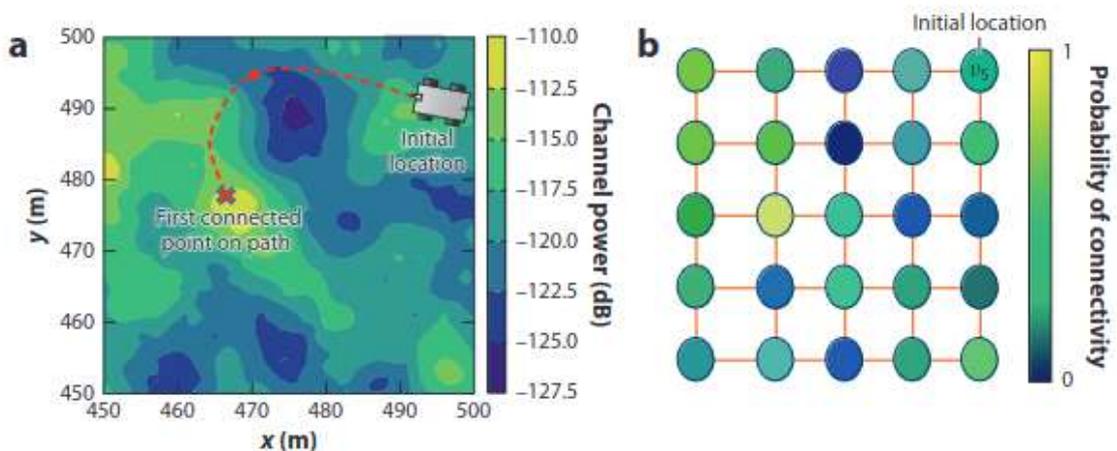


Figura 2.3: Planejamento de caminhos proposto por Muralidharan e Mostofi (2021) em um grafo visando a menor distância para realizar a conexão entre robô e base. Fonte: Muralidharan e Mostofi (2021).

### 3. Navegação Baseada em Potência do Sinal de Rádio

Este Capítulo descreve o processo necessário para o desenvolvimento de um sistema de navegação com base na potência do sinal de rádio. Na Seção 3.1 são apresentadas algumas fórmulas que podem ser utilizadas para prever a potência do sinal de rádio. Na Seção 3.2 é apresentada a técnica de mapeamento empregada para gerar o mapa do ambiente. A Seção 3.3 descreve os métodos utilizados para representar a potência do sinal de rádio por meio de um mapa de calor, com foco na interpolação e estimação da potência do sinal. Em seguida, a Seção 3.4 descreve como o mapa da potência do sinal de rádio pode ser representado por um grafo, que serve de base para a utilização de um planejador de caminhos que vise a maximização da potência do sinal de rádio total entre o deslocamento entre dois pontos. A Capítulo 4 apresenta o sistema de navegação proposto por essa dissertação que utiliza do mapeamento da potência do sinal de rádio em conjunto com o planejador para realizar a navegação em um ambiente com o mapa de ocupação conhecido e sem o mapa da potência do sinal de rádio. Por fim, é apresentada a implementação dos processos descritos acima no EspeleoRobô.

#### 3.1. Propagação do Sinal de Rádio

Determinar a qualidade de um sistema de comunicação sem fio é fundamental para garantir o sucesso de operações de exploração, mapeamento e inspeção com robôs móveis em ambientes perigosos. Diversas métricas podem ser utilizadas para qualificar sistemas de comunicação sem fio, como: RSS (*Received Signal Strength*), RSSI (*Received Signal Strength Indication*), SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*), PDR (*Packet-Delivery Ratio*) e BER (*Bit-Error Rate*) (VLAVIANOS *et al.*, 2008), (SILVA *et al.*, 2015).

As métricas associadas à transferência de dados representam bem a qualidade de um sistema de comunicação, porém não possuem maneira explícita de serem estimada, sendo necessário medir a taxa de dados durante a comunicação. Outro ponto importante é que dois modos podem ser utilizados para representar a qualidade do sinal: qualitativo e quantitativo. Já o RSSI representa a qualidade de um sistema de comunicação por meio de uma escala sem unidades, que pode variar de fabricante para fabricante. Esse valor normalmente leva em consideração a potência do sinal de chegada no receptor e possíveis interferências que esse sinal pode sofrer, tornando difícil a replicação e estimação desse valor.

Visando a utilização de uma métrica que seja representativa e que possua a capacidade de ser estimada, é proposto trabalhar com a potência do sinal de rádio. Essa grandeza é dada em dB (Decibéis), e representada por dBm (Decibéis por milliwatt) que corresponde à potência em decibéis do sinal em referência a 1 miliwatt. Essa métrica representa o valor da potência do sinal que chegará ao receptor de um sistema de comunicação dada as diferentes atenuações que o sinal pode sofrer durante o percurso do transmissor ao receptor. A atenuação do sinal de rádio pode ser dividida em atenuação de larga escala e de pequena escala. Ambos os meios

são utilizados para estimar a potência do sinal recebido, em decibéis (dB), em um sistema contendo um transmissor e um receptor. A atenuação em larga escala é utilizada para o cálculo da potência recebida quando a distância entre o receptor e o transmissor é maior que a distância de Fraunhofer ( $d_f$ ), que pode ser calculada pela Equação 3.1, onde  $D$  é o tamanho da maior dimensão da antena transmissora e  $\lambda$  o comprimento de onda utilizado, que pode ser calculado pela Equação 3.2 utilizando a velocidade da luz  $c$  e a frequência  $f$  de transmissão da onda.

$$d_f = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (3.2)$$

### 3.1.1. Propagação em Espaço Aberto

O caso mais simples da propagação de uma onda eletromagnética é a propagação em um ambiente sem obstruções ou obstáculos e com visada direta entre o transmissor e o receptor. Para casos assim, a equação de Friis é utilizada, conforme Equação 3.3 (SHAW, 2013), e permite calcular a potência  $P_r$  recebida por um receptor dada a velocidade da luz  $c$ , a potência do sinal de saída  $P_t$ , a frequência do sinal  $f$  ou o comprimento de onda  $\lambda$ , os ganhos de cada antena e a distância entre elas ( $G_t, G_r$  e  $d$ , respectivamente) e perdas não relacionadas a propagação  $L$ .

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi \cdot d)^2 \cdot L}. \quad (3.3)$$

A equação de Friis explicita alguns pontos importantes da propagação do sinal de rádio dado que a potência do sinal no receptor diminui conforme o quadrado da distância de separação entre transmissor e receptor. Também fica claro que os ganhos das antenas e a frequência do sinal transmitido afetam diretamente na potência recebida. Já a atenuação do sinal, dada por  $PL$  em decibéis, pode ser calculada utilizando Equação 3.4.

$$PL = 10 \log \frac{P_t}{P_r}. \quad (3.4)$$

Essas equações podem ser adaptadas para expressar o valor da potência do sinal de rádio em dBm ( $P_r(dBM)$ ). Dessa forma, a forma alternativa para a equação de Friis, considerando a escala logarítmica, pode ser vista na Equação 3.5.

$$P_r(dbm) = P_t(dbm) + G_t + G_r - PL(dbm). \quad (3.5)$$

### 3.1.2. Log Distance

Outras equações podem ser utilizadas para calcular a atenuação da potência do sinal de rádio, dado que a equação de Friis é utilizada apenas para ambientes com visada direta e sem obstáculos. Uma delas é a *Log Distance Path Loss* (RAPPAPORT, 2002). Essa equação (Equação 3.6) associa a atenuação do sinal de rádio  $PL_L$  ao logaritmo da distância. Logo, dado uma atenuação conhecida  $PL_{d_0}$ , em uma distância  $d_0$  também conhecida, é possível calcular a atenuação do sinal de um ponto com distância  $d$  da antena transmissora considerando um fator  $n$ , que representa uma constante de propagação para cada ambiente em específico, como o interior de prédios, com ou sem visada direta, fábricas, ambientes subterrâneo e etc. Esse fator  $n$  pode ser calculado por meio da minimização do erro médio quadrático (MSE) da potência do sinal, de forma que várias medidas dessa potência são coletadas em um ambiente e, em seguida, o valor de  $n$  é variado entre 1 e 4 com um passo de amostragem de 0,01. O  $n$  que possuir o menor MSE é escolhido como o valor da constante de propagação do ambiente.

$$PL_L = PL_{d_0} + 10n \log \frac{d}{d_0}. \quad (3.6)$$

Logo, substituindo na Equação 3.5, a potência do sinal de um ponto a uma distância  $d$  pode ser dado pela Equação 3.7.

$$P_r(\text{dbm}) = P_t(\text{dbm}) + G_t + G_r + PL_{d_0} + 10n \log \frac{d}{d_0}. \quad (3.7)$$

## 3.2. Mapeamento do Ambiente

O mapeamento do ambiente é feito utilizando um mapa de ocupação (THRUN, 2003), que consiste em um *grid* representando o plano  $(X, Y)$ , onde cada célula tem a probabilidade de ser um obstáculo, um local livre, ou ter seu estado desconhecido, de forma que o tamanho dessas células representam a resolução do mapa. Logo, o mapa de ocupação pode ser representado por uma matriz bidimensional contendo  $H_n$  linhas e  $W_n$  colunas de forma que é possível relacionar cada célula a uma posição no plano  $(X, Y)$  dada a posição  $(H_i, W_j)$  da célula na matriz, a resolução do mapa  $M_R$ , em metros, e a localização da origem  $(X_o, Y_o)$ , conforme Equação 3.8 e Figura 3.1.

$$\begin{aligned} X &= X_o + (W_j \cdot M_R), \\ Y &= Y_o + (H_i \cdot M_R). \end{aligned} \quad (3.8)$$

A mesma equação pode ser adaptada para encontrar qual célula, de coordenadas  $H_i, W_j$ , do mapa de ocupação corresponde à posição  $X, Y$  do ambiente, conforme Equação 3.9

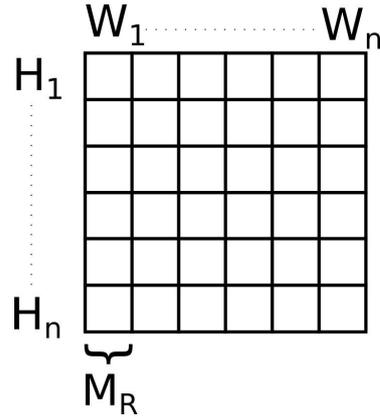


Figura 3.1: Representação de um mapa de ocupação. Fonte: O autor.

$$\begin{aligned}
 W_j &= (X - X_o)/M_R, \\
 H_i &= (Y - Y_o)/M_R.
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Além da matriz bidimensional, também é possível representar a posição de cada célula do mapa de ocupação por meio de um valor único de identificação  $Id$ , dado pela Equação 3.10.

$$Id = (W_n \cdot H_i) + W_j.
 \tag{3.10}$$

### 3.3. Mapa da Potência do Sinal de Rádio

Dentre as diferentes métricas para avaliar o sinal de rádio apresentadas na Seção 3.1, a potência do sinal é ideal por estar diretamente relacionada com o comportamento da comunicação. Essa potência pode ser representada por meio de um mapa de calor, onde cada ponto é representado pela combinação de três cores (vermelho, azul e verde), para melhor visualização do comportamento do sinal no ambiente.

Dado um valor da potência do sinal  $P_{dBm}$ , primeiro é necessário normaliza-lo para um valor  $P_{rgb}$  entre 0 e 1. Essa normalização ocorre conforme Equação 3.11, considerando o valor ideal da potência do sinal de rádio  $dBm_{max}$  e o valor mínimo aceitável  $dBm_{min}$  para que ocorra a comunicação com o robô.

$$P_{rgb} = (P_{dBm} - dBm_{min}) \cdot \frac{1}{(dBm_{max} - dBm_{min})},
 \tag{3.11}$$

O valor de cada faixa de cor é calculado utilizando as Equações 3.12 a 3.14 de forma que a cor vermelha representa maiores valores da potência do sinal de rádio e a cor azul menores valores.

$$Vermelho = P_{rgb},
 \tag{3.12}$$

$$Verde = 0.8 \cdot (1 - 2 \cdot |P_{rgb} - 0.5|), \quad (3.13)$$

$$Azul = 1 - P_{rgb}. \quad (3.14)$$

Considerando ainda os modos de mapeamento citados em Seção 2.1, é proposta a utilização de dois métodos para a construção do mapa da potência do sinal de rádio: interpolação e previsão. Esse mapa é construído a partir de todas as células livres do mapa de ocupação que possuam um valor de potência do sinal associado a elas, sendo que este valor pode ter origem de três fontes diferentes: medição do sinal no local, por processo de interpolação ou por estimativa. Desta forma, esta mesma ordem de prioridade para a atribuição da potência à cada célula é mantida.

A medição do sinal é realizada a uma frequência constante de forma que cada novo valor é atribuído à célula do mapa de ocupação que o robô estava no momento da leitura.

### 3.3.1. Interpolação

A interpolação é utilizada para preencher todas as células livres dentro da envoltória convexa gerada por todos os pontos medidos pelo robô. O método utilizado para a interpolação é o proposto por Talvitie **et al.** (2015) onde o valor da potência do sinal  $P_{dBm}$  de um ponto arbitrário  $(X, Y)$  é dado pela Equação 3.15 considerando cada triângulo gerado pela , com pontos  $(X_1, Y_1, P_1)$ ,  $(X_2, Y_2, P_2)$ ,  $(X_3, Y_3, P_3)$ , dentro da envoltória convexa gerada pelas potências medidas pelo robô. Para esse processo, é necessário haver ao menos quatro valores de potência do sinal de rádio medidos, sendo que esses não podem ser co-lineares. Esse processo é repetido para todas as células do mapa de ocupação que estão dentro da envoltória convexa e que não possuam valor da potência do sinal de rádio. O processo de interpolação pode ser visto na Figura 3.2 .

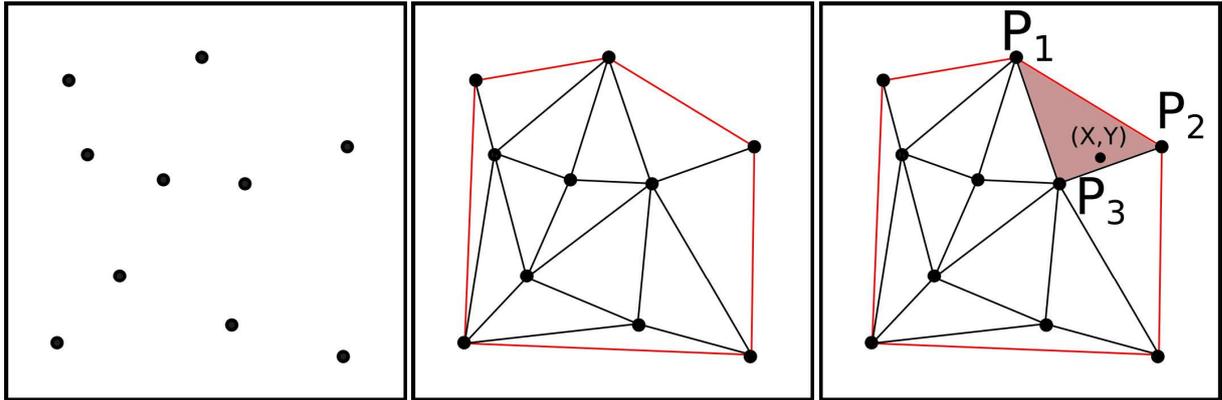
$$P_{dBm} = \lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2 + \lambda_3 P_3, \quad (3.15)$$

onde  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  correspondem às coordenadas baricêntricas do triângulo computado, conforme Eq. 3.16 a 3.18.

$$\lambda_1 = \frac{(Y_2 - Y_3)(X - X_3) + (X_3 - X_2)(Y - Y_3)}{(Y_2 - Y_3)(X_1 - X_3) + (X_3 - X_2)(Y_1 - Y_3)}, \quad (3.16)$$

$$\lambda_2 = \frac{(Y_3 - Y_1)(X - X_3) + (X_1 - X_3)(Y - Y_3)}{(Y_2 - Y_3)(X_1 - X_3) + (X_3 - X_2)(Y_1 - Y_3)}, \quad (3.17)$$

$$\lambda_3 = 1 - \lambda_1 - \lambda_2. \quad (3.18)$$



(a) Conjunto de valores medidos da potência do sinal de rádio. (b) Triangulação dos pontos e envoltória convexa em vermelho. (c) Cálculo da potência do sinal de rádio de um ponto  $(X, Y)$  dentro da envoltória convexa.

