CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ALINE GABRIELA LOIOLA ALMEIDA

COOPERAÇÃO ROBÓTICA PARA *PICK-AND-PLACE* DE OBJETOS ASSIMÉTRICOS

Leopoldina

2026

ALINE GABRIELA LOIOLA ALMEIDA

COOPERAÇÃO ROBÓTICA PARA *PICK-AND-PLACE* DE OBJETOS ASSIMÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Vinícius Barbosa Schettino

Leopoldina

2026

Almeida, Aline Gabriela Loiola.
A447c Cooperação robótica para *pick-and-place* de objetos assimétricos. / Aline Gabriela Loiola Almeida. – 2026.
52 f. : il., gráfs.

Orientador: Vinícius Barbosa Schettino.
Bibliografia: f. 48-49.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, *Campus* Leopoldina, apresentada ao curso de Engenharia e Controle e Automação. Departamento de Eletroeletrônica, 2026.

1. Robôs industriais. 2. Robótica. 3. Manipuladores mecânicos. 4. Simulação de sistemas. 5. Assimetria. I. Schettino, Vinícius Barbosa. II. Título.

CDU: 621.865.8

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Luzia Adriana Damasceno, CRB 6º-2305 / CEFET-MG *campus* Leopoldina.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - LP

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 7/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 17 de junho de 2026.

ALINE GABRIELA LOIOLA ALMEIDA

COOPERAÇÃO ROBÓTICA PARA PICK-AND-PLACE DE OBJETOS ASSIMÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Leopoldina, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em 18 de junho de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. D. Sc. Vinícius Barbosa Schettino (CEFET-MG) – Presidente
Prof. D. Sc. Accacio Ferreira do Santos Neto (CEFET-MG)
Prof. D. Eng. Wolmar Araujo Neto (CEFET-MG)

Leopoldina
2026

(Assinado digitalmente em 18/06/2026 16:00)
ACCACIO FERREIRA DOS SANTOS NETO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###317#7

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 09:52)
VINICIUS BARBOSA SCHETTINO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###138#3

(Assinado digitalmente em 22/06/2026 08:21)
WOLMAR ARAUJO NETO
PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO
DEELP (11.61.04)
Matrícula: ###062#7

Processo Associado: 23062.031149/2026-59

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **7**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **17/06/2026** e o código de verificação: **ef7126e611**

Dedico este trabalho à minha mãe, Lucineia, por
ser uma mulher batalhadora, pelo amor incondicional,
por todo o sacrifício e por sempre me ensinar
que a educação é o melhor caminho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus, que me conduziu, fortaleceu e abençoou em cada passo desta caminhada. A Ele toda honra e toda glória.

Agradeço à minha família, que mesmo de longe, sempre se fez presente por meio de orações, amor, apoio e incentivo. Em especial, agradeço aos meus pais, Lucineia e Evangelo, por todo o sacrifício e amor incondicional. Esta conquista é reflexo direto da educação, dos valores e dos ensinamentos que me transmitiram.

Ao meu orientador, Vinícius Barbosa Schettino, agradeço imensamente pela confiança depositada em mim e pela excelência na condução deste trabalho. Seus ensinamentos foram essenciais não apenas para o desenvolvimento desta pesquisa, mas também para minha formação pessoal e profissional.

Agradeço ao meu namorado, Dércio Manique, por estar ao meu lado durante todos os desafios deste trabalho. Obrigada pela parceria, pelas palavras de incentivo e pelo apoio constante.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, agradeço por tornarem essa trajetória mais leve, especial e significativa. O apoio e a companhia de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Agradeço a cada professor e servidor do CEFET-MG que contribuiu para este momento. Levarei comigo os ensinamentos, as experiências e os aprendizados compartilhados durante a minha formação.

Por fim, expresso minha gratidão a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho.

Muito obrigada a todos!

“ Para que todos vejam, e saibam, e considerem, e juntamente entendam que a mão do Senhor fez isto.”

Isaías 41:20

RESUMO

A robótica cooperativa tem se consolidado como uma área de grande relevância em diversas aplicações, especialmente em tarefas de *pick-and-place*. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um sistema cooperativo entre um veículo terrestre não tripulado (UGV) e um braço robótico de base fixa, voltado à manipulação de objetos assimétricos. O estudo é motivado pela influência da orientação do objeto transportado pelo UGV sobre a viabilidade da apreensão realizada pelo manipulador. Para tratar esse desafio, foi proposto um algoritmo de reorientação do UGV, responsável por buscar uma orientação mais favorável para a execução da tarefa. O sistema foi avaliado em ambientes simulado e real, com experimentos comparando o desempenho com e sem a aplicação do algoritmo. Em simulação, o uso do algoritmo elevou a taxa média de sucesso de 22,5% para 80,8%. Nos testes em ambiente real, a taxa de sucesso passou de 34,4%, sem o algoritmo, para 78,1%, com o algoritmo, representando um aumento relativo de aproximadamente 127,3%. Além disso, o número de falhas foi reduzido de 21 para 7 ocorrências, correspondendo a uma redução de 66,7%. Os resultados demonstram que a orientação do objeto em relação ao manipulador influencia diretamente a viabilidade da apreensão e que a estratégia de reorientação do UGV contribui para melhorar o desempenho do sistema cooperativo em tarefas de *pick-and-place* com objetos assimétricos.

Palavras-chave: robótica cooperativa; UGV; manipulador robótico; *pick-and-place*; objetos assimétricos.

ABSTRACT

Cooperative robotics has become an area of great relevance in several applications, especially in pick-and-place tasks. This work presents the development and evaluation of a cooperative system composed of a UGV and a fixed-base robotic arm, aimed at the manipulation of asymmetric objects. The study is motivated by the influence of the orientation of the object transported by the UGV on the feasibility of the grasp performed by the manipulator. To address this challenge, a UGV reorientation algorithm was proposed, responsible for searching for a more favorable orientation for the execution of the task. The system was evaluated in simulated and real environments, with experiments comparing the performance with and without the application of the algorithm. In simulation, the use of the algorithm increased the average success rate from 22.5% to 80.8%. In the real-environment tests, the success rate increased from 34.4%, without the algorithm, to 78.1%, with the algorithm, representing a relative increase of approximately 127.3%. In addition, the number of failures was reduced from 21 to 7 occurrences, corresponding to a reduction of 66.7%. The results demonstrate that the orientation of the object in relation to the manipulator directly influences grasp feasibility and that the UGV reorientation strategy contributes to improving the performance of the cooperative system in pick-and-place tasks with asymmetric objects.

Keywords: cooperative robotics; UGV; robotic manipulator; pick-and-place; asymmetric objects.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - LP

TERMO DE RESPONSABILIDADE Nº 135/2026 - CECALP (11.51.20)

Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO

Leopoldina-MG, 17 de junho de 2026.

Eu, **ALINE GABRIELA LOIOLA ALMEIDA**, matrícula **20213002538**, discente do Curso de Engenharia de Controle e Automação, declaro para os devidos fins, que o presente Trabalho de Conclusão de Curso, de título **COOPERAÇÃO ROBÓTICA PARA PICK-AND-PLACE DE OBJETOS ASSIMÉTRICOS.** é de minha autoria e que estou ciente dos:

- Artigos 297 a 299 do Código Penal;
- Decreto-Lei n.º 2.848 de 7 de dezembro de 1940;
- Lei n.º 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, sobre os Direitos Autorais;
- Regulamento Disciplinar Discente do CEFET-MG;
- E que plágio consiste na reprodução de obra alheia e submissão dela como trabalho próprio ou na inclusão, em trabalho próprio, de ideias, textos, tabelas ou ilustrações (quadros, figuras, gráficos, fotografias, retratos, lâminas, desenhos, organogramas, fluxogramas, plantas, mapas e outros) transcritos de obras de terceiros sem a devida e correta citação da referência.

Por ser verdade, e por ter ciência do referido artigo, firmo a presente declaração, isentando o (a) professor(a) **D. Sc. Vinícius Barbosa Schettino** (orientador), os membros da banca examinadora e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, de qualquer responsabilidade.