Figura 3.2: Processo de interpolação de dados utilizado para atribuir valor da potência do sinal de rádio para células livres do mapa de ocupação. Fonte: O autor.

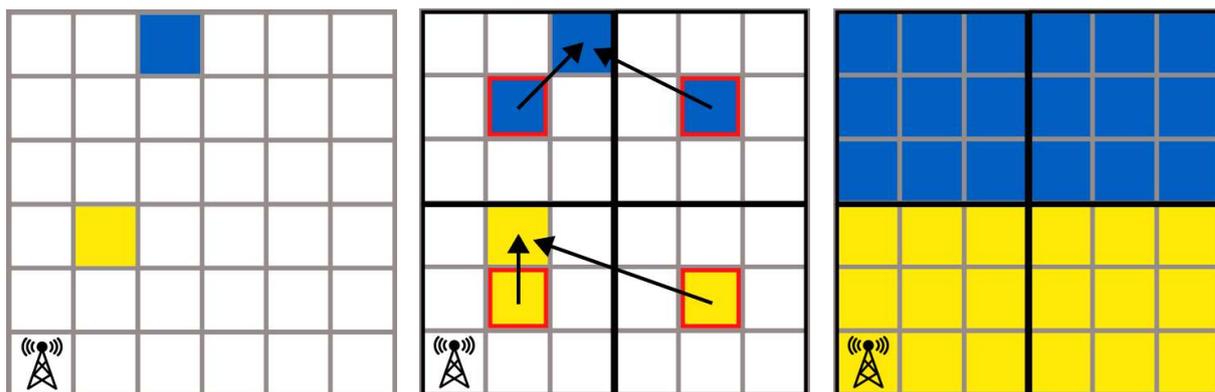
### 3.3.2. Estimação

O processo de predição é utilizado para eliminar a necessidade de o robô percorrer todo o mapa para coletar os dados primeiro. Isso por que há momentos que o robô perde completamente a comunicação quando a potência fica abaixo de um certo limiar, de modo que é arriscado percorrer essas zonas para criar o mapa da potência do sinal de rádio. Conforme descrito na Seção 3.1, diversas equações podem ser utilizadas para realizar a predição do sinal. Desta forma, é proposto utilizar a Equação 3.6 que considera a atenuação do sinal tomando como base um sinal de referência. O  $n$  utilizado foi de 3.

Logo, a implementação mais simples consiste em realizar a primeira medida e estimar o sinal por todas as células livres do mapa de ocupação, em seguida, para cada novo valor de potência do sinal de rádio medido pelo robô, o valor de referência utilizado pela equação seria mudado. Para isso, é necessário calcular a distância entre a célula que tem o valor de potência do sinal de rádio de referência e todas as outras, utilizando a fórmula de distância entre dois pontos  $(X_1, Y_1)$  e  $(X_2, Y_2)$ , conforme Equação 3.19.

$$d = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}. \quad (3.19)$$

Porém novas leituras da potência do sinal de rádio são realizadas conforme o robô se locomove e esses novos valores podem ter sofrido atenuação por outros fatores que não são considerados na Equação 3.6, como a presença de equipamentos que geram interferência, material do ambiente ao redor, visada direta, entre outros. Outro fator importante a ser considerado é que caso a resolução do mapa de ocupação seja pequena, o valor da potência estimada variará pouco em comparação com a vizinhança. Logo, é proposto estimar a potência do sinal de rádio considerando áreas maiores além de identificar a leitura realizada pelo robô mais próxima dessa área.



(a) Valores medidos da potência do sinal de rádio. (b) Criação de um novo *grid* e seleção das células com valor da potência do sinal de rádio mais próximos. (c) Cálculo do valor estimado e atribuição para as outras células dentro do novo *grid*.

Figura 3.3: Metodologia utilizada para realizar a predição da potência do sinal de rádio em um mapa de ocupação. É calculado qual dos pontos é o mais próximo do ponto central do *grid*. O ponto mais próximo, assim como a distância desse ponto para a antena, são utilizados como referência para o cálculo da potência do sinal de rádio do *grid*. Fonte: O autor.

O processo para a criação do mapa da potência do sinal de rádio por meio da estimação é ilustrado na Figura 3.3 e começa com a divisão do mapa de ocupação em um novo *grid* maior. O tamanho desse *grid* é definido de forma que não seja necessário realizar o cálculo da estimação a cada intervalo curto de distância, dado que haverá pouca mudança do valor calculado de uma célula para outra e quanto mais pontos, maior o custo computacional. Porém, ele também não pode ser muito grande por ter o risco de não representar bem a potência do sinal de rádio de todas as células dentro dele.

Em seguida, dado o conjunto  $P_n$ , que representa todos os pontos de potência do sinal de rádio lidos pelo robô, e o conjunto  $S_n$ , formado pelos pontos centrais de cada nova área, é calculado qual dos pontos de  $P_n$  é o mais próximo do centro de cada área delimitada anteriormente, e conseqüentemente, será utilizado como ponto de referência.

O valor da atenuação da potência do sinal do ponto de referência é calculado utilizando a Equação 3.5 dado a potência do transmissor e os ganhos das antenas da base de operação e do robô. Em seguida, o valor encontrado é utilizado na Equação 3.7 para encontrar o valor da potência do sinal no ponto central do *grid* dado a distância  $d_{0n}$  entre antena e ponto  $P_n$  de referência e a distância  $d$  entre o centro do *grid* e a antena. Por fim, todas as células livres do mapa de ocupação que estão dentro desse novo *grid* recebem o valor dessa estimação. O processo de estimação do valor de rádio pode ser observado na Figura 3.3 e no Algoritmo 1.

---

**Algorithm 1:** Algoritmo de criação do mapa da potência do rádio por meio da estimação da potência do sinal.

---

```

1 Pn: Pontos do mapa com potência do sinal de rádio medidos pelo robô;
2 Sn: Pontos centrais de cada célula do novo grid;
3 Map: Células do mapa de ocupação;
4 Pref: Ponto de referência;
5 Aref: Atenuação da potência do ponto de referência;
6 Pgrid: Potência do ponto central do novo grid;
7 Divide_mapa_em_novo_grid();
8 foreach Ponto_central ∈ Novo_Grid do
9   | Pref = Pega_ponto_mais_próximo(Pn);
10  | Aref = Calcula_Atenuação(Pref);
11  | Pgrid = Calcula_Potencia(Aref);
12  | foreach Celula_do_Novo_Grid do
13  |   | Celulas_livres ∈ Map ← Pgrid
14  |   end
15 end

```

---

### 3.4. Planejador de Caminhos com Base na Potência do Sinal de Rádio

Tanto o mapa da potência do sinal de rádio quanto o mapa de ocupação podem ser representados por um grafo de forma que dada a equação do grafo  $G = (V, E)$ , onde  $V$  representa o conjunto de vértices ou nós, e  $E$  as arestas do grafo, é possível associar cada célula a um nó. Para o mapa de ocupação, os nós serão representado pelas células livres. Já para o mapa da potência do sinal de rádio, os nós serão representados pelas células que tenham um valor de potência do sinal atribuído a elas. As arestas são atribuídas ligando dois nós com um peso específico, de acordo com a métrica escolhida.

Suponha que a métrica utilizada seja a distância mais curta. Se o nó adjacente  $N$  for vertical ou horizontal ( $L$ ), então o peso  $W_s$  é igual ao valor da resolução do mapa de ocupação  $M_R$ . Se o nó vizinho  $N$  for diagonal ( $D$ ), é então o peso  $W_s$  é computado como a resolução do mapa de ocupação multiplicado por  $\sqrt{2}$ , como visto na Equação 3.20.

$$W_s = \begin{cases} M_R, & N = L \\ M_R * \sqrt{2}, & N = D \end{cases} \quad (3.20)$$

Logo, a função de custo  $C_s$  de um caminho  $\tau$ , contendo os pontos  $(x_{inicial}, \dots, x_i, \dots, x_{final})$  pode ser descrita pela soma dos custos  $W_s$ , como na Equação 3.21. O caminho escolhido é aquele que tem o valor mínimo do custo total.

$$C_s(\tau) = \sum_{x \in \tau} W_s(x). \quad (3.21)$$

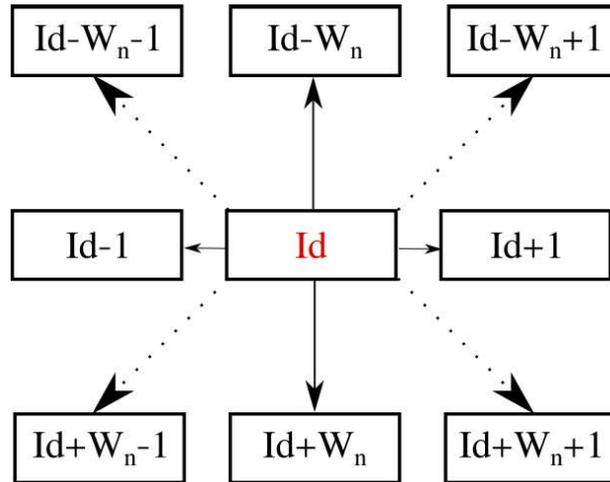


Figura 3.4: Atribuição de vizinhos com base na identificação de um nó. Fonte: O autor.

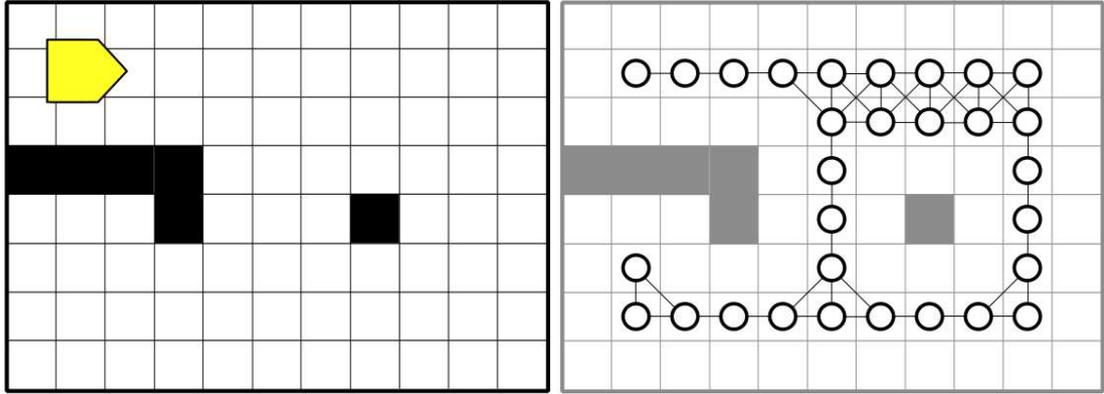
Como a métrica proposta é a potência do sinal de rádio, os pesos das arestas serão diferentes. O peso entre nós é dado pela diferença entre um valor de referência, representado por  $dBm_{max}$ , e o valor do sinal do nó vizinho, representado por  $dBm_N$ . Também é utilizado um fator de potência  $P$  na equação de peso, que permite priorizar mais ou menos a diferença entre os sinais. Deste modo, quanto maior o valor de  $P$ , maior será o peso para passar para um nó com baixa potência de sinal.

A fórmula que descreve o peso entre cada nó pode ser vista na Equação 3.22, onde  $W_r$  é computado de acordo com o nó adjacente  $N$  sendo vertical/horizontal ( $L$ ) ou diagonal ( $D$ ). Assim como na métrica de distância mais curta, os pesos entre os nós diagonais também serão multiplicados por  $\sqrt{2}$ , priorizando movimentos verticais e horizontais e realizando o desempate com base na distância a ser percorrida. Entretanto, é essencial observar que ao utilizar a métrica descrita na Equação 3.22, o peso da aresta entre dois nós não será o mesmo sempre. Suponha dois nós vizinhos de potência de sinal de rádio diferente, o peso para mover-se do nó com potência inferior para o superior será diferente se o movimento estiver na direção oposta. Assim, é utilizado um grafo direcional, que permite diferenciar o custo da aresta dependendo da direção do movimento.

$$W_r = \begin{cases} (dBm_{max} - dBm_N)^P, & N = L \\ ((dBm_{max} - dBm_N) * \sqrt{2})^P, & N = D \end{cases} \quad (3.22)$$

A seleção de nós vizinhos é realizada de forma que cada nó possui uma identificação única relacionada a sua posição no mapa de ocupação, conforme Equação 3.10. Logo, dado uma célula de identificação  $Id$ , seus vizinhos serão dados conforme Figura 3.4.

Em seguida, os nós que não têm todos os seus vizinhos são removidos. Estes nós estão localizados nas bordas do mapa e perto de obstáculos e áreas desconhecidas. O número de camadas removidas depende das dimensões do robô, permitindo que ele se mova apenas nas regiões que não apresentam risco de colisão com suas extremidades. O processo de criação do



(a) Mapa de ocupação e robô móvel, representado em amarelo. (b) Grafo contendo apenas células que representam caminho transitável.

Figura 3.5: Exemplos para a construção de grafo dado as dimensões do robô e o mapa de ocupação (a) e um grafo contendo as células transponíveis (b). Fonte: O autor.

grafos pode ser visto na Figura 3.5 e no Algoritmo 2.

---

**Algorithm 2:** Algoritmo de criação do grafo do mapa da potência do rádio.

---

```

1 dBm_max: Valor referencia de potência do sinal de rádio;
2 R_Graph: Grafo da potência do sinal de rádio;
3 Map: Células do mapa de ocupação;
4 P: Fator de potência;
5 Robot_Dim: Dimensão do robô;
6 foreach Vertice ∈ R_Graph do
7   Nós_Vizinhos ← Lê_Vizinhos(Vertice);
8   foreach N ∈ Nós_Vizinhos do
9     if N_É_Diagonal then
10      |  $W \leftarrow ((dBm_{max} - dBm_N) * \sqrt{2})^P$ ;
11     else
12      |  $W \leftarrow (dBm_{max} - dBm_N)^P$ ;
13     end
14     Add_Vertice_Grafo(Nó, Vizinho, W);
15   end
16 end
17 Remove_Bordas_Grafo(R_Graph, Robot_Dim);

```

---

A função custo  $C_r$  para a métrica da potência do sinal de rádio é dada pela Equação 3.23, sendo a soma das diferenças da potência do sinal de rádio  $W_r$  presente no caminho  $\tau$  composto dos pontos  $(x_{inicial}, \dots, x_i, \dots, x_{final})$ . O caminho escolhido é aquele com o valor mínimo do custo total, sendo o de menor distância escolhido em caso de empate. Após a construção do grafo das potências do sinal de rádio, esse sendo um grafo bidirecional, é proposto a utilização do algoritmo de Dijkstra bidirecional para encontrar o caminho de menor custo entre dois nós.

$$C_r(\tau) = \sum_{x \in \tau} W_r(x). \quad (3.23)$$

## 4. Implementação do Sistema de Navegação com Base na Potência do Sinal de Rádio

Dado o processo de mapeamento da potência do sinal de rádio, assim como o planejador de caminhos implementado, é proposto por fim um sistema de navegação que consiga recalculer a rota conforme o robô mede novos valores. Deste modo, o mapa da potência de sinal de rádio, construído por meio de interpolação e predição, é utilizado em conjunto com o planejador de caminhos para que o robô consiga navegar em um local com o mapa da potência do sinal de rádio desconhecido a princípio.