(Assinado digitalmente em 23/06/2026 10:03)
Aline Gabriela Loiola Almeida
DISCENTE
Matrícula: 2021######8

Processo Associado: 23062.031149/2026-59

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp informando seu número: **135**, ano: **2026**, tipo: **TERMO DE RESPONSABILIDADE**, data de emissão: **17/06/2026** e o código de verificação: **596931288a**

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Ambiente de simulação desenvolvido no Gazebo. 24
Figura 3.2 – Representação conceitual da comunicação entre os principais módulos utilizados na simulação. 25
Figura 3.3 – Ambiente experimental utilizado para a cooperação entre o TurtleBot 4 e o manipulador robótico Niryo Ned2. 27
Figura 3.4 – Câmera acoplada ao manipulador robótico para identificação do marcador visual. 28
Figura 3.5 – Marcador visual AprilTag posicionado sobre o objeto para estimativa de pose. 28
Figura 3.6 – Fluxo simplificado do algoritmo de reorientação do UGV aplicado à tarefa cooperativa de *pick-and-place*. 31
Figura 4.1 – Deslocamento autônomo do UGV até a região de cooperação: a) pose inicial do robô móvel, b) deslocamento pelo ambiente mapeado e c) chegada à região de cooperação. 32
Figura 4.2 – Avaliação de diferentes orientações do UGV na cena de planejamento do MoveIt durante a aplicação do algoritmo de reorientação: a) configuração inicial sem apreensão viável, b) nova orientação avaliada pelo algoritmo e c) configuração favorável para a apreensão. 33
Figura 4.3 – Execução bem-sucedida da tarefa cooperativa em ambiente simulado: a) UGV estacionado na região de cooperação, b) reorientação do UGV após a aplicação do algoritmo, c) aproximação do manipulador, d) apreensão do objeto, e) elevação do objeto e f) posicionamento na mesa de destino. 34
Figura 4.4 – Objetos utilizados nos experimentos em ambiente simulado: a) objeto assimétrico 1, b) objeto assimétrico 2, c) objeto assimétrico 3 e d) objeto simétrico. 35
Figura 4.5 – Comparação das taxas de sucesso obtidas nos experimentos realizados sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV. 37
Figura 4.6 – Sequência do deslocamento autônomo do UGV no mapa do ambiente real: a) pose inicial do robô móvel, b) deslocamento durante a navegação e c) chegada à região de cooperação. 38

Figura 4.7 – Avaliação de diferentes orientações do UGV na cena de planejamento do MoveIt 2: a) configuração inicial avaliada, sem apreensão viável; b) nova orientação analisada pelo algoritmo de reorientação; e c) configuração favorável para a execução da apreensão. 39
Figura 4.8 – Sequência da execução da tarefa cooperativa em ambiente real: a) pose inicial do UGV, b) navegação até a região de cooperação, c) chegada e identificação da pose do objeto, d) rotação do UGV após a aplicação do algoritmo de reorientação, e) apreensão do objeto e f) posicionamento na mesa de destino. 39
Figura 4.9 – Objeto utilizado durante os testes em ambiente real. 40
Figura 4.10 – Primeiro cenário experimental utilizado nos testes em ambiente real. 41
Figura 4.11 – Segundo cenário experimental utilizado nos testes em ambiente real. 41
Figura 4.12 – Configurações de orientação do objeto em relação ao braço robótico avaliadas durante os experimentos em ambiente real. 42
Figura 4.13 – Diagrama de Sankey dos resultados obtidos nos testes realizados sem a aplicação do algoritmo de reorientação. 44
Figura 4.14 – Diagrama de Sankey dos resultados obtidos nos testes realizados com a aplicação do algoritmo de reorientação. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resultados obtidos durante os testes realizados sem a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV. 35
Tabela 4.2 – Resultados obtidos durante os testes realizados com a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV. 36
Tabela 4.3 – Comparação entre as taxas de erro obtidas nos testes realizados sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV. 36
Tabela 4.4 – Comparação dos resultados obtidos nos testes em ambiente real sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação. 43
Tabela 4.5 – Distribuição das ocorrências registradas nas etapas dos testes em ambiente real sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação. 43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IMU unidade de medição inercial

OMPL biblioteca aberta de planejamento de movimento

ROS sistema operacional robótico

SLAM localização e mapeamento simultâneos

UGV veículo terrestre não tripulado

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**17**
1.1	**Objetivos**	**17**
1.2	**Organização do trabalho**	**18**
2	**TRABALHOS RELACIONADOS**	**19**
3	**METODOLOGIA**	**23**
3.1	**Implementação em ambiente simulado**	**23**
3.2	**Implementação em ambiente real**	**26**
3.3	**Algoritmo de reorientação**	**29**
4	**TESTES E RESULTADOS**	**32**
4.1	**Ambiente de simulação**	**32**
4.1.1	**Determinação dos testes realizados**	**32**
4.1.2	**Resultados**	**35**
4.2	**Ambiente real**	**37**
4.2.1	**Determinação dos testes realizados**	**37**
4.2.2	**Resultados**	**42**
5	**CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**	**46**
5.1	**Trabalhos futuros**	**47**
	REFERÊNCIAS	**48**
	APÊNDICE A – Modelo cinemático do robô móvel TurtleBot 4 Standard	**50**
	APÊNDICE B – Modelo cinemático do braço robótico Niryo Ned2	**51**

1 INTRODUÇÃO

A robótica vem revolucionando diversos setores da sociedade e possui potencial para impactar significativamente o cotidiano das pessoas. Entre as áreas de destaque, encontra-se a cooperação entre veículos terrestres não tripulados (UGVs) e braços robóticos, devido às inúmeras aplicações que essa integração pode oferecer. Setores como logística, manufatura e serviços automatizados têm avançado com a adoção de sistemas cooperativos, proporcionando maior eficiência, flexibilidade e autonomia aos processos industriais (PIETRANTONI et al., 2024; SLAVOV; SLAVOVA, 2025).

Nesse contexto, tarefas cooperativas de *pick-and-place* são amplamente utilizadas em ambientes industriais e logísticos, exigindo precisão, coordenação e integração entre diferentes subsistemas robóticos (SANDAKALUM; ANG, 2022; GIAMPÀ, 2024). Essas tarefas são frequentemente empregadas em processos de transporte, separação, organização e manipulação de objetos, contribuindo para a automação de atividades repetitivas e para o aumento da eficiência operacional (LI et al., 2023; SOBHAN; SHAIKAT, 2021).

Entretanto, a integração entre UGVs e braços robóticos apresenta desafios relacionados ao posicionamento da plataforma móvel, planejamento de movimento, sincronização entre os sistemas e execução eficiente das tarefas de manipulação (RAMALEPA; JAMISOLA, 2021). Entre esses desafios, destaca-se a necessidade de posicionamento adequado do UGV em relação ao manipulador robótico, de modo a garantir a viabilidade das operações de transferência e apreensão de objetos, evitar colisões e assegurar a correta execução das tarefas cooperativas (SAINI et al., 2025; YANG et al., 2022).

Adicionalmente, o uso de objetos assimétricos introduz novas dificuldades ao processo de manipulação, reduzindo o número de posições viáveis para a captura do objeto. Nessas situações, o ponto ideal de apreensão pode variar de acordo com a orientação do objeto, tornando o planejamento da trajetória e a execução da tarefa ainda mais desafiadores ou até mesmo inviáveis (WADA; JAMES; DAVISON, 2022). Dessa forma, torna-se necessária a utilização de estratégias que permitam aumentar a precisão e a flexibilidade do sistema cooperativo.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema cooperativo entre robôs heterogêneos, composto por um UGV e um braço robótico de base fixa, para a execução de

tarefas de *pick-and-place* com objetos assimétricos, visando aumentar a eficiência em processos de manipulação.

Para alcançar tal finalidade, serão desenvolvidas as seguintes etapas:

a) realizar uma revisão bibliográfica sobre a cooperação entre robôs móveis e braços robóticos aplicados à manipulação de objetos;

b) criar um ambiente de simulação que permita a cooperação entre um UGV e um manipulador robótico para a execução das operações propostas;

c) desenvolver um algoritmo de reorientação para o UGV, com foco em reduzir falhas operacionais e aumentar a taxa de sucesso durante a manipulação de objetos com geometria assimétrica;

d) implementar o sistema em ambiente real;

e) realizar experimentos nos ambientes desenvolvidos para avaliar o desempenho do sistema e a eficiência do algoritmo proposto.

Além dos objetivos apresentados, destaca-se que os resultados obtidos em ambiente simulado durante o desenvolvimento deste trabalho foram publicados no artigo intitulado *Collaboration between UGV and robotic arm for pick and place tasks* (ALMEIDA et al., 2025).

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, são apresentados os trabalhos relacionados ao tema, destacando abordagens aplicadas à cooperação entre UGVs e braços robóticos em operações de *pick-and-place*. No Capítulo 3, é descrita a metodologia adotada no desenvolvimento do sistema cooperativo, incluindo a implementação em ambiente simulado, em ambiente real e o algoritmo de reorientação proposto. O Capítulo 4 apresenta os testes realizados em ambos os cenários, bem como os resultados obtidos, permitindo a análise do desempenho e eficiência do algoritmo desenvolvido. Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

A robótica cooperativa tem impulsionado pesquisas relacionadas à integração entre UGVs e manipuladores robóticos, abrangendo temas como planejamento de movimento, sincronização entre sistemas e operações cooperativas de *pick-and-place*. Dessa forma, este capítulo apresenta os principais trabalhos relacionados ao tema, destacando estratégias, aplicações e desafios encontrados na literatura.

Sze, Reyes e Abu (2024) descreveram a simulação de uma aplicação cooperativa de *pick-and-place* para o manuseio de cartões eletrônicos, utilizando a plataforma móvel KUKA OmniRob e o manipulador colaborativo de dois braços YuMi no ambiente CoppeliaSim. Na abordagem proposta, o robô móvel realiza o transporte dos cartões até a posição de destino por meio de técnicas de planejamento implementadas com a biblioteca aberta de planejamento de movimento (OMPL). Após o posicionamento da plataforma, o manipulador executa a tarefa sobre cartões empilhados verticalmente, utilizando cinemática inversa. O trabalho foi dividido em duas subtarefas principais: o deslocamento da plataforma móvel até as coordenadas desejadas e a manipulação dos cartões pelo braço robótico. Os testes em ambiente simulado validaram a integração entre navegação e manipulação, demonstrando que o sistema foi capaz de transportar os cartões até as posições estabelecidas e concluir as operações propostas. Além disso, os autores analisaram o consumo energético das juntas do manipulador, permitindo avaliar aspectos relacionados ao desempenho e à viabilidade da aplicação em cenários reais.

Stibinger et al. (2021) apresentaram um sistema robótico autônomo para localização, apreensão, transporte e posicionamento preciso de materiais de construção em ambientes semiestruturados, utilizando o sistema operacional robótico (ROS). A abordagem proposta emprega uma plataforma Husky A200 equipada com o manipulador Kinova Gen3 de 7 graus de liberdade, sensores de percepção e uma garra magnética projetada para a manipulação dos blocos. Para a detecção dos materiais, os autores utilizaram dados de sensores LiDAR e câmeras de profundidade, permitindo identificar os blocos em diferentes condições de iluminação. Os experimentos foram conduzidos em ambiente real, demonstrando a capacidade do sistema de executar autonomamente o ciclo completo da tarefa proposta. No entanto, os autores destacaram que, quando o objeto-alvo estava fora da região de alcance do braço, o sistema dependia de pequenos ajustes de posicionamento do robô móvel para viabilizar a tarefa, evidenciando a importância da configuração relativa entre a plataforma e o manipulador para o sucesso da

operação.

Yang e Yang (2023) propuseram um sistema de posicionamento relativo entre um robô móvel TurtleBot3 Burger e um manipulador UR10e, baseado em fusão multissensorial, com o objetivo de permitir que o manipulador identificasse a posição do robô móvel durante operações cooperativas de alimentação e apreensão de peças. Para essa estimativa, foram integrados sensores ultrassônicos, uma unidade de medição inercial (IMU), um marcador ArUco fixado ao robô móvel e uma câmera monocular instalada no efetuador do manipulador. A abordagem combinou visão computacional com uma estratégia de fusão sensorial baseada em Filtro de Kalman Estendido, possibilitando a troca automática entre métodos de posicionamento em situações de falha na detecção visual do marcador.

Além disso, os autores apresentaram um modo de interação baseado na distância relativa entre os robôs, definindo se o manipulador deve permanecer parado, mover-se em direção ao robô móvel ou interromper o movimento por critérios de segurança e identificação. O modo de interação foi inicialmente validado em simulação, considerando diferentes distâncias relativas entre os robôs. Já a estratégia de posicionamento foi avaliada em experimentos físicos estáticos e dinâmicos, comparando o método visual, a fusão multissensorial e a estimativa baseada nos encoders de roda. Os resultados indicaram que o marcador ArUco apresentou boa precisão quando disponível, enquanto a fusão entre sensores ultrassônicos e IMU reduziu os desvios de posicionamento em comparação ao uso isolado dos encoders de roda. Além disso, a estratégia de troca automática entre os métodos permitiu a continuidade da estimativa em situações de falha na percepção visual.

Yang et al. (2022) desenvolveram uma arquitetura cooperativa composta por um robô móvel TurtleBot3 Burger, um manipulador robótico KUKA, um subsistema de visão computacional e integração com o ROS. A proposta foi voltada ao transporte e posicionamento de mantas de fibra em processos de fabricação de materiais compósitos, tendo como objetivo avaliar a viabilidade de uma solução robótica para transportar, localizar, apreender e posicionar materiais deformáveis durante o processo de laminação. Na abordagem proposta, o robô móvel transporta autonomamente o material até uma posição predefinida dentro da região de alcance do manipulador. Em seguida, o sistema de visão realiza a localização da manta por meio de marcadores ArUco e estima a orientação das fibras utilizando um método baseado na Transformada de Fourier combinada com ajuste de linhas por mínimos quadrados. Essas informações são utilizadas para orientar a apreensão e o posicionamento do material pelo manipulador.

O sistema foi analisado por meio de simulações no CoppeliaSim e experimentos em ambiente real. Os resultados indicaram que a integração entre navegação, visão computacional e manipulação permitiu a execução da tarefa cooperativa, além de evidenciar que erros de posicionamento do robô móvel podem gerar desalinhamentos entre o material transportado e o efetuador do manipulador. Dessa forma, o trabalho destaca a importância da localização precisa da plataforma móvel e da estimativa da orientação do material para o sucesso de operações cooperativas envolvendo materiais deformáveis.

Wada, James e Davison (2022) propuseram o *ReorientBot*, uma abordagem baseada em aprendizado de máquina que permite ao manipulador alterar a orientação do objeto quando a pose inicial não favorece sua apreensão nem o posicionamento direto na configuração final desejada. Para isso, os autores desenvolveram um *pipeline* que integra uma câmera RGB-D acoplada ao manipulador, utilizada para a compreensão da cena, a estimativa da pose do objeto-alvo e a reconstrução volumétrica dos demais objetos presentes no ambiente. A partir dessas informações, o sistema seleciona pontos de passagem por meio de modelos aprendidos e utiliza planejamento de movimento para gerar trajetórias livres de colisão.

O método foi avaliado em simulação e demonstrado em experimentos reais, nos quais o sistema foi integrado a um manipulador Franka Emika Panda utilizando o ROS. Nos testes simulados, o *ReorientBot* apresentou aumento na taxa de sucesso geral em comparação com uma abordagem heurística baseada em poses de reorientação definidas manualmente, elevando os resultados de 58,2% para 93,2% em uma das configurações de efetuador e de 43,2% para 78,1% em outra configuração avaliada. Além disso, os autores relataram redução no tempo de planejamento e execução da etapa de reorientação, indicando que a seleção aprendida de pontos de passagem contribuiu para aumentar a taxa de sucesso e tornar essa etapa mais eficiente.

A análise desses trabalhos permitiu observar contribuições relevantes para a cooperação entre UGVs e manipuladores robóticos. O trabalho de Sze, Reyes e Abu (2024) aborda tarefas cooperativas de *pick-and-place*, porém restringe-se ao ambiente simulado e não tem como foco a manipulação de objetos assimétricos. Em Stibinger et al. (2021), o ajuste da base móvel é necessário devido ao alcance limitado do manipulador; no entanto, o sistema utiliza um manipulador móvel, diferindo da proposta deste trabalho. Yang e Yang (2023) destacam a importância do posicionamento relativo entre os robôs, mas com foco na localização, e não na reorientação do UGV para aumentar a viabilidade da apreensão. Já Yang et al. (2022) evidenciam a influência da localização da plataforma móvel e da orientação do material na manipulação

cooperativa, sendo a aplicação voltada a mantas de fibra, e não a objetos assimétricos como neste trabalho. Por fim, Wada, James e Davison (2022) demonstram que a reorientação do objeto pode aumentar a taxa de sucesso da manipulação; contudo, essa ação é executada pelo próprio manipulador, e não pelo UGV. Embora apresente semelhanças com os estudos analisados, este trabalho diferencia-se por propor um algoritmo de reorientação do UGV, voltado à busca de uma orientação mais favorável para a apreensão de objetos assimétricos por um manipulador de base fixa.

3 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho consiste em investigar a cooperação entre um UGV e um braço robótico de base fixa na execução de tarefas de *pick-and-place*. Para isso, o desenvolvimento foi conduzido em duas etapas principais: inicialmente, por meio de simulações, empregadas para a integração e avaliação da arquitetura proposta; e, posteriormente, em ambiente real, com a implementação física da cooperação entre os robôs.