Essa potência é medida na posição inicial e tomada como base para o cálculo do primeiro mapa, que é construído apenas pelo processo de estimação. Conforme o robô se movimentava pelo mapa de ocupação, o mapa de potência do sinal de rádio é recalculado. Caso o robô tenha um ponto de chegada ainda não alcançado, o planejador recalcula a rota para este mesmo ponto, conforme o mapa de potência do sinal de rádio é atualizado. O processo do sistema de navegação proposto pode ser observado na Figura 4.1.

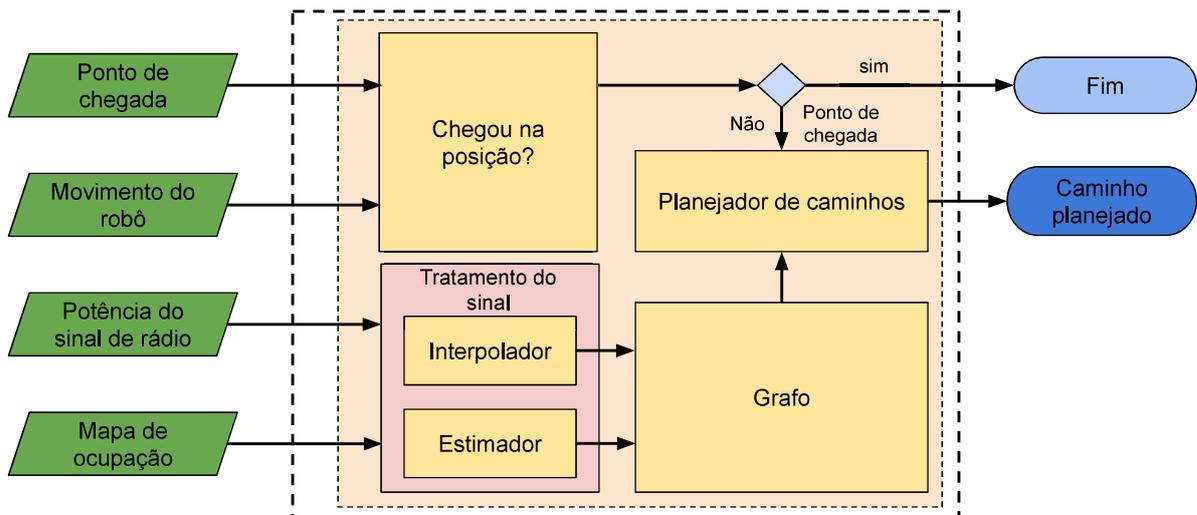


Figura 4.1: Sistema de planejamento de caminhos com base na potência do sinal de radio em um ambiente com mapa da potência do sinal desconhecido. Fonte: O autor.

Os algoritmos citados acima foram adaptados para o *Robot Operating System* (ROS) (QUIGLEY et al., 2009) e implementados no EspeleoRobô (AZPÚRUA et al., 2021). O mapeamento do ambiente e aquisição do mapa de ocupação são realizados utilizando do algoritmo de mapeamento e localização simultâneos (SLAM) GMapping (GRISSETTI et al., 2007), dado as leituras leituras de um laser 2D e a posição e orientação do robô. Apesar de ser um sensor que fornece dados 3D, é possível utilizar apenas uma faixa do velodyne como saída 2D.

Quando um mapa de ocupação já estiver disponível para o robô, não há necessidade de remapear todo o ambiente, apenas localizar o robô nesse mapa. Para isso, é utilizado o algoritmo de localização 2D probabilístico adaptativo (AMCL) que utiliza a abordagem de localização

Monte Carlo para localização (THRUN **et al.**, 2001). O AMCL torna possível estimar a posição do robô em um determinado mapa de ocupação por meio de um filtro de partículas, necessitando da odometria, uma estimativa da posição inicial e os dados de um laser 2D.

A odometria do robô é utilizada como entrada tanto pelo GMapping quanto pelo AMCL. Logo, é utilizado o EKF-LOAM (*Extended Kalman filter LiDAR Odometry And Mapping*) (JÚNIOR **et al.**, 2022). Esse é um algoritmo de SLAM com base em LiDAR e adaptado do algoritmo LegO-LOAM (Lightweight Ground Optimized LiDAR Odometry And Mapping) (SHAN e ENGLLOT, 2018), que utiliza a fusão de diferentes fontes de odometria e sensores afim de corrigir a localização e o mapeamento do ambiente com poucas *features*, que são essenciais para algoritmos de SLAM baseados em LiDAR, como dutos e galerias. Apesar de ser um algoritmo de SLAM, o EKF-LOAM pode ser utilizado apenas como fonte de odometria.

Para medir a potência do sinal de rádio, foi desenvolvido um algoritmo que acessa o rádio do robô e lê o valor da potência em dBm do sinal recebido pelo rádio da base de operação. Sempre que o robô percorrer uma distância igual ou superior a uma distância de referência, dada por um parâmetro reconfigurável, o valor medido no momento e a posição do robô no plano  $(X, Y)$  são atribuídos a um marcador que é utilizado como base para a interpolação e previsão. Todos os marcadores são organizados em um arranjo linear.

Já os algoritmos de interpolação e estimativa do sinal são executados sempre que o robô se locomove certa distância em metros utilizando os pontos salvos no arranjo de leituras da potência do sinal de rádio. A interpolação é realizada utilizando a biblioteca *ScyPy* (VIRTANEN **et al.**, 2020). Para a criação do grafo e o algoritmo de Dijkstra bidirecional, é utilizado a biblioteca *Networkx* (HAGBERG **et al.**, 2008).

Para percorrer os caminhos gerados, é utilizada a estratégia de controle proposta por Rezende **et al.** (2022b) para a locomoção autônoma do robô usando o conceito de campos vetoriais artificiais e *feedback linearization* chamada de *VectorField Stack* (REZENDE **et al.**, 2022a). A localização fornecida pela AMCL funciona como *feedback* para o controle do campo vetorial e o caminho gerado pelo planejador e, como resultado, o controlador envia comandos de velocidade para o robô.

O sistema de navegação foi implementado de forma que o robô move uma certa distância e para. Ao parar, o mapa da potência do sinal de rádio é atualizado e o novo caminho é replanejado com base na posição atual do robô no mapa. O robô só volta a movimentar assim que o novo caminho seja replanejado.

A Figura 4.2 mostra a relação dos algoritmos utilizados para realizar o mapeamento do ambiente e construção do mapa de potência do sinal de rádio. Já a Figura 4.3 mostra o sistema de navegação implementado. Na figura, os nós são representados por elipses e os tópicos por quadrados. Os nós em vermelho representam os algoritmos desenvolvidos. Todos os algoritmos estão disponibilizados *online*<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup><https://github.com/AndreCid/espeleoRadio>

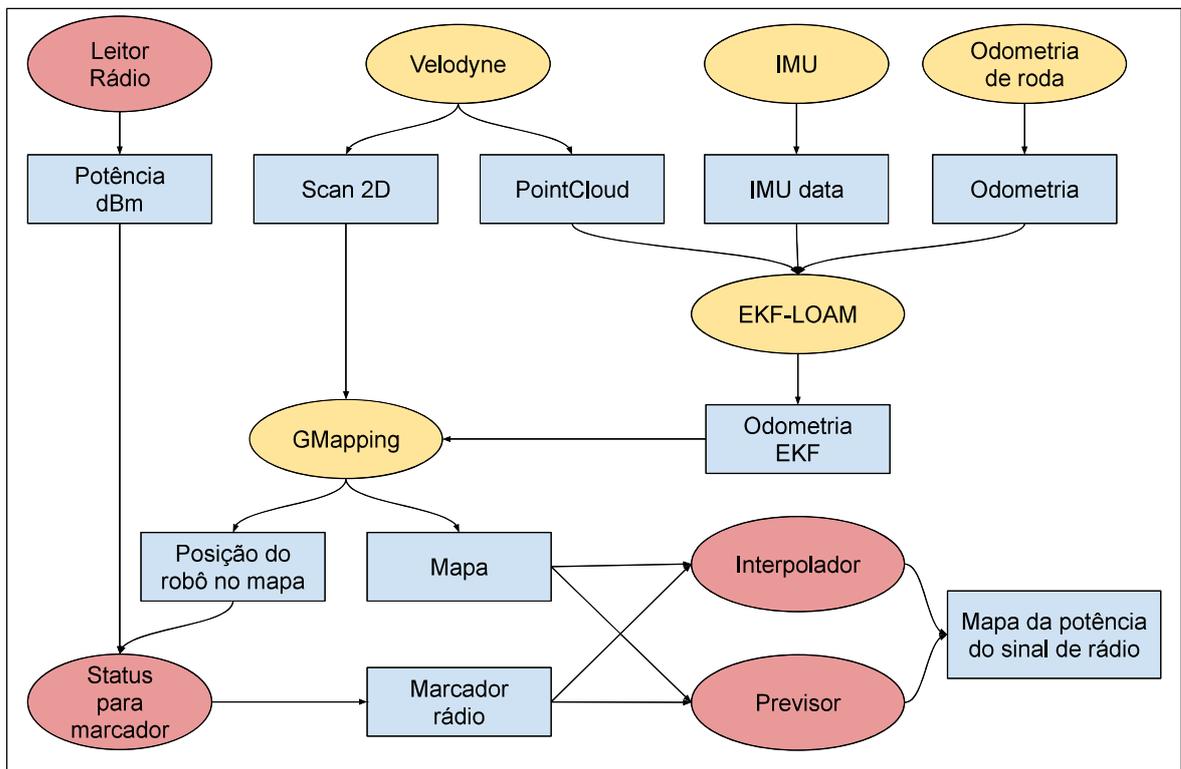


Figura 4.2: Grafo do ROS para o sistema de mapeamento da potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.

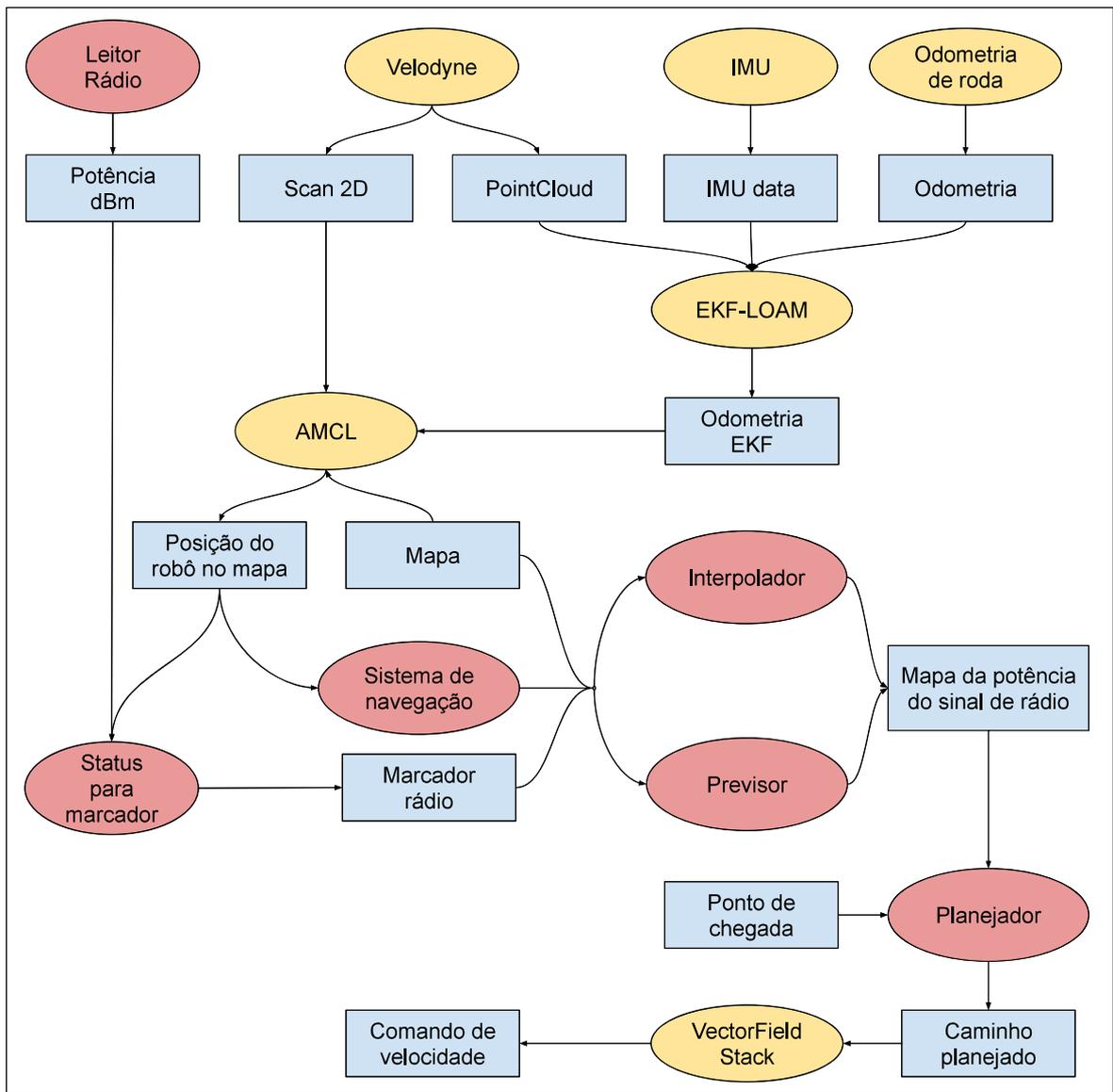


Figura 4.3: Grafo do ROS para o sistema de navegação autônomo com base na potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.

## 5. Experimentos e Resultados

Afim de verificar a viabilidade do sistema de navegação proposto, alguns experimentos foram realizados no primeiro andar do Instituto Tecnológico Vale. A Seção 5.1 apresenta o primeiro experimento, que consiste no levantamento dos mapas de ocupação e da potência do sinal de rádio utilizando o EspeleoRobô. Em seguida, a Seção 5.2 apresenta a simulação de três caminhos gerados utilizando a métrica proposta na Seção 3.4 e os mapas gerados no primeiro experimento. Os resultados dessa métrica são comparados com uma implementação de métrica de menor distância.

Na Seção 5.3 é simulado o sistema de navegação proposto na Capítulo 4 utilizando um mapa de ocupação conhecido e um mapa de potência do sinal de rádio desconhecido.

Por fim, é utilizado o robô para percorrer de forma autônoma um dos caminhos gerados nas simulações e replicar o sistema de navegação simulado nas Seções 5.4 e 5.5 respectivamente.