Além disso, foi desenvolvido um algoritmo de reorientação do UGV com o objetivo de aumentar a viabilidade das operações de apreensão realizadas pelo manipulador, especialmente em situações envolvendo objetos com geometria assimétrica. Dessa forma, este capítulo apresenta os procedimentos adotados para o desenvolvimento do sistema, abrangendo as implementações e a descrição do algoritmo proposto.

3.1 Implementação em ambiente simulado

O desenvolvimento do sistema em ambiente simulado foi realizado utilizando o ROS 1, na distribuição Noetic, executada no Ubuntu 20.04. Essa estrutura foi empregada por possibilitar a integração, comunicação e controle dos diferentes componentes robóticos envolvidos na tarefa cooperativa. Para leitores não familiarizados com o ROS, recomenda-se a consulta ao trabalho de Quigley et al. (2009) e aos tutoriais oficiais da plataforma (ROS WIKI, 2022), que apresentam os principais conceitos necessários para o acompanhamento das seções seguintes.

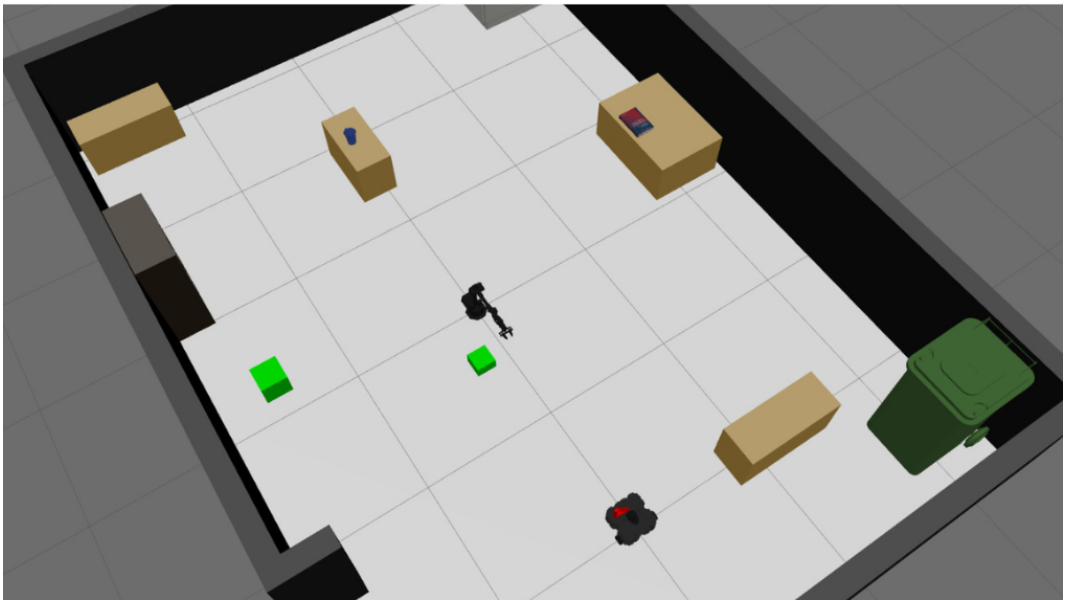
As simulações foram conduzidas no Gazebo, ambiente no qual foi configurado um cenário tridimensional contendo obstáculos distribuídos ao longo do percurso, de modo a exigir o planejamento de trajetórias do UGV. Além disso, o simulador incorpora modelos físicos relevantes, como forças, atrito e colisões, permitindo representar de maneira mais próxima o comportamento esperado dos robôs em uma aplicação real (KOENIG; HOWARD, 2004).

Os modelos utilizados nas simulações foram o robô móvel TurtleBot3 Waffle Pi[1] e o braço robótico WidowX-250 6DOF[2], manipulador com seis graus de liberdade e alcance máximo de 650 mm. Ambos possuem versões físicas comercialmente disponíveis, e seus fabricantes fornecem modelos virtuais gratuitos, o que permitiu sua incorporação direta ao ambiente de simulação. A Figura 3.1 apresenta o ambiente de simulação desenvolvido no Gazebo, incluindo

[1] https://www.turtlebot.com/turtlebot3/
[2] https://docs.trossenrobotics.com/interbotix_xsarms_docs/specifications/wx250s.html

o UGV, o manipulador robótico, o objeto transportado, os obstáculos distribuídos pelo cenário e a mesa de destino utilizada para o depósito do objeto.

Figura 3.1 – Ambiente de simulação desenvolvido no Gazebo.



Fonte: do autor.

Definido o ambiente de simulação, foi estruturada uma arquitetura de comunicação baseada em nós do ROS[3], responsável por integrar os módulos de navegação, manipulação e gerenciamento da tarefa cooperativa. O nó *Controller* atua como elemento central dessa arquitetura, coordenando o fluxo de informações entre o ambiente simulado, o sistema de navegação do UGV e o módulo de planejamento do manipulador.

Para a navegação do UGV, foi utilizado o pacote *move_base*, pertencente ao ROS Navigation Stack[4]. Este pacote disponibiliza um nó de mesmo nome, que fica responsável por receber a pose-alvo enviada pelo *Controller*, representada pelo tópico `/target_pose`, e gerar os comandos de velocidade necessários para conduzir o UGV até a região de cooperação. Durante esse processo, o *move_base* utiliza as informações do sensor de varredura, publicadas no tópico `/scan`, para auxiliar no planejamento da trajetória e no desvio de obstáculos. Como saída, são enviados comandos de velocidade ao robô por meio do tópico `/cmd_vel`, os quais são aplicados no ambiente simulado.

[3] No ROS, um nó corresponde a um executável responsável por realizar uma função específica dentro do sistema, como publicar, receber ou processar informações.

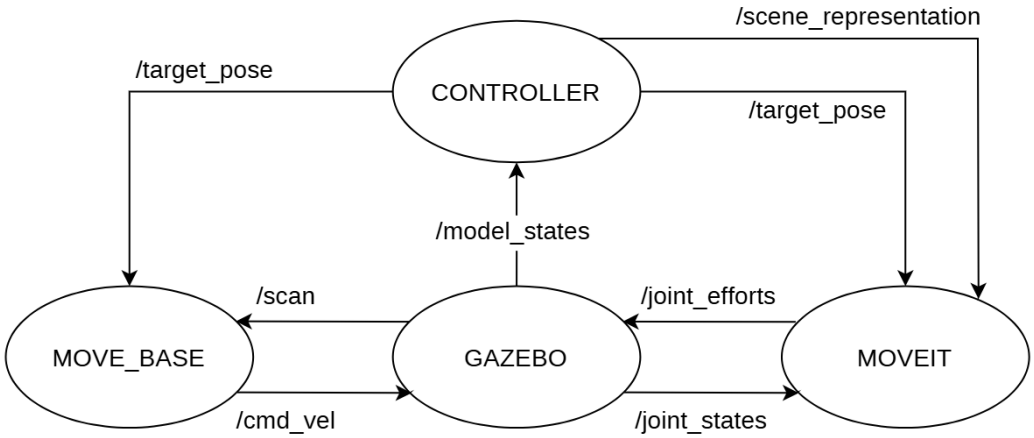
[4] http://wiki.ros.org/navigation

O Gazebo, por sua vez, representa o ambiente de simulação e os modelos robóticos utilizados, sendo responsável por atualizar a dinâmica dos robôs, sensores e objetos presentes na cena. Além de receber os comandos de velocidade do UGV, o simulador fornece informações sobre o estado dos modelos por meio do tópico `/model_states`, permitindo que o *Controller* acompanhe a posição e a orientação dos elementos da cena, como o robô móvel e o objeto transportado.

Já o planejamento e a execução dos movimentos do braço robótico foram realizados com o pacote MoveIt, que utiliza as informações da cena ao redor do robô para calcular trajetórias de manipulação viáveis e comandar sua realização (COLEMAN et al., 2014). Para isso, o MoveIt recebe a representação da cena de planejamento, composta pelo UGV, pelo objeto transportado e pela mesa de destino, além dos estados das juntas do manipulador, disponibilizados pelo tópico `/joint_states`. A partir dessas informações, o MoveIt avalia a viabilidade da apreensão, calcula trajetórias de manipulação e gera os comandos necessários para a movimentação do braço robótico no simulador.

A interação entre esses módulos é apresentada de forma simplificada na Figura 3.2. Nessa representação conceitual, os blocos indicam os principais componentes da arquitetura, enquanto as setas representam o fluxo de informações entre eles. Os nomes associados às setas indicam, de maneira simplificada, os tópicos ou dados trocados durante a execução da tarefa cooperativa.

Figura 3.2 – Representação conceitual da comunicação entre os principais módulos utilizados na simulação.



Fonte: do autor.

A partir dessa arquitetura, foi definido o fluxo de execução da operação proposta.

Inicialmente, o ambiente é mapeado utilizando o pacote *gmapping*[5] para localização e mapeamento simultâneos (SLAM), permitindo que o UGV construa um mapa do espaço em que irá operar. Com o ambiente devidamente mapeado, o UGV recebe uma pose-alvo e se desloca de forma autônoma pelo cenário, transportando o objeto e desviando dos obstáculos presentes até alcançar uma posição previamente estabelecida. Essa posição corresponde à região de cooperação, definida dentro da área de alcance do manipulador robótico, de modo que o objeto transportado fique acessível ao braço para a execução da tarefa de *pick-and-place*.

Após a chegada do UGV à região de cooperação, o sistema inicia a etapa de manipulação. Nesse momento, a cena de planejamento do MoveIt é atualizada com a representação do UGV, do objeto transportado e da mesa de destino, considerando suas respectivas posições e orientações. Essa atualização permite que o manipulador avalie a viabilidade da apreensão. Caso seja identificada uma configuração adequada, o braço robótico executa a operação de *pick-and-place*, realizando a retirada do objeto da plataforma móvel e posicionando-o no local definido.

Entretanto, em determinadas configurações, especialmente quando são utilizados objetos com geometria assimétrica, a orientação assumida pelo UGV pode dificultar ou inviabilizar a realização da apreensão pelo manipulador. Nessas situações, torna-se necessário ajustar a orientação do UGV, de modo a posicionar o objeto em uma configuração mais favorável à execução da apreensão pelo braço robótico. O procedimento adotado para esse reposicionamento é descrito na Seção 3.3.

Os arquivos de configuração do ambiente simulado, incluindo os parâmetros associados à inicialização do sistema, à configuração do cenário, aos modelos robóticos e à integração entre os módulos de navegação e manipulação, estão disponíveis no repositório do projeto: https://github.com/agloiola/Collaboration-for-pick-and-place-tasks.

3.2 Implementação em ambiente real

A implementação em ambiente real buscou reproduzir a arquitetura cooperativa desenvolvida na simulação, adaptando-a às características dos robôs físicos, aos recursos de percepção empregados e às exigências de navegação e manipulação no ambiente experimental.

Para essa etapa, empregou-se o ROS 2 (MACENSKI et al., 2022), na distribuição Jazzy[6],

[5] https://wiki.ros.org/gmapping
[6] https://docs.ros.org/en/jazzy/index.html

executado no Ubuntu 24.04. O sistema físico foi composto pelo robô móvel TurtleBot 4 Standard[7] e pelo manipulador robótico Niryo Ned2[8], com 6 graus de liberdade e alcance máximo de 490 mm. Para o planejamento dos movimentos do manipulador, foi utilizado o MoveIt 2 (PICKNIK ROBOTICS, 2025), responsável pela representação da cena de planejamento, verificação de colisões e geração de trajetórias para a execução da tarefa de *pick-and-place*.

A Figura 3.3 apresenta a configuração física do ambiente cooperativo, incluindo o UGV, o manipulador robótico, o objeto transportado e a mesa de destino.

Figura 3.3 – Ambiente experimental utilizado para a cooperação entre o TurtleBot 4 e o manipulador robótico Niryo Ned2.



Fonte: do autor.

Para a navegação autônoma do TurtleBot 4, foi utilizado o sistema Nav2[9] integrado ao ROS 2, permitindo o planejamento e a execução de trajetórias no ambiente real. O mapa do ambiente foi construído utilizando o pacote *slam_toolbox*[10], baseado em técnicas de SLAM, possibilitando a representação do ambiente e a estimativa da pose do robô durante a navegação.

Diferentemente do ambiente simulado, em que as poses dos elementos da cena podem ser obtidas diretamente a partir do simulador, no ambiente real tornou-se necessária a utilização de um sistema de percepção para identificar a posição e a orientação do objeto transportado pelo UGV. Para isso, foi utilizada uma webcam USB Full HD, com resolução de vídeo de

[7] https://clearpathrobotics.com/turtlebot-4/
[8] https://niryo.com/product/educational-desktop-robotic-arm/
[9] https://docs.nav2.org/
[10] https://docs.ros.org/en/ros2_packages/humble/api/slam_toolbox/index.html

1920×1080 pixels, acoplada ao manipulador robótico, conforme apresentado na Figura 3.4. A identificação foi realizada por meio de um marcador fiducial, correspondente a um padrão visual artificial posicionado sobre o objeto para servir como referência na estimativa de sua pose em relação à câmera (KALAITZAKIS et al., 2021).

Figura 3.4 – Câmera acoplada ao manipulador robótico para identificação do marcador visual.



Fonte: do autor.

Neste trabalho, adotou-se o marcador AprilTag (WANG; OLSON, 2016) como referência visual para a estimativa da pose, conforme apresentado na Figura 3.5. A escolha desse recurso deve-se à sua ampla utilização em aplicações robóticas e à disponibilidade do pacote *april-tag_ros*[11] no ROS 2, que permite detectar o marcador e estimar sua posição e orientação.

Figura 3.5 – Marcador visual AprilTag posicionado sobre o objeto para estimativa de pose.



Fonte: do autor.

[11] https://docs.ros.org/en/ros2_packages/rolling/api/apriltag_ros/

Com a pose do objeto estimada, a cena de planejamento do MoveIt 2 é atualizada, incorporando a posição do objeto, a representação do UGV, a configuração do manipulador e as restrições de colisão presentes no ambiente. Essa atualização permite que o manipulador avalie a viabilidade da apreensão antes da execução da tarefa.

Quando a configuração inicial é viável, o manipulador executa a tarefa de *pick-and-place*. Caso contrário, o algoritmo de reorientação do UGV é acionado, conforme descrito na Seção 3.3. Após a definição de uma nova configuração válida, o UGV é reposicionado, a pose do objeto é novamente identificada e a tarefa de manipulação é executada.

A transição do ambiente simulado para o ambiente real exigiu adaptações relacionadas à mudança do ROS 1 para o ROS 2, à integração dos robôs físicos, à navegação do UGV e à identificação da pose do objeto por meio do sistema de percepção. Além disso, foram necessárias adaptações nos pacotes fornecidos pelo fabricante do manipulador robótico para possibilitar sua integração com o MoveIt 2. Os arquivos desenvolvidos e as configurações utilizadas na implementação em ambiente real estão disponíveis no repositório do projeto: https://github.com/agloiola/cooperation_ned2_turtlebot4.git.

3.3 Algoritmo de reorientação

Para otimizar a interação entre o UGV e o braço robótico durante a realização de tarefas de *pick-and-place* com objetos assimétricos, foi desenvolvido um algoritmo de reorientação, acionado após o UGV atingir a região de cooperação, próxima ao manipulador. O objetivo deste algoritmo é determinar uma orientação mais favorável do robô móvel para a apreensão do objeto, reduzindo a ocorrência de falhas durante a manipulação.

O funcionamento do algoritmo ocorre da seguinte maneira: inicialmente, é avaliada a viabilidade da apreensão do objeto considerando a orientação em que o UGV estacionou. Caso seja identificada uma configuração adequada, o algoritmo é encerrado sem a necessidade de reorientação e a tarefa cooperativa prossegue. Entretanto, se a apreensão não for considerada viável, a representação do UGV na cena de planejamento do MoveIt é rotacionada em torno de seu próprio eixo por um incremento angular predefinido, sendo realizada uma nova avaliação.

Neste trabalho, foi adotado um incremento angular de $22{,}5^\circ$ a cada iteração, valor definido de forma empírica durante o desenvolvimento do algoritmo. Esse incremento permite dividir uma rotação completa em 16 orientações possíveis, oferecendo uma busca mais detalhada

do que incrementos maiores, sem elevar excessivamente o número de avaliações realizadas na cena de planejamento. Esse ciclo de reorientação e análise da viabilidade da apreensão se repete até que seja encontrada uma configuração favorável ou até que complete uma rotação total de $360°$.

Durante esse processo, as diferentes orientações são avaliadas apenas na cena de planejamento do MoveIt. Dessa forma, enquanto o algoritmo busca uma configuração viável, não há movimentação efetiva do UGV nem do braço robótico, seja no ambiente simulado ou na aplicação real. Somente após a identificação de uma orientação favorável, o UGV assume a configuração selecionada e, em seguida, o manipulador executa a tarefa de *pick-and-place*.