Os experimentos com o EspeleoRobô foram realizado com esse equipado com um LiDAR velodyne de 16 canais, um *encoder* em cada roda, uma unidade de medição inercial (IMU) *Xsens* e um rádio Ubiquiti Rocket M900, com frequência de comunicação entre os rádios de 912MHz, conforme ilustrado na Figura 5.1. A base de operação estava equipada com uma antena direcional Yagi com 16dBi de ganho, já o robô estava equipado com duas antenas omnidirecionais de 10dBi de ganho. O computador utilizado para realizar a estimação e o planejamento de caminhos foi o computador da base de operação, equipado com um processador *Intel Core i5-12500H* com 16Gb de memória RAM. As simulações ocorreram com base nos mapas de ocupação e potência do sinal de rádio, gerados pelo EspeleoRobô. Os vídeos dos experimentos podem ser vistos no link: <https://github.com/AndreCid/espeleoRadio>



Figura 5.1: EspeleoRobô equipado com antenas omnidirecionais e antena direcional utilizada na base. Fonte: O autor.

## 5.1. Mapeamento da Intensidade do Sinal de Rádio

O processo de mapeamento consistiu na teleoperação do EspeleoRobô por parte do primeiro andar do prédio do Instituto Tecnológico Vale, ilustrado no Figura 5.2. O robô começou dentro do laboratório e conforme se locomovia, as potências do sinal de rádio eram salvas. Como resultado, foi gerado um mapa de ocupação de aproximadamente 18.7 milhões de células, com resolução de 0.05 metros. Já para a potência do sinal de rádio, foram medidos 1662 pontos pelo EspeleoRobô de forma que esse valor variou entre  $-77dBm$  e  $-17dBm$ . A Figura 5.3 mostra o processo de aquisição da potência do sinal de rádio em conjunto com a construção do mapa de ocupação e a Figura 5.4 mostra o resultado final. A distribuição de cores ocorre utilizando as Equação 3.12 a Equação 3.14 com  $-80dBm$  como valor mínimo e  $-15dBm$  como valor máximo.

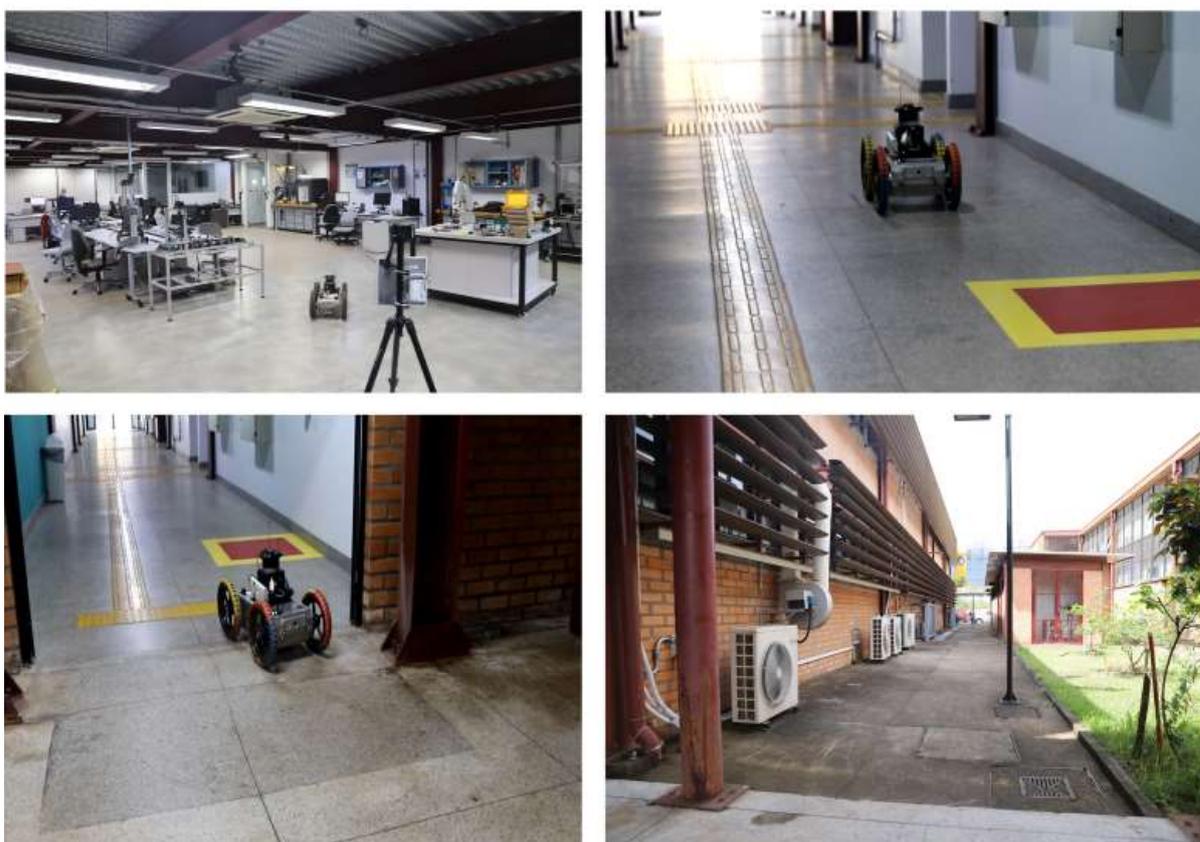
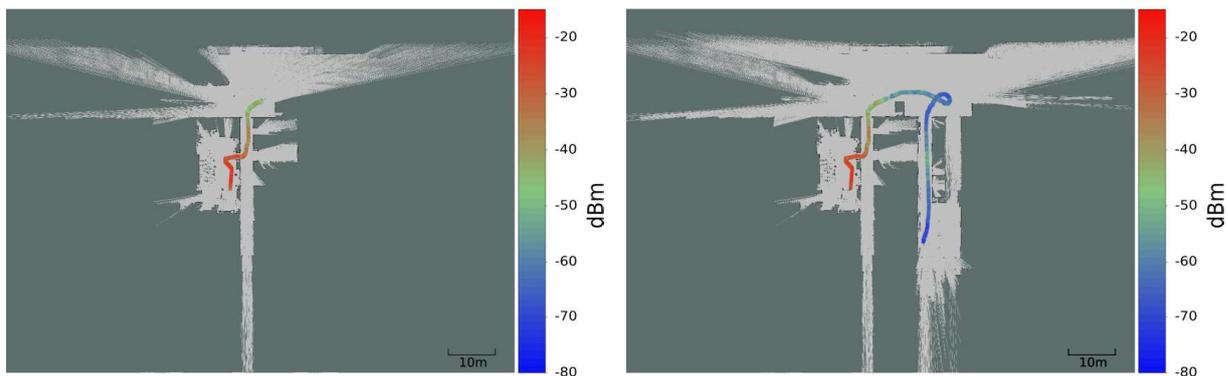
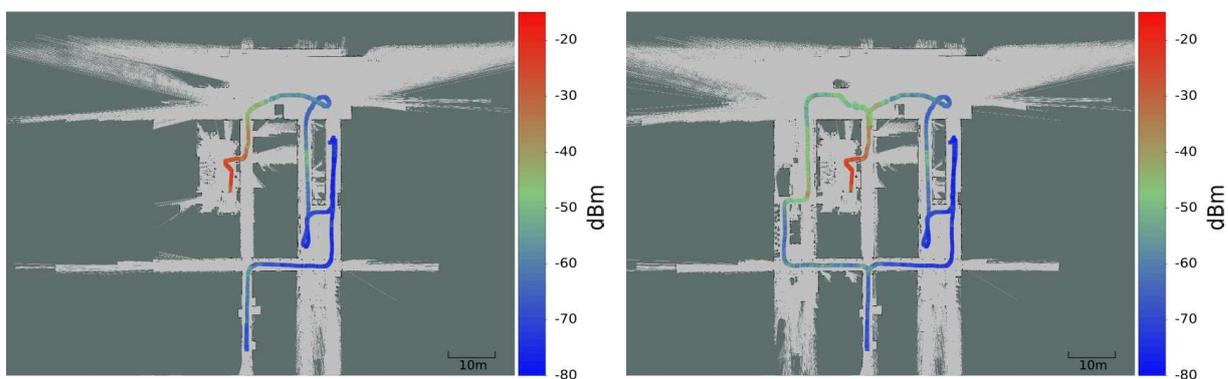


Figura 5.2: Local de realização dos experimentos - Primeiro andar do prédio do Instituto Tecnológico Vale. Fonte: O autor.



(a) 113 valores medidos da potência do sinal de rádio.

(b) 343 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(c) 783 valores medidos da potência do sinal de rádio.

(d) 1181 valores medidos da potência do sinal de rádio.

Figura 5.3: Processo de mapeamento do ambiente, utilizando um mapa de ocupação, e medição da potência do sinal de rádio simultâneo ao mapeamento. Fonte: O autor.

Os algoritmos de interpolação e estimação de sinal também podem ser utilizados durante o processo de mapeamento. Para a interpolação, é possível notar na Figura 5.5 que apenas os pontos dentro da envoltória convexa recebem um valor de potência do sinal de rádio, impossibilitando a utilização do planejador proposto na Seção 3.4 externo a essa região. O mapa gerado pelo algoritmo de interpolação utilizando todos os pontos coletados pode ser observado na Figura 5.6.

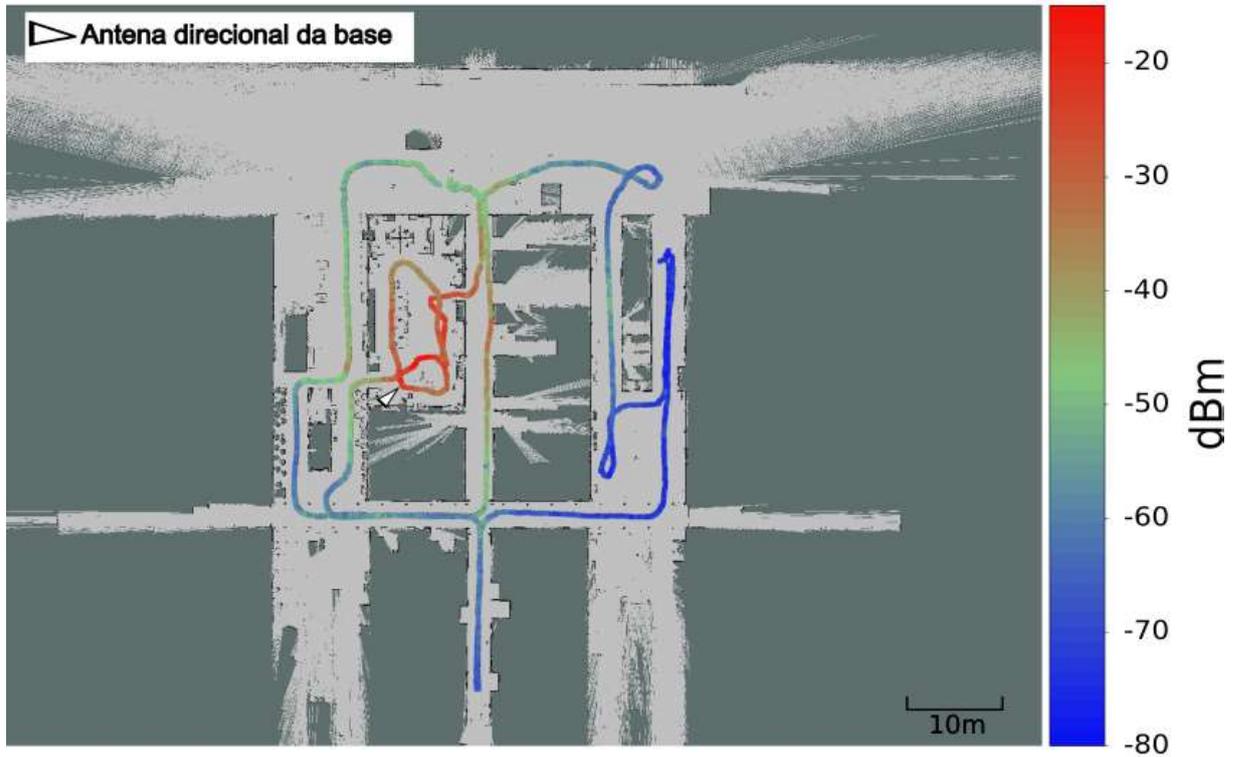


Figura 5.4: Mapa de ocupação completo com 1662 leituras da potência do sinal de rádio ao longo do mapeamento do ambiente e posição da antena direcional utilizada na base. Fonte: O autor.

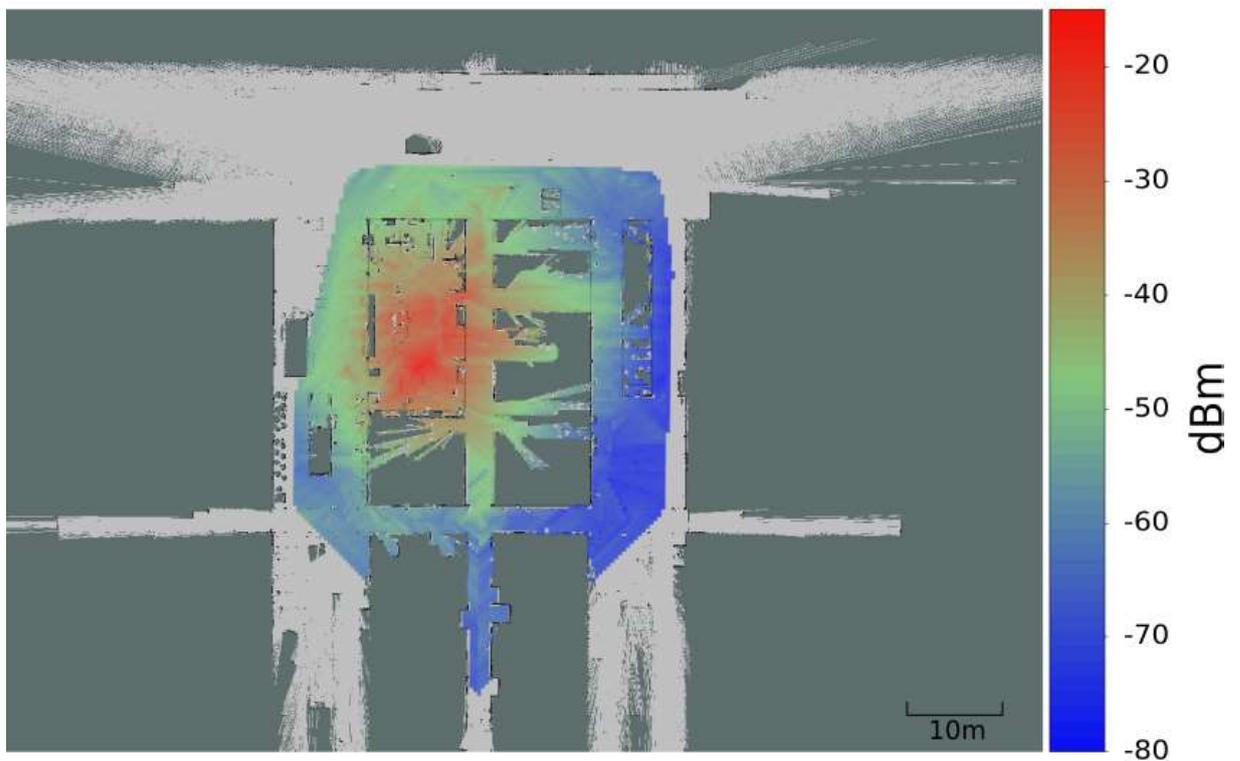
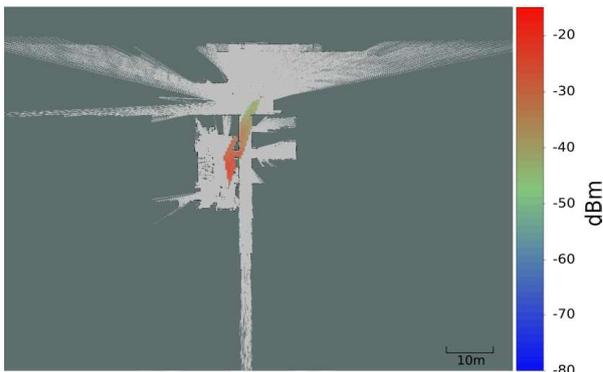
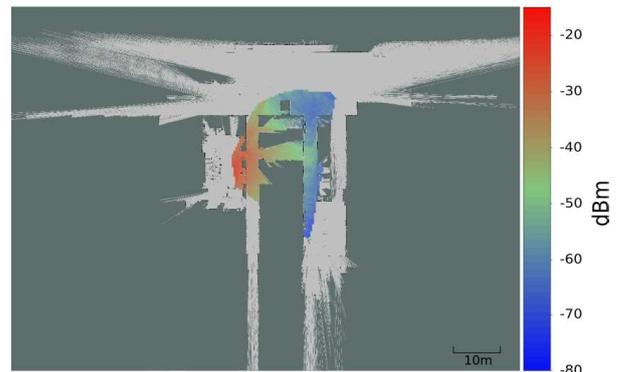


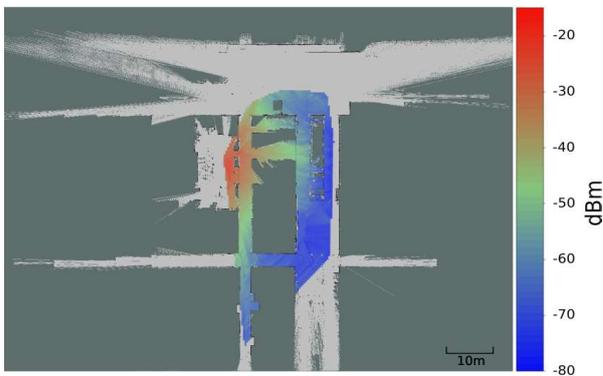
Figura 5.6: Mapa completo gerado pela interpolação de 1662 valores da potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.