Caso nenhuma das orientações avaliadas permita uma apreensão viável após uma rotação completa, a operação é considerada malsucedida. Essa abordagem permite investigar a influência da orientação do UGV sobre a capacidade de apreensão do manipulador e avaliar a eficiência do procedimento de reorientação. Um pseudocódigo descrevendo o processo acima é detalhado no Algoritmo 1.

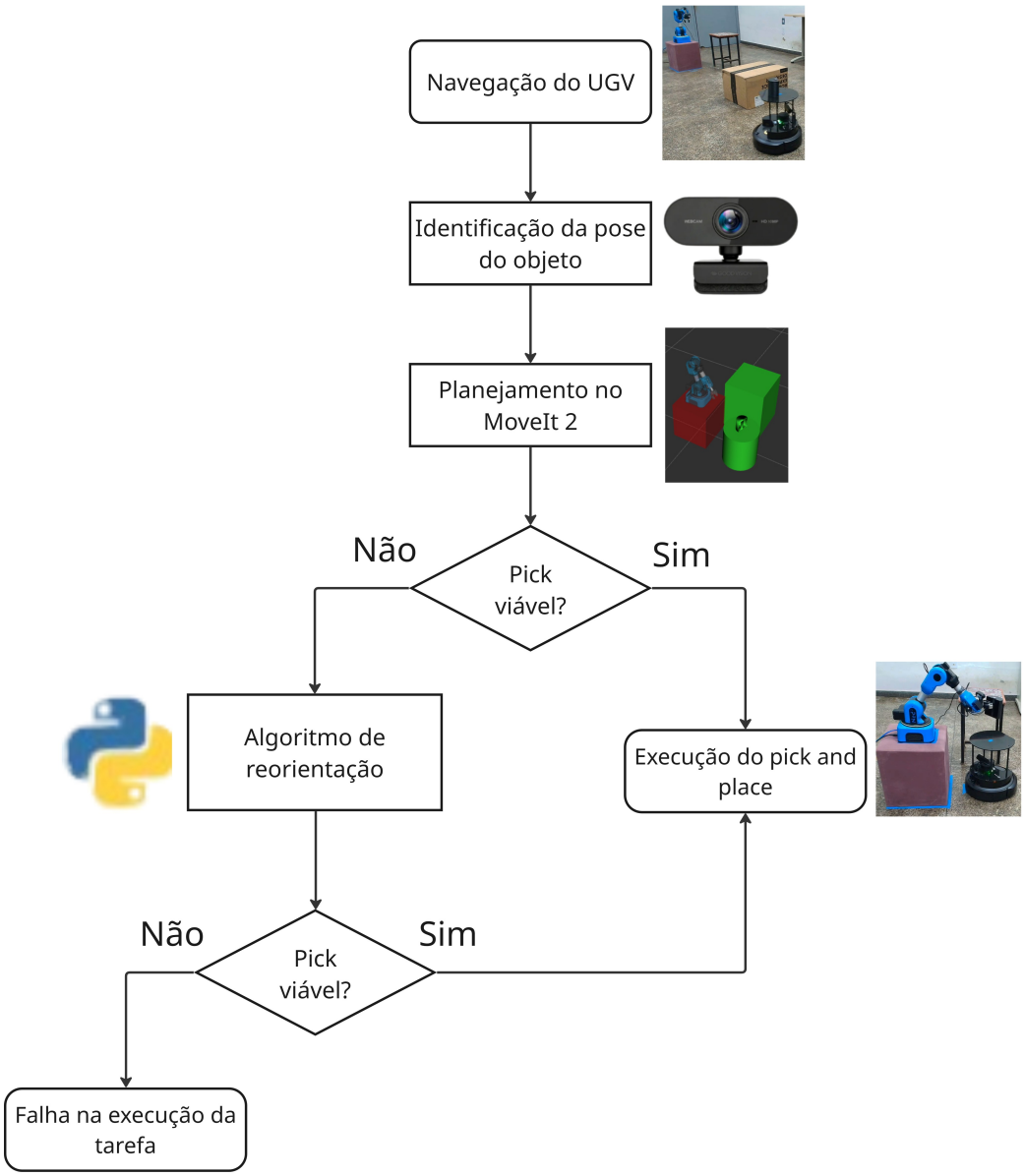
Algorithm 1 Pseudocódigo do algoritmo de reorientação do UGV

Require: Pose do UGV na região de cooperação e cena de planejamento atualizada
Ensure: Apreensão viável ou falha após a avaliação de uma rotação completa

$angulo \leftarrow 0°$
$incremento \leftarrow 22{,}5°$
while apreensão não for viável e $angulo < 360°$ **do**
    Avaliar a viabilidade da apreensão na orientação atual do UGV
    if apreensão for viável **then**
        return Sucesso
    else
        Rotacionar a representação do UGV em $22{,}5°$
        $angulo \leftarrow angulo + incremento$
    end if
end while
return Falha após $360°$ de reorientação

Como síntese do procedimento descrito, a Figura 3.6 apresenta o fluxo simplificado da tarefa cooperativa com o acionamento do algoritmo de reorientação. O diagrama evidencia que o algoritmo é utilizado quando a configuração inicial não permite uma apreensão viável, permitindo a busca por uma orientação mais favorável antes da execução da tarefa de *pick-and-place*.

Figura 3.6 – Fluxo simplificado do algoritmo de reorientação do UGV aplicado à tarefa cooperativa de *pick-and-place*.



Fonte: do autor.

4 TESTES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os testes realizados para avaliar o desempenho do sistema, bem como os resultados obtidos com e sem a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV. Os experimentos foram organizados em duas etapas, contemplando a validação em ambiente simulado e, posteriormente, a execução em ambiente real. Essa organização permitiu comparar o comportamento da tarefa cooperativa nas duas condições avaliadas e verificar a contribuição do algoritmo proposto para o aumento da taxa de sucesso.

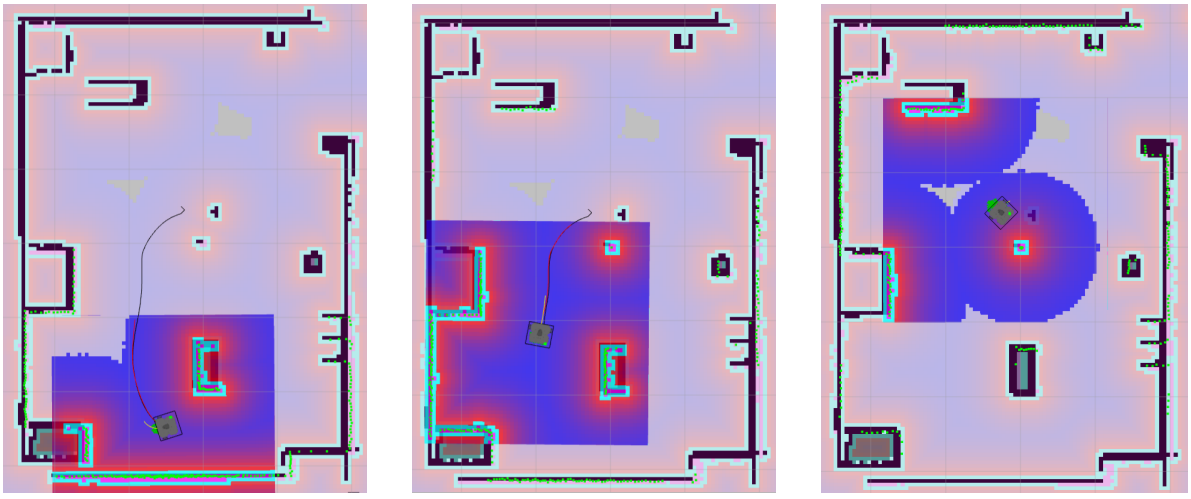
4.1 Ambiente de simulação

4.1.1 Determinação dos testes realizados

Os testes em ambiente simulado foram realizados com o objetivo de analisar a influência do algoritmo de reorientação no desempenho da tarefa cooperativa de *pick-and-place*. Para contextualizar o procedimento adotado nos experimentos, apresenta-se inicialmente uma execução do sistema em simulação.

A Figura 4.1 apresenta a trajetória planejada para o deslocamento autônomo do UGV até a região de cooperação, definida como uma posição próxima ao manipulador robótico e dentro de sua área de alcance. Nessa etapa, o robô móvel, transportando o objeto, percorre o ambiente mapeado até alcançar a posição estabelecida para o início da manipulação.

Figura 4.1 – Deslocamento autônomo do UGV até a região de cooperação: a) pose inicial do robô móvel, b) deslocamento pelo ambiente mapeado e c) chegada à região de cooperação.

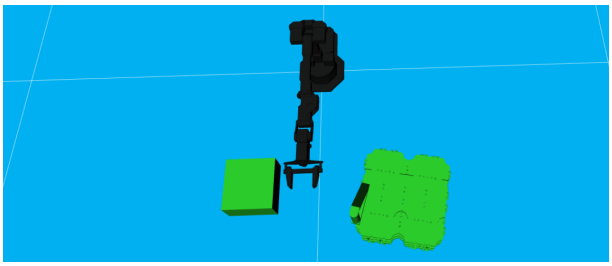


a) b) c)

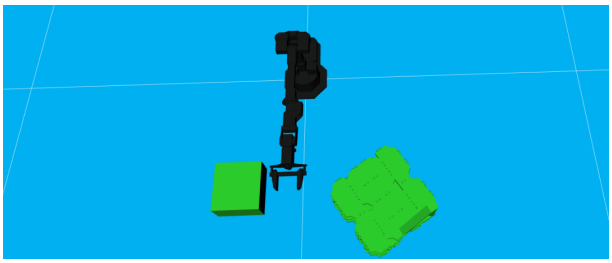
Fonte: do autor.

Após a chegada do UGV, a viabilidade da apreensão é avaliada na cena de planejamento do MoveIt. Quando a orientação inicial do robô móvel não permite a execução da tarefa, o algoritmo de reorientação passa a testar novas configurações. A Figura 4.2 ilustra esse processo em três situações diferentes.

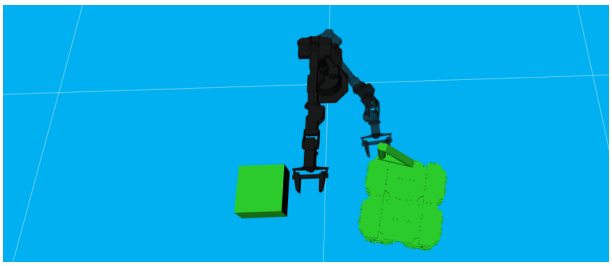
Figura 4.2 – Avaliação de diferentes orientações do UGV na cena de planejamento do MoveIt durante a aplicação do algoritmo de reorientação: a) configuração inicial sem apreensão viável, b) nova orientação avaliada pelo algoritmo e c) configuração favorável para a apreensão.



a)



b)



c)

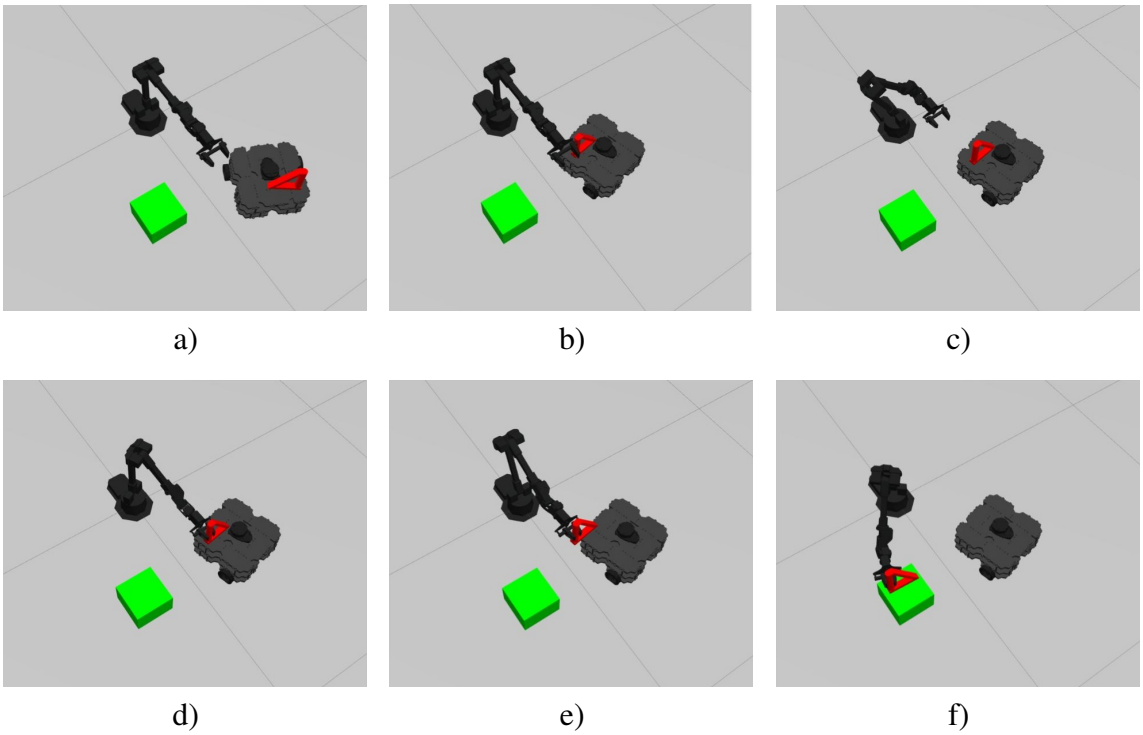
Fonte: do autor.

Na sequência apresentada na Figura 4.2, as duas primeiras configurações avaliadas não permitem a realização da apreensão. Já na terceira orientação testada, é identificada uma condição viável para a execução da tarefa. Uma vez definida uma orientação favorável, a tarefa cooperativa é executada no ambiente simulado.

A Figura 4.3 apresenta um exemplo de operação concluída com sucesso, na qual o UGV se posiciona próximo ao manipulador, realiza a reorientação correspondente à configuração selecionada e, em seguida, o braço robótico efetua a coleta do objeto transportado e o deposita

na mesa de destino. Um vídeo demonstrativo dessa execução está disponível em: https://youtu.be/feDEAz1BgaQ.

Figura 4.3 – Execução bem-sucedida da tarefa cooperativa em ambiente simulado: a) UGV estacionado na região de cooperação, b) reorientação do UGV após a aplicação do algoritmo, c) aproximação do manipulador, d) apreensão do objeto, e) elevação do objeto e f) posicionamento na mesa de destino.



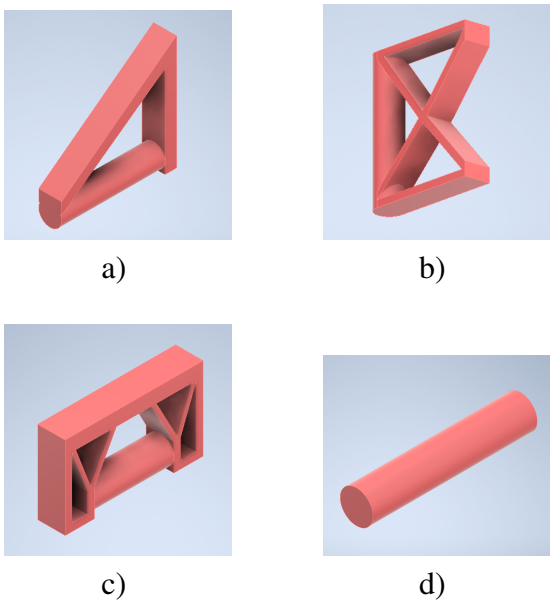
Fonte: do autor.

Para possibilitar a comparação do desempenho do sistema, os testes foram organizados em duas condições. Na primeira, a tarefa era executada sem a aplicação do algoritmo de reorientação, considerando apenas a orientação inicial assumida pelo UGV ao alcançar a região de cooperação. Na segunda, o algoritmo proposto era empregado para buscar uma orientação mais favorável antes da execução da manipulação.

Os experimentos foram conduzidos com quatro objetos distintos: três de geometria assimétrica e um de geometria simétrica. A escolha desses modelos permitiu analisar o comportamento do sistema em situações com diferentes níveis de dependência em relação à orientação do objeto. Os objetos utilizados são apresentados na Figura 4.4.

Para cada objeto, foram realizados 30 testes sem a aplicação do algoritmo de reorientação e 30 testes com sua utilização. Em cada execução, o UGV estacionava próximo ao manipulador com uma orientação distinta, permitindo avaliar o desempenho do sistema em diferentes configurações de chegada. Dessa forma, totalizaram-se 60 execuções por objeto e 240 testes em

Figura 4.4 – Objetos utilizados nos experimentos em ambiente simulado: a) objeto assimétrico 1, b) objeto assimétrico 2, c) objeto assimétrico 3 e d) objeto simétrico.