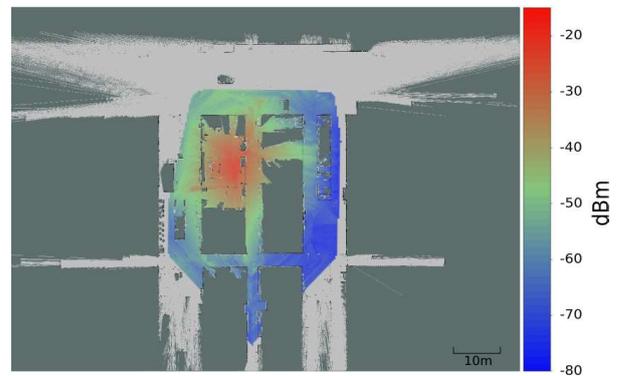
(a) 113 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(b) 343 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(c) 783 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(d) 1181 valores medidos da potência do sinal de rádio.

Figura 5.5: Interpolação das potências do sinal de rádio conforme o robô mapeia o ambiente.  
Fonte: O autor.

Já para a estimação do sinal, com apenas a primeira leitura da potência do sinal de rádio, já é possível preencher todas as células livres do mapa de ocupação, conforme ilustrado na Figura 5.7. Porém, o mapa gerado não representa bem o comportamento da potência do sinal de rádio, quando comparado com os dados apresentados na Figura 5.4. Utilizando o método proposto na Subseção 3.3.2 e um *grid* de 1 metro para realizar cada estimação, conforme o número de medições vai aumentando, o mapa da potência de sinal previsto se aproxima das leituras realizadas e do mapa interpolado, conforme ilustrado em Figura 5.8. O mapa completo gerado pela estimação dos valores da potência do sinal de rádio pode ser visto na Figura 5.9.

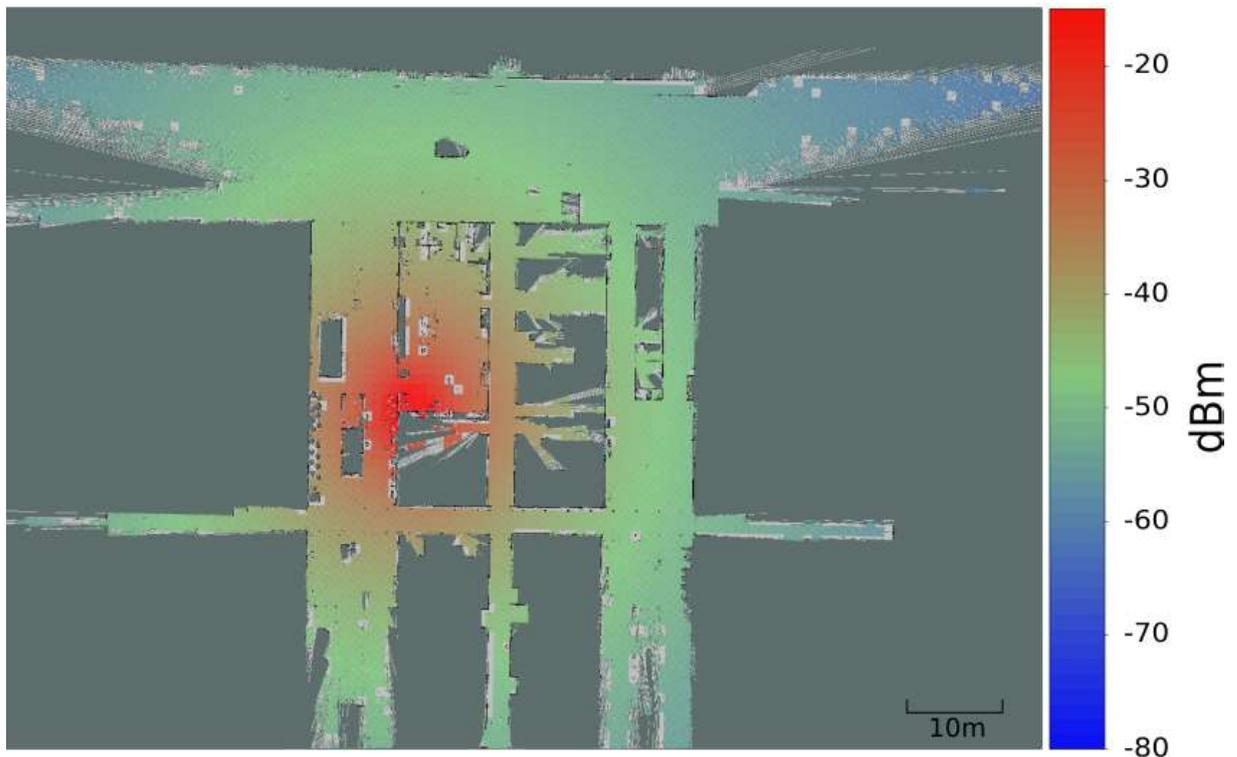
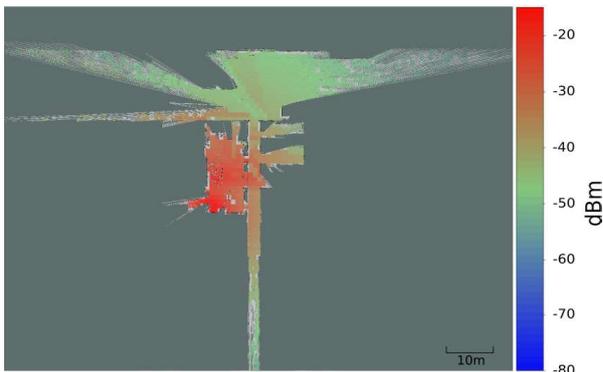
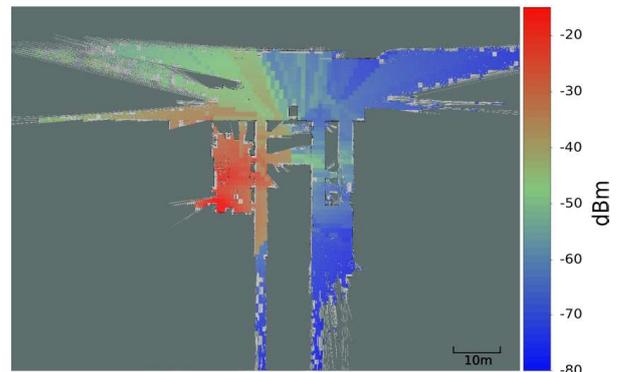


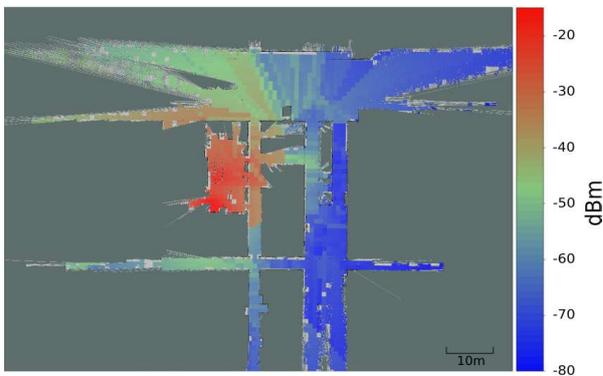
Figura 5.7: Mapa da potência do sinal de rádio dado pela estimação utilizando como base apenas a leitura da potência do sinal de rádio na posição inicial do robô. Fonte: O autor.



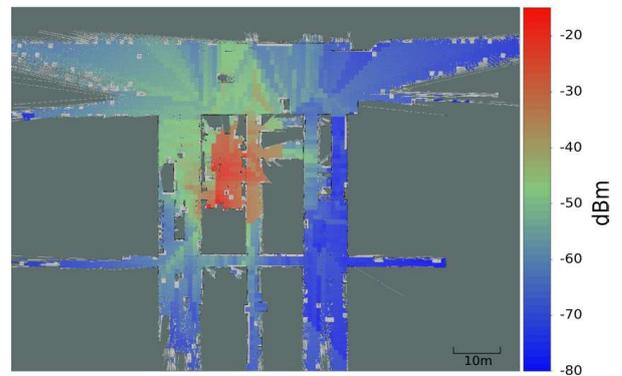
(a) 113 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(b) 343 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(c) 783 valores medidos da potência do sinal de rádio.



(d) 1181 valores medidos da potência do sinal de rádio.

Figura 5.8: Estimação da potência do sinal de rádio utilizando a o método proposto na Subseção 3.3.2. Fonte: O autor.

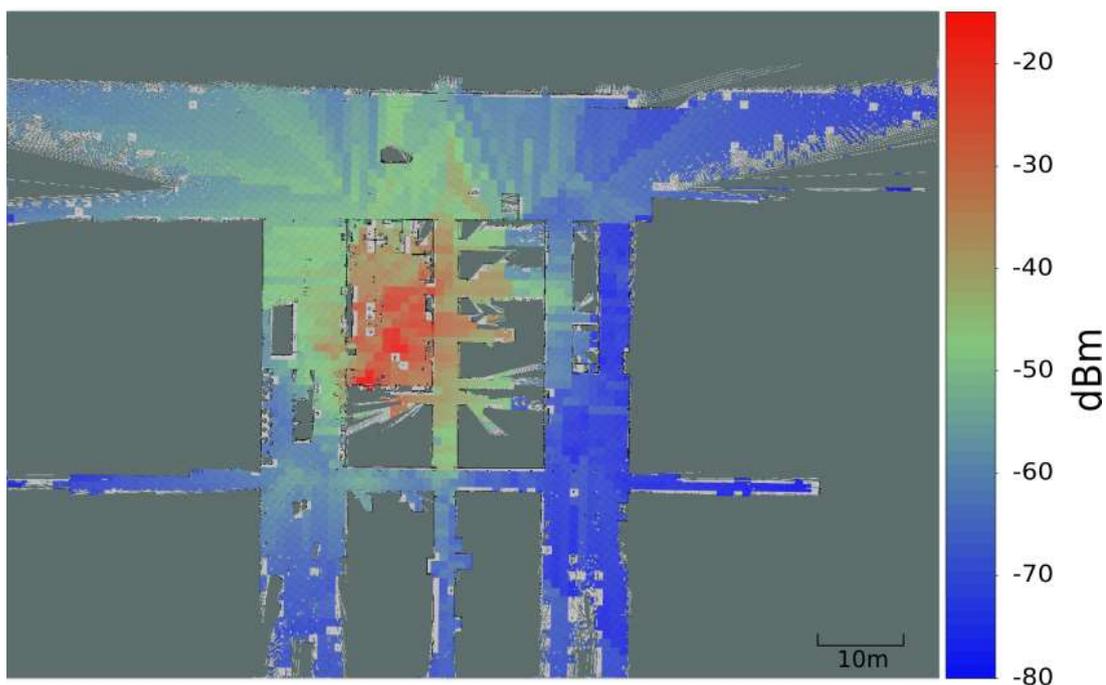


Figura 5.9: Mapa da potência estimada do sinal de rádio, gerado a partir do método proposto na Subseção 3.3.2. Fonte: O autor.

Por fim, o grafo da potência do sinal de rádio é construído com base no mapa de ocupação, potências do sinal de rádio lidos pelo robô, mapa interpolado e mapa estimado. A junção de todos esses mapas pode ser visto na Figura 5.10. Nesse mapa é possível o comportamento da potência do sinal de rádio por todo o andar do prédio.

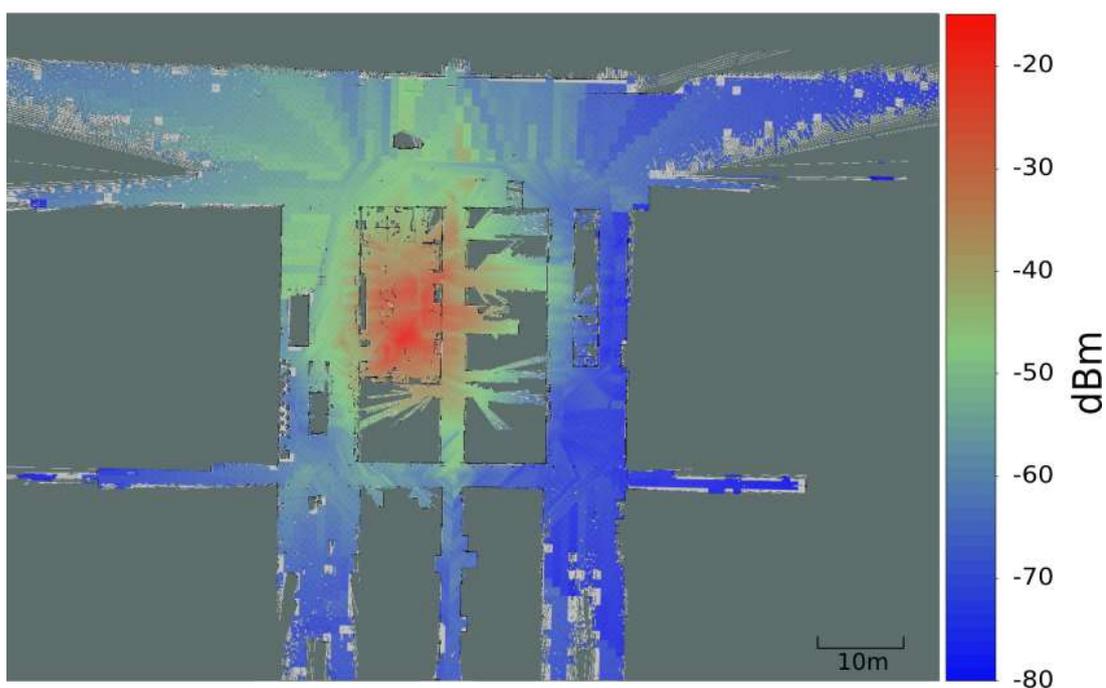


Figura 5.10: Mapa completo da potência do sinal de rádio construído por meio de medição, interpolação e estimativa da potência do sinal. Fonte: O autor.

## 5.2. Planejador de Caminhos em Ambiente Simulado

Para o teste do planejador de caminhos proposto na Seção 3.4, simulações foram realizadas utilizando os mapas gerados no primeiro experimentos. Para fins de comparação, a métrica de menor distância também foi implementada. Os dois primeiros pontos foram escolhidos no mapa e a Figura 5.11 ilustra os dois caminhos planejados. Nesse primeiro teste, o fator de potência  $P$  da Equação 3.22 foi igual a 1. Os valores comparados foram de distância percorrida, potência máxima e mínima encontradas no caminho, potência por metro (onde quanto mais próxima de zero, melhor) e média das potências presentes no caminho percorrido, onde os valores de potência em miliwatts são utilizados para o cálculo da média e, em seguida, esse valor é convertido de volta para dBm.

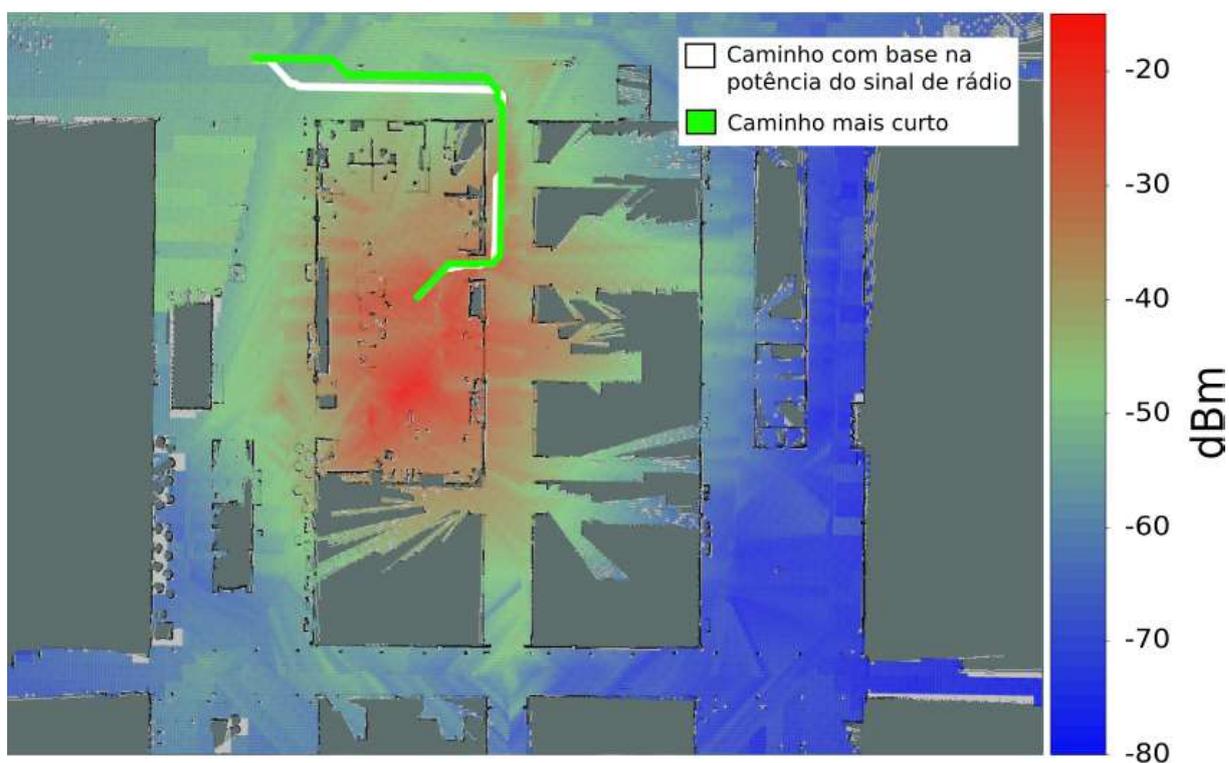


Figura 5.11: Caminho mais curto, apresentado em verde, e caminho com métrica de maximizar a potência do sinal de rádio. Fator de potência = 1. Fonte: O autor.

Com  $P$  igual a 1, o caminho planejado utilizando a métrica da potência do sinal de rádio ficou bem próximo do de menor distância apresentando aumento de 1,9%, 4,3% e 3,0% para os valores mínimo, máximo e média da potência do sinal respectivamente. Desta forma, os mesmos pontos de chegada e partida foram mantidos e o fator de potência  $P$  da Equação 3.22 alterado para 10. O novo caminho planejado pode ser visto na Figura 5.12 e a comparação destes caminhos pode ser vista na Tabela 5.1, de forma que a média e o valor total estão relacionados a todos os nós do grafo que estão presentes no caminho planejado. Ao aumentar o fator de potência, priorizando ainda mais nós com maiores potências do sinal de rádio, houve um aumento de 41,1% na potência máxima e 22,2% na potência média. Também é possível notar

que o caminho passou pela região com melhor sinal, apesar de aumentar a distância percorrida (aumento de 21,9%). Também é possível notar que o aumento do fator de potência torna o caminho planejado mais sinuoso.

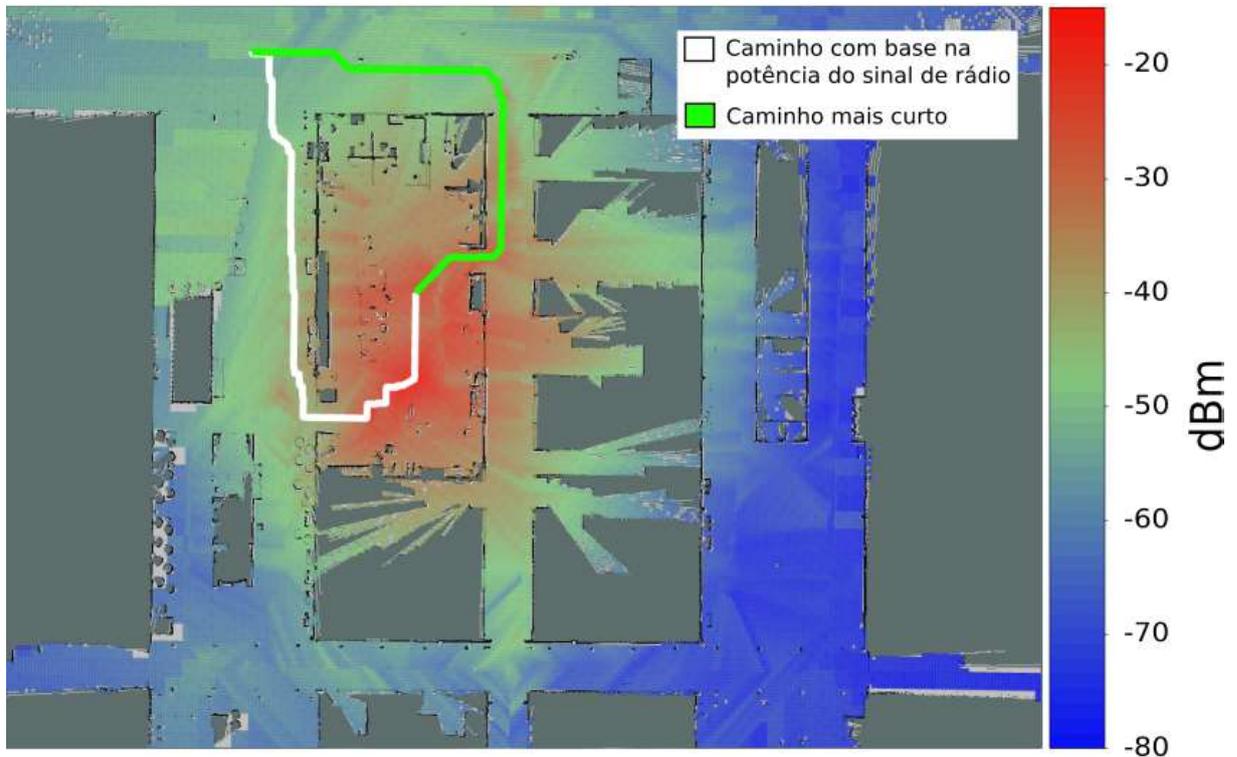


Figura 5.12: Fator de potência da Equação 3.22 alterado para 10, priorizando locais com maior potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.

Outros caminhos planejados podem ser vistos na Figura 5.13 e Figura 5.14, com seus resultados apresentados na Tabela 5.2.

	Distância(m)	Min/Max (dBm)	Potência por metro (dBm/m)	Potência média (dBm)
Caminho mais curto	30.35	-54/-24	-791.96	-34
Caminho com base na potência do sinal, P = 1	30.35	-53/-23	-781.41	-33
Caminho com base na potência do sinal, P = 10	37.00	-53/-17	-767.10	-27

Tabela 5.1: Comparação entre caminho mais curto e caminho considerando a qualidade do sinal de rádio com fator  $P$  igual a 1 e 10. Fonte: O autor.

Com base na Tabela 5.2, é possível observar que o planejador de caminhos proposto proporcionou uma melhora no valor mínimo e máximo da potência do sinal de rádio do caminho

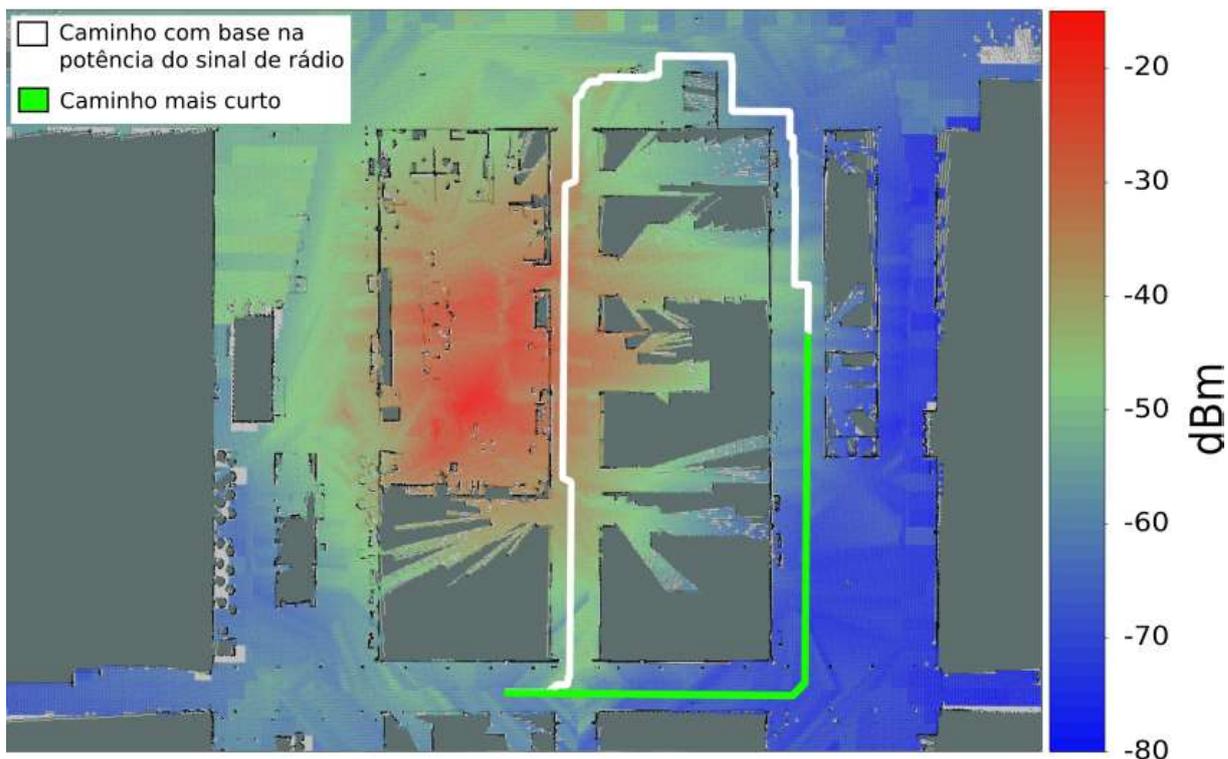


Figura 5.13: Segundo caminho planejado com fator de potência  $P$  igual a 10. Fonte: O autor.

2 de 15,8% e 75,0%, respectivamente, em comparação com caminho de menor distância. Já no caminho 3, essa melhora foi de 7,3% e 182% respectivamente.

Em todas as simulações, a média da potência do sinal de rádio apresentaram aumento, sendo 22,2% para o caminho 1, 57,8% para o caminho 2 e 100,0% para o caminho 3.

O aumento tanto da média da potência do sinal de rádio quanto o valor mínimo e máximo mostram a eficiência do planejador proposto em passar por áreas com sinal melhor. Isso consequente acarreta na melhora da comunicação nesses locais, reduzindo a chance de ocorrer perda de comunicação ou afetar na operação e supervisão do robô durante uma operação. Entretanto, todos os caminhos planejados com base na potência do sinal de rádio apresentaram aumento da distância total percorrida.

### 5.3. Sistema de Navegação Simulado

Para testar o sistema de navegação em um local sem o mapa da potência do sinal de rádio conhecido, foi realizada uma simulação assumindo que todo o mapa de ocupação é conhecido e que os valores da leitura que seriam realizadas pelo robô são dados por meio dos valores naquela posição do mapa de calor final da potência do sinal de rádio.

Em seguida, é escolhido o ponto de chegada dado a posição inicial o robô. O primeiro mapa da potência do sinal de rádio é gerado com base na primeira leitura e o primeiro caminho é planejado. Conforme o robô anda, novas leituras são adicionadas e o mapa da potência do

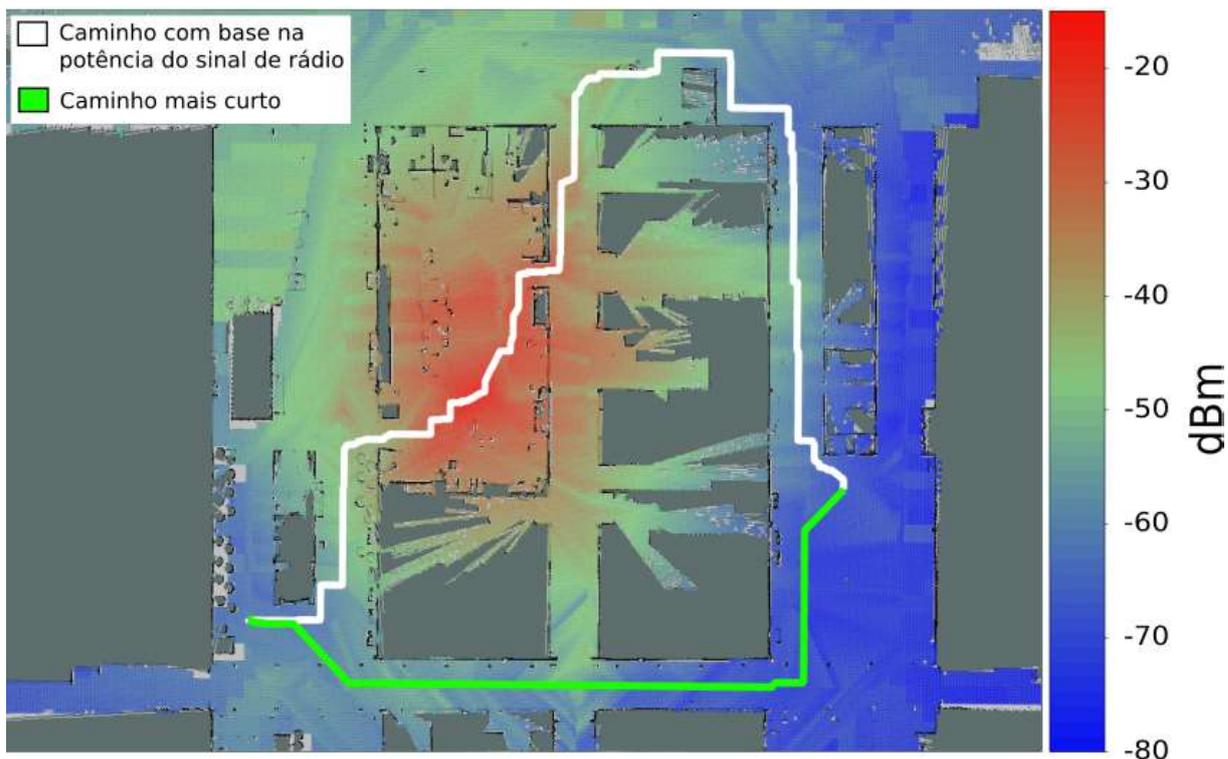


Figura 5.14: Terceiro caminho planejado com fator de potência  $P$  igual a 10. Fonte: O autor.  
Fonte: O autor.

sinal de rádio é atualizado. O caminho é replanejado considerando a posição atual do robô e mantendo o ponto de chegada. Nesse experimento, essa etapa é repetida até o momento que o caminho é replanejado afim de evitar uma área com baixa potência do sinal de rádio.

O processo de navegação simulada pode ser observado na Figura 5.15 e os dados dos caminhos planejados na Tabela 5.3. É possível perceber que na segunda iteração do algoritmo de navegação, o mapa gerado pelos novos valores medidos pelo robô ainda é muito próximo do primeiro mapa. Logo, o planejado mantém o mesmo caminho.

Já na terceira iteração, os novos pontos coletados apresentam uma queda acentuada do valor da potência do sinal de rádio. Eles estavam localizados mais próximos da região que ainda não tinham seus valores da potência do sinal de rádio medidos, logo, os baixos valores de potência foram utilizados como pontos de referência para o previsor.

Comparando com o mapa completo da Figura 5.10, é possível notar que o sistema de navegação foi eficiente, dado que o robô desviou do local com menor potência do sinal de rádio sem precisar passar por ele.

## 5.4. Verificação do Mapa e Estratégia de Navegação

Para testar os caminhos simulados na seção anterior, a estratégia de controle descrita na Capítulo 4 foi utilizada para percorrer dois dos caminhos gerados na simulação. Para esse experimento, o robô foi colocado na posição inicial dos caminhos gerados na Figura 5.13. Os

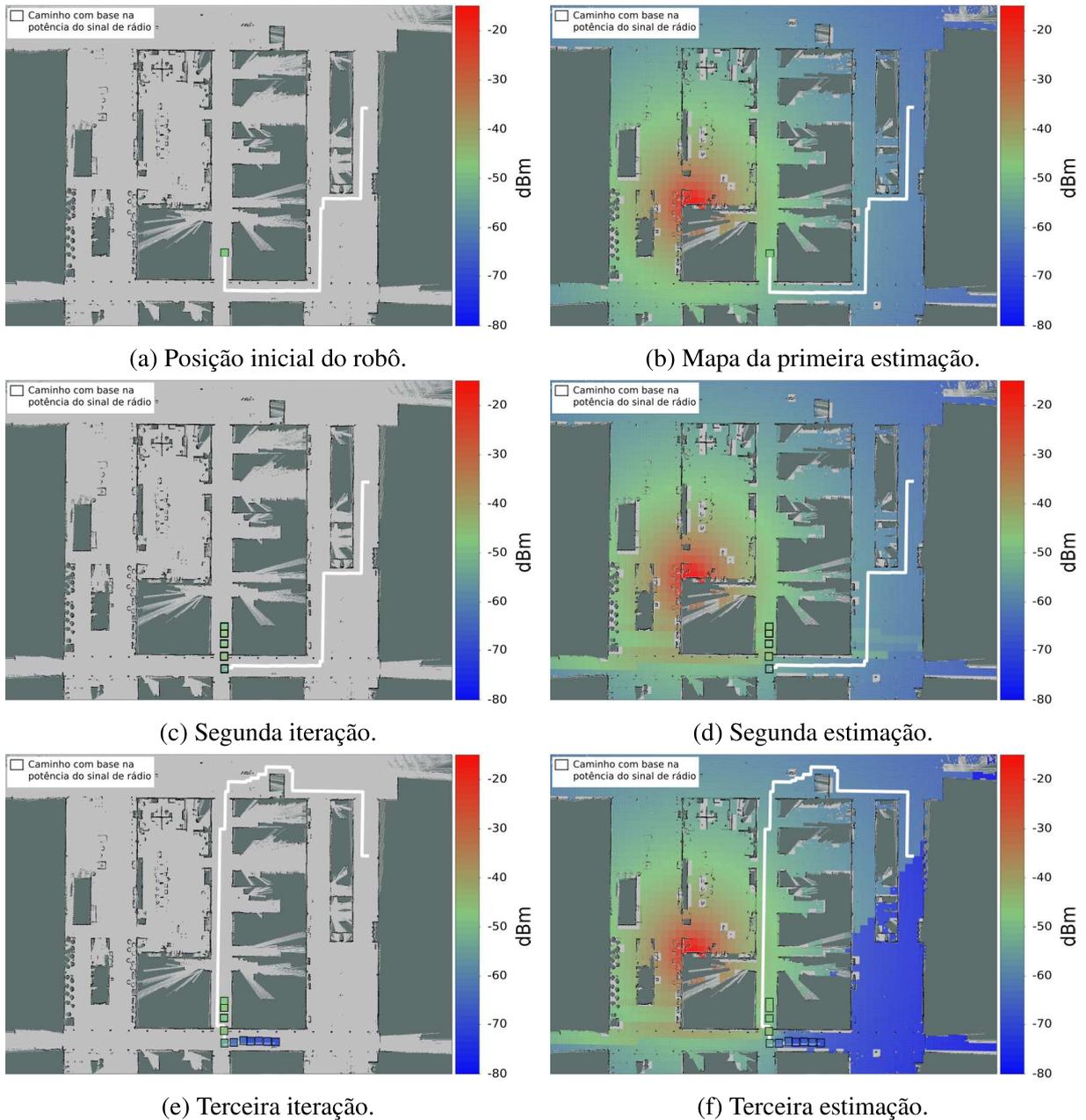


Figura 5.15: Comportamento do planejador de caminhos para cada nova iteração do mapa de potência do sinal de rádio. O ponto de partida, representado pela imagem (a), e a primeira estimação a partir dele (b). No segundo cálculo dos mapas, a rota permanece semelhante, de acordo com as Figuras (c) e (d). Após detectar uma queda significativa da potência do sinal de rádio (e), o planejador recalcula a rota para evitar um local com comunicação pior (f). Fonte: O autor.

	Distância(m)	Min/Max (dBm)	Potência por metro (dBm/m)	Potência média (dBm)
<b>Caminho 1</b>				
Caminho mais curto	30.35	-54/-24	-791.96	-34
Caminho com base na potência do sinal	37.00	-53/-17	-767.10	-27
<b>Caminho 2</b>				
Caminho mais curto	36.76	-73/-49	-1275,27	-60
Caminho com base na potência do sinal	68.60	-63/-28	-936,93	-38
<b>Caminho 3</b>				
Caminho mais curto	45.05	-73/-48	-1186,88	-58
Caminho com base na potência do sinal	89.60	-68/-17	-924,81	-29

Tabela 5.2: Comparação entre as métricas abordadas para os três caminhos gerados com fator de potência igual a 10. Fonte: O autor.

	Distância para chegada(m)	Min/Max (dBm)	Potência média(dBm)	Número de leituras
Posição inicial	47.4	-60.4/-47.4	-54.6	1
Segunda iteração	42.9	-60.4/-52.1	-56.6	5
Terceira iteração	74.0	-67.9/-43.9	-50.2	11

Tabela 5.3: Dados do caminho planejado para cada iteração. Fonte: O autor.

mapas de ocupação e da potência do sinal de rádio, salvos previamente, foram carregados e o ponto final do caminho era escolhido no mapa. Foi realizado então o planejamento de caminho com base na posição do robô e, conforme esse se locomovia, os dados da potência do sinal de rádio eram medidos, com os resultados apresentados na Tabela 5.4.

O sistema de controle foi capaz de manter o EspeleoRobô no caminho planejado mesmo esse sendo sinuoso. Devido a essa característica, o robô realizava rotações rápidas no próprio eixo. Essas rotações causaram erro momentâneos na orientação do robô que logo foram corrigidas pelo sistema de localização AMCL.

Ao percorrer esses caminhos, é possível notar que o comportamento apresentado nas simulações se manteve dado que a média do sinal e o valor mínimo e máximo para o caminho planejado com base na potência do sinal de rádio aumentaram em comparação com caminho mais curto em 38,0%, 14,0% e 61,3% respectivamente. Outro ponto importante destacado nesse experimento é a eficiência do mapeamento do sinal de rádio, dado que os resultados da Tabela 5.4 mostram que os sinais medidos pelo robô enquanto percorriam os caminhos foram próximos dos dados disponibilizados em simulação pelo mapa da potência do sinal de rádio.

	Distância(m)	Min/Max (dBm)	Potência por metro (dBm/m)	Potência média (dBm)
Caminho mais curto	43.7	-73/-50	-144,98	-58
Caminho de rádio, P = 10	66.59	-64/-31	-137,42	-42

Tabela 5.4: Caminhos percorridos pelo EspeleoRobô utilizando estratégia de controle. Fonte: O autor.

## 5.5. Sistema de Navegação Autônomo com Base na Potência do Sinal de Rádio

Visando validar o sistema de navegação com base na potência do sinal de rádio, o mesmo processo apresentado na simulação da Seção 5.3 foi realizado com o EspeleoRobô. Para esse experimento, o sistema de navegação foi adaptado de forma que a cada 3 metros, o robô parava, recalculava os mapas e a nova rota. O processo de navegação pode ser visto na Figura 5.16 e os dados do caminho gerado em cada iteração pode ser visto na Tabela 5.6.

Nesse experimento, o EspeleoRobô ficou em média 42 segundos parado em cada iteração para: gerar o mapa da potência do sinal de rádio por meio de interpolação e estimação, gerar o grafo correspondente ao mapa da potência do sinal e calcular o caminho adequado. A Tabela 5.5 mostra a relação do tempo médio que cada algoritmo gastou durante o processo de navegação.

	Interpolação	Estimação	Grafo	Planejamento
Tempo (s)	0.8	14.2	17.0	10.2
Tempo Acumulado (s)	0.8	15.0	32.0	42.2

Tabela 5.5: Tempo médio necessário para realização de cada processo do sistema de navegação com base na potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.

Esse experimento destaca que ao utilizar o sistema de navegação proposto, o EspeleoRobô consegue navegar em um mapa de ocupação sem a necessidade de percorrer todo o ambiente primeiro para que seja possível utilizar do planejador de caminhos com base na potência do sinal de rádio. Dessa forma, é possível navegar utilizando apenas as leituras realizadas pelo robô enquanto percorre o caminho com base na potência do sinal de rádio. Esse comportamento é demonstrado na quinta iteração do experimento, onde o caminho planejado evitou uma área

	<b>Distância para chegada(m)</b>	<b>Min/Max (dBm)</b>	<b>Potência média(dBm)</b>	<b>Número de leituras</b>
Posição inicial	50.1	-61.4/-47.2	-54.8	1
Segunda iteração	46.5	-61.4/-50.9	-56.2	15
Terceira iteração	44.4	-61.4/-50.2	-55.8	31
Quarta iteração	41.0	-65.0/-56.7	-60.2	47
Quinta iteração	70.6	-68.2/-46.0	-51.6	61

Tabela 5.6: Dados do caminho planejado para cada iteração do sistema de navegação autônomo com base na potência do sinal de rádio. Fonte: O autor.

de baixa potência do sinal de rádio sem ter que passar por ela antes para medir essa potência.

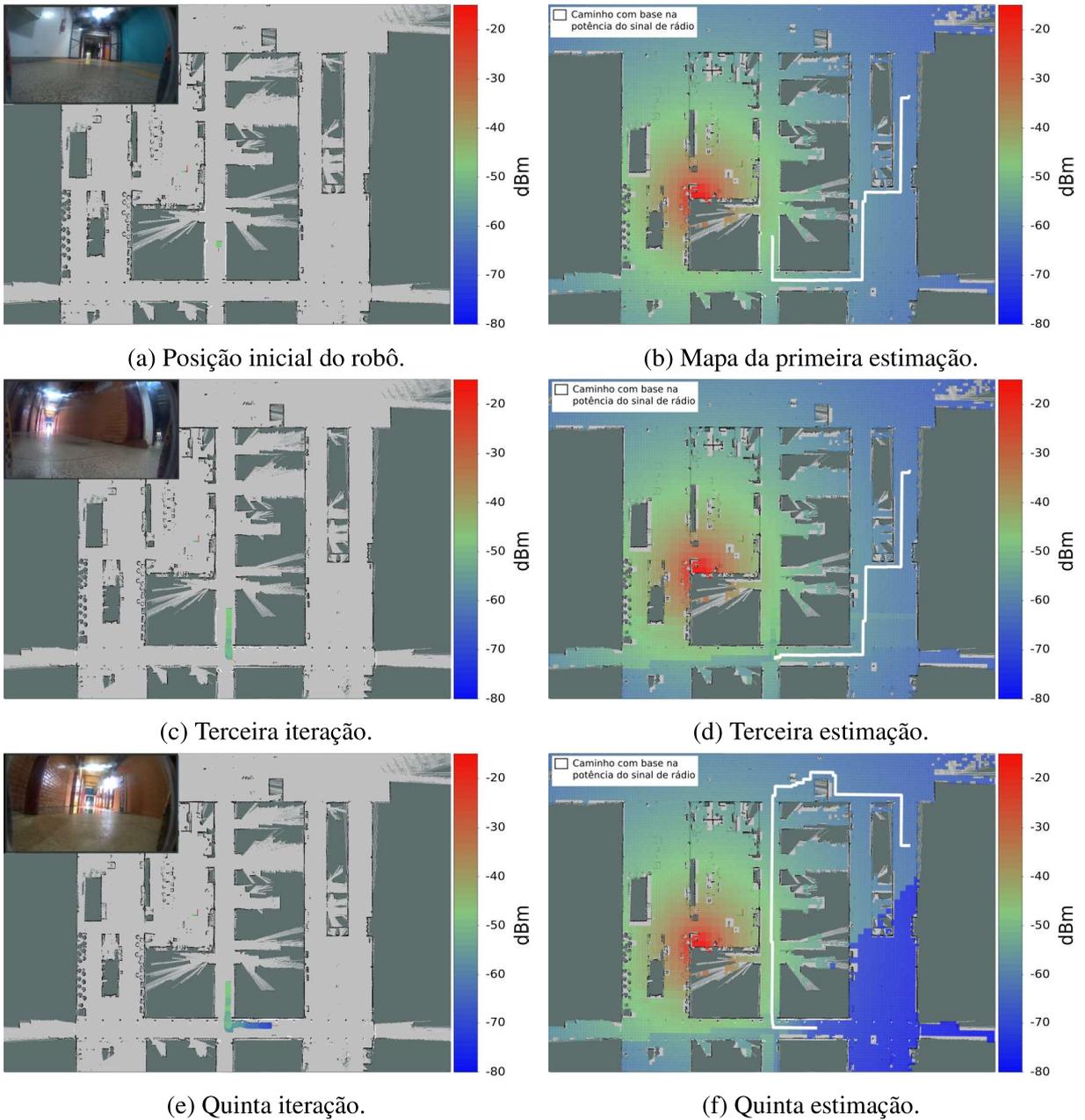


Figura 5.16: Sistema de navegao com base na potncia do sinal de rádio aplicado ao Espele-  
oRob com comportamento semelhante  simulao mostrada na Figura 5.15. Fonte: O autor.

## 6. Conclusão

A presente dissertação apresentou um sistema de navegação que permite que um robô móvel terrestre navegue entre dois pontos de forma a maximizar a potência do sinal de rádio. Esse sistema possibilitou que um robô móvel se locomovesse em um ambiente conhecido, melhorando a comunicação com a base de operação, sem o mapa da potência do sinal de rádio do ambiente previamente disponibilizado.

O primeiro passo consistiu no mapeamento da potência do sinal de rádio por meio de dois métodos: interpolação e estimação. Os dois algoritmos em conjunto possibilitam criar esse mapa com base em um mapa de ocupação de forma que todas as células livres desse mapa de ocupação tiveram um valor de potência do sinal atribuídos a ela, permitindo utilizar todo o mapa para o planejamento de caminhos. A interpolação linear utilizada em conjunto com o estimador de sinal se demonstraram práticos e eficientes, uma vez que os resultados mostrados na navegação autônoma foram próximos aos fornecidos pelas simulações. Ainda assim, é preciso considerar que todo o experimento foi realizado dentro de um ambiente controlado.

As informações do mapa resultante desse processo são passadas para um grafo que é usado como base para o algoritmo de Dijkstra bidirecional encontrar um caminho que maximize a potência entre os dois pontos. Dessa forma, o planejador priorizou os locais com melhor qualidade do sinal de rádio e conseqüentemente diminuiu o risco de perda de comunicação com a base. Testes práticos também demonstraram a eficiência do planejador em aumentar a conexão do sinal de rádio entre dois pontos.

O ajuste da potência para calcular os pesos de cada borda do gráfico mostra a importância de acrescentar modularidade, priorizando o sinal de rádio ou o sinal junto com a distância total percorrida. Outro ponto importante é que ao aumentar a potência na fórmula de peso dos caminhos e priorizar o sinal de rádio, o caminho planejado começa a apresentar curvas sinuosas, aumentando o consumo de energia.

### 6.1. Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, serão realizados mais testes com foco em locais com menor ou nenhum sinal de rádio. Atualmente, o planejador não garante que o robô não perca a comunicação. Desta forma, alguns experimentos devem ser realizados visando a qualidade mínima do sinal que torna a operação com o robô inviável. Com estes dados, é possível atribuir ao planejador uma faixa na qual o robô não pode transitar, retirando os nós do grafo que não atendam a esses requisito de sinal mínimo. Esta abordagem pode ser utilizada tanto em rotas autônomas, com o robô planejando o caminho apenas para locais com boa qualidade do sinal, quanto para operações teleoperadas, de forma que o robô disponibilize em tempo hábil as informações para o operador, para que este saiba dos possíveis locais transitáveis de forma que não haja baixa qualidade do sinal de rádio.

Outro ponto que pode ser alterado é a geração do caminho planejado atenuando os deslocamentos angulares. Para o sistema de navegação, melhorias serão realizadas de forma a diminuir o tempo de parada do robô para atualizar o mapa e planejar a rota, deixando a navegação dinâmica.

Para o previsor de sinal, a abordagem utilizada considera apenas uma fórmula de atenuação de sinal em larga escala, sem considerar alguns fenômenos como multi-caminho, sombreamento, efeito de quinas e reflexão do sinal. Logo, esses fenômenos podem ser adicionados ao cálculo de estimação do sinal para aumentar a confiabilidade do sistema de predição.

Já o sistema de navegação também pode ser adaptado para operações com múltiplos robôs. Há situações em que o robô pode realizar a exploração do local, mapeando e colhendo o sinal, porém isto não garante que a operação de inspeção seja realizada por completo. Este sistema vai apenas realizar a exploração até os locais de possível acesso. Logo, há situações que para realizar a inspeção completa do local é necessário o uso de múltiplos robôs. Desta forma, o planejador de caminhos, em conjunto com o sistema de navegação, pode ser utilizado por vários robôs, visando manter a conexão entre eles.

# Referências Bibliográficas

- ALONAZI, A., MA, Y., TAFAZOLLI, R. “**Delaunay Triangulation Based Interpolation for Radio Map Construction with Reduced Calibration**”. Em: **2017 9th IEEE-GCC Conference and Exhibition (GCCCE)**, pp. 1–9, 2017. doi: 10.1109/IEEEGCC.2017.8448199.
- AZPURUA, H., ROCHA, F., GARCIA, G., et al.. “**EspeleoRobô - a robotic device to inspect confined environments**”. Em: **2019 19th Int. Conf. on Advanced Robotics (ICAR)**. IEEE, dez. 2019.
- AZPÚRUA, H., REZENDE, A., POTJE, G., et al.. “**Towards Semi-autonomous Robotic Inspection and Mapping in Confined Spaces with the EspeleoRobô**”, **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 101, n. 4, mar. 2021. doi: 10.1007/s10846-021-01321-5.
- AZPÚRUA, H., SABOIA, M., FREITAS, G. M., et al.. “**A Survey on the autonomous exploration of confined subterranean spaces: Perspectives from real-world and industrial robotic deployments**”, **Robotics and Autonomous Systems**, v. 160, pp. 104304, 2023. ISSN: 0921-8890. doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104304>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889022001932>>.
- BATALIN, M., SUKHATME, G., HATTIG, M. “**Mobile robot navigation using a sensor network**”. Em: **IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004**, v. 1, pp. 636–641 Vol.1, 2004. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1307220.
- BI, J., WANG, Y., CAO, H., et al.. “**A method of radio map construction based on crowdsourcing and interpolation for wi-fi positioning system**”. Em: **2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)**, pp. 1–6. IEEE, 2018.
- BISWAS, J., VELOSO, M. “**WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots**”. Em: **2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, pp. 4379–4384, 2010. doi: 10.1109/ROBOT.2010.5509842.

- BOTEV, Z. I., KROESE, D. P., RUBINSTEIN, R. Y., et al.. “**Chapter 3 - The Cross-Entropy Method for Optimization**”. Em: Rao, C., Govindaraju, V. (Eds.), **Handbook of Statistics**, v. 31, **Handbook of Statistics**, Elsevier, pp. 35–59, 2013. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53859-8.00003-5>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444538598000035>>.
- CLARK, L., EDLUND, J. A., NET, M. S., et al.. “**PropEM-L: Radio Propagation Environment Modeling and Learning for Communication-Aware Multi-Robot Exploration**”. 2022. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2205.01267>>.
- DIJKSTRA, E. “**A note on two problems in connexion with graphs**”, *Numerische Mathematik*, v. 1, pp. 269–271, 1959.
- EVENNOU, F., MARX, F. “**Advanced integration of WiFi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning**”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, v. 2006, pp. 1–11, 2006.
- GETREUER, P. “**Linear methods for image interpolation**”, *Image Processing On Line*, v. 1, pp. 238–259, 2011.
- GIESBRECHT, J. “**Global path planning for unmanned ground vehicles.**” in *Technical report, Defence Research and Development Canada*, 2004.
- GOLDBERG, A., HARRELSON, C. **Computing the Shortest Path: A\* Search Meets Graph Theory**. Relatório Técnico MSR-TR-2004-24, July 2004. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/computing-the-shortest-path-a-search-meets-graph-theory/>>.
- GRISSETTI, G., STACHNISS, C., BURGARD, W. “**Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters**”, *IEEE Transactions on Robotics*, v. 23, n. 1, pp. 34–46, 2007.
- HAGBERG, A. A., SCHULT, D. A., SWART, P. J. “**Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX**”. Em: Varoquaux, G., Vaught, T., Millman, J. (Eds.), **Proceedings of the 7th Python in Science Conference**, pp. 11 – 15, Pasadena, CA USA, 2008.
- HART, P., NILSSON, N., RAPHAEL, B. “**A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths**”, *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, v. 4, pp. 100–107, 1968.
- JÚNIOR, G. P. C., REZENDE, A. M. C., MIRANDA, V. R. F., et al.. “**EKF-LOAM: An Adaptive Fusion of LiDAR SLAM With Wheel Odometry and Inertial Data for Confined Spaces With Few Geometric Features**”, *IEEE Trans. on Automation*

- Science and Engineering**, v. 19, n. 3, pp. 1458–1471, 2022. doi: 10.1109/TASE.2022.3169442.
- KATAGIRI, K., SATO, K., INAGE, K., et al.. “**Radio Map Extrapolation Using Compensated Empirical CDF Under Interference-Limited Observations**”, **IEEE Access**, v. 10, pp. 54936–54946, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3174702.
- KRUMM, J., PLATT, J. “**Minimizing calibration effort for an indoor 802.11 device location measurement system**”, **Microsoft Research**, 2003.
- LAVALLE, S. M., OTHERS. “**Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning**”, 1998.
- LI, H., ALMEIDA, L., CARRAMATE, F., et al.. “**Connectivity-aware motion control among autonomous mobile units**”. Em: **2008 International Symposium on Industrial Embedded Systems**, pp. 155–162, 2008. doi: 10.1109/SIES.2008.4577694.
- MARTZ, J., AL-SABBAN, W., SMITH, R. N. “**Survey of unmanned subterranean exploration, navigation, and localisation**”, **IET Cyber-systems and Robotics**, v. 2, n. 1, pp. 1–13, 2020.
- MURALIDHARAN, A., MOSTOFI, Y. “**Communication-aware robotics: Exploiting motion for communication**”, **Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems**, v. 4, pp. 115–139, 2021.
- NICHOLSON, T. A. J. “**Finding the shortest route between two points in a network**”, **The Computer Journal**, v. 9, n. 3, pp. 275–280, 1966.
- PARASURAMAN, R., MIN, B.-C., OGREN, P. “**Rapid prediction of network quality in mobile robots**”, **Ad Hoc Networks**, p. 103014, 2022. ISSN: 1570-8705. doi: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103014>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157087052200186X>>.
- PHILLIPS, C., SICKER, D., GRUNWALD, D. “**A Survey of Wireless Path Loss Prediction and Coverage Mapping Methods**”, **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 15, n. 1, pp. 255–270, 2013. doi: 10.1109/SURV.2012.022412.00172.
- QUIGLEY, M., CONLEY, K., GERKEY, B., et al.. “**ROS: an open-source Robot Operating System**”. Em: **ICRA workshop on open source software**, v. 3, p. 5. Kobe, Japan, 2009.
- RAPPAPORT, T. S. “**Wireless Communications–Principles and Practice, (The Book End)**”, **Microwave Journal**, v. 45, n. 12, pp. 128–129, 2002.

- REMCOM. “**Wireless InSite - 3D Wireless Prediction Software**”. 2023. Disponível em: <<https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software>>. Acesso em: **2023-08-30**.
- REZENDE, A., FREITAS, G. M., PESSIN, G., et al. “**VectorFieldStack Controle de Navegação de Robôs Móveis por Campos Vetoriais Artificiais**”. 2022a. **Pedido de patente - BR 51 2022 000695-2**.
- REZENDE, A. M. C., GONCALVES, V. M., PIMENTA, L. C. A. “**Constructive Time-Varying Vector Fields for Robot Navigation**”, *IEEE Transactions on Robotics*, v. 38, n. 2, pp. 852–867, 2022b. doi: 10.1109/TRO.2021.3093674.
- SANTOS, A. S. “**Planejamento de caminhos para robôs móveis em ambientes acidentados**.” Em: **Mestrado em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019**.
- SHAN, T., ENGLLOT, B. “**Lego-loam: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain**”. Em: **2018 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, pp. 4758–4765. IEEE, 2018.
- SHAW, J. A. “**Radiometry and the Friis transmission equation**”, *American Journal of Physics*, v. 81, n. 1, pp. 33–37, jan. 2013. doi: 10.1119/1.4755780. Disponível em: <<https://doi.org/10.1119/1.4755780>>.
- SILVA, B., FISHER, R. M., KUMAR, A., et al. “**Experimental Link Quality Characterization of Wireless Sensor Networks for Underground Monitoring**”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 11, n. 5, pp. 1099–1110, 2015. doi: 10.1109/TII.2015.2471263.
- STENTZ, A. “**Optimal and efficient path planning for partially-known environments**”, in **Robotics and Automation, IEEE International Conference**, pp. 3310–3317, 1994.
- SUH, J., OH, S. “**A cost-aware path planning algorithm for mobile robots**”. Em: **2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, pp. 4724–4729, 2012. doi: 10.1109/IROS.2012.6386237.
- TALVITIE, J., RENFORS, M., LOHAN, E. S. “**Distance-based interpolation and extrapolation methods for RSS-based localization with indoor wireless signals**”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 64, n. 4, pp. 1340–1353, 2015.

- THIAGO FILHO, A. M. D. S. “**Implementação da plataforma tecnológica embarcada em um dispositivo robótico móvel para inspeção de ambientes confinados: Espeleorobô.**” 2019.
- THRUN, S. “**Learning occupancy grid maps with forward sensor models**”, *Autonomous robots*, v. 15, pp. 111–127, 2003.
- THRUN, S., FOX, D., BURGARD, W., et al.. “**Robust Monte Carlo localization for mobile robots**”, *Artificial Intelligence*, v. 128, n. 1-2, pp. 99–141, 2001.
- TRÉMAUX, P. “**École Polytechnique of Paris (X: 1876)**”, *French Engineer of the Telegraph in Public Conference*, v. 2, pp. 580–603, 2010.
- VIRTANEN, P., GOMMERS, R., OLIPHANT, T. E., et al.. “**SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python**”, *Nature Methods*, v. 17, pp. 261–272, 2020. doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- VLAVIANOS, A., LAW, L. K., BROUSTIS, I., et al.. “**Assessing link quality in IEEE 802.11 Wireless Networks: Which is the right metric?**” pp. 1–6, 2008. doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699837.
- XIE, H., YANG, D., XIAO, L., et al.. “**Connectivity-Aware 3D UAV Path Design With Deep Reinforcement Learning**”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 70, n. 12, pp. 13022–13034, 2021. doi: 10.1109/TVT.2021.3121747.
- YANG, H., ZHANG, J., SONG, S., et al.. “**Connectivity-Aware UAV Path Planning with Aerial Coverage Maps**”. Em: **2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)**. IEEE, abr. 2019. doi: 10.1109/wcnc.2019.8886129. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/wcnc.2019.8886129>>.
- ZHAO, H., HUANG, B., JIA, B. “**Applying kriging interpolation for WiFi fingerprinting based indoor positioning systems**”. Em: **2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference**, pp. 1–6. IEEE, 2016.