Fonte: do autor.

ambiente simulado.

4.1.2 Resultados

A partir dos testes realizados, os resultados foram organizados de modo a comparar o desempenho da tarefa cooperativa nas duas condições avaliadas. Para cada objeto, foram contabilizados os casos de sucesso e falha, permitindo determinar a taxa de sucesso do sistema em cada cenário.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados sem a aplicação do algoritmo de reorientação.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos durante os testes realizados sem a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV.

Objeto	Sucessos	Falhas	Total	Taxa de sucesso (%)
Assimétrico 1	7	23	30	23,3%
Assimétrico 2	5	25	30	16,7%
Assimétrico 3	5	25	30	16,7%
Simétrico	10	20	30	33,3%

Fonte: do autor.

Observa-se que, mesmo para o objeto simétrico, a taxa de sucesso sem o algoritmo de reposicionamento foi limitada. Esse comportamento está associado às restrições cinemáticas do

manipulador durante o planejamento da trajetória. Apesar de o objeto estar dentro do alcance nominal do braço robótico, a posição relativa entre o UGV, o objeto e o manipulador nem sempre resultou em configurações articulares viáveis. Dessa forma, algumas tentativas exigiram movimentos fora dos limites aceitáveis de planejamento, ocasionando falhas na execução da tarefa.

Na condição em que o algoritmo de reorientação foi aplicado, o sistema passou a avaliar novas orientações para o UGV sempre que a configuração inicial não permitia uma apreensão viável. Com essa estratégia, tornou-se possível encontrar configurações mais favoráveis ao planejamento do manipulador, respeitando as tolerâncias das juntas e as restrições de colisão consideradas pelo MoveIt. Como consequência, observou-se um aumento expressivo na taxa de sucesso da tarefa cooperativa, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos durante os testes realizados com a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV.

Objeto	Sucessos	Falhas	Total	Taxa de sucesso (%)
Assimétrico 1	25	5	30	83,3%
Assimétrico 2	23	7	30	76,7%
Assimétrico 3	22	8	30	73,3%
Simétrico	27	3	30	90,0%

Fonte: do autor.

A Tabela 4.3 apresenta uma comparação direta entre as taxas de erro obtidas nos testes, destacando a redução percentual das falhas observadas.

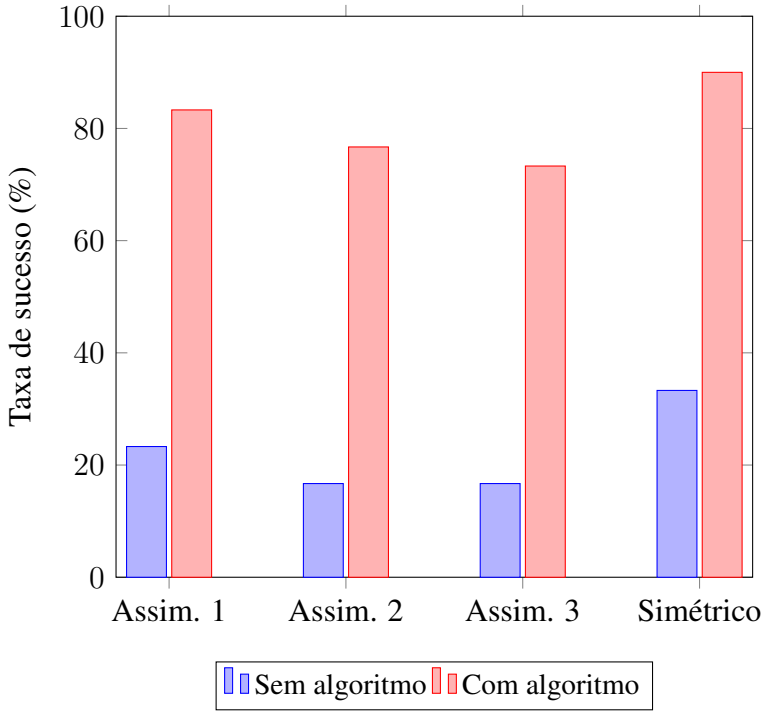
Tabela 4.3 – Comparação entre as taxas de erro obtidas nos testes realizados sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV.

Objeto	Erro sem algoritmo (%)	Erro com algoritmo (%)	Redução do erro (%)
Assimétrico 1	76,7%	16,7%	78,2%
Assimétrico 2	83,3%	23,3%	72,0%
Assimétrico 3	83,3%	26,7%	68,0%
Simétrico	66,7%	10,0%	85,0%

Fonte: do autor.

Além das tabelas, a Figura 4.5 ilustra visualmente a diferença entre os dois cenários, evidenciando o expressivo aumento na taxa de sucesso após a aplicação do algoritmo.

Figura 4.5 – Comparação das taxas de sucesso obtidas nos experimentos realizados sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação do UGV.



Fonte: do autor.

A análise dos resultados confirma que a implementação do algoritmo resultou em uma melhoria no desempenho da tarefa cooperativa. Considerando os quatro objetos avaliados, a taxa média de sucesso passou de 22,5%, nos testes sem algoritmo, para 80,8%, nos testes com algoritmo, representando um aumento de 58,3 pontos percentuais. Em termos relativos, os ganhos percentuais nas taxas de sucesso variaram entre 170,0% e 360,0%, com aumento médio de 281,8% entre os objetos analisados. Além disso, a taxa média de erro foi reduzida de 77,5% para 19,2%. Considerando o número total de falhas, houve redução de 93 para 23 ocorrências, correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 75,3%. Esses resultados demonstram a importância do ajuste de orientação do UGV, evidenciando seu potencial para reduzir falhas e aumentar o rendimento do sistema cooperativo.

4.2 Ambiente real

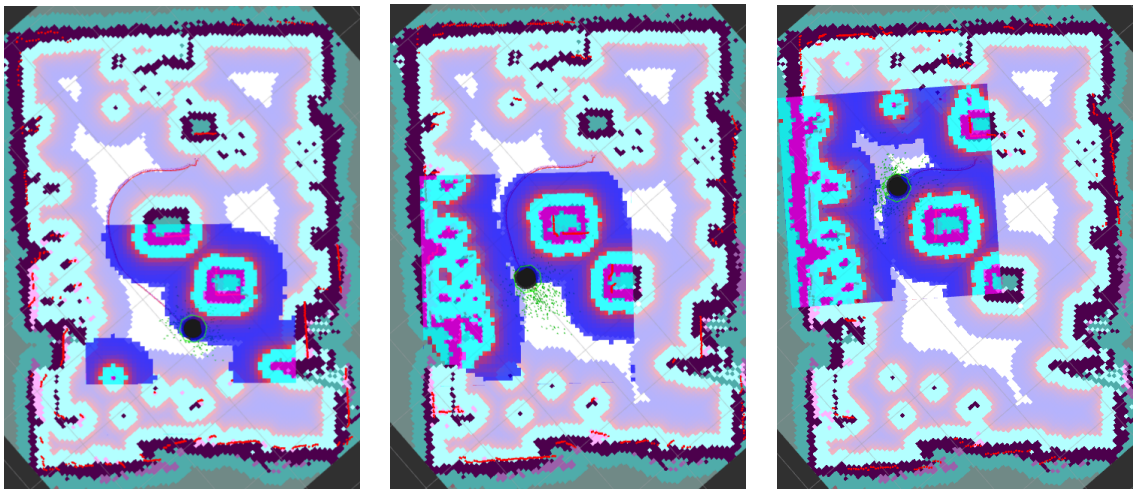
4.2.1 Determinação dos testes realizados

Os testes em ambiente real foram realizados com o objetivo de validar fisicamente o sistema cooperativo desenvolvido e verificar o desempenho do algoritmo proposto. Nessa etapa, buscou-se observar o comportamento do sistema em condições práticas de operação,

considerando aspectos como navegação autônoma, identificação da pose do objeto, planejamento dos movimentos do manipulador e execução física da manipulação.

A Figura 4.6 apresenta uma sequência do deslocamento do UGV no mapa durante a navegação em ambiente real, evidenciando, respectivamente, três momentos principais: a pose inicial do robô móvel, o deslocamento durante a navegação e a chegada à posição definida para o início da manipulação. No mapa, o ícone preto representa o UGV, a linha indica a trajetória planejada e as regiões coloridas correspondem às áreas consideradas pelo sistema de navegação para o planejamento de trajetórias e o desvio de obstáculos.

Figura 4.6 – Sequência do deslocamento autônomo do UGV no mapa do ambiente real: a) pose inicial do robô móvel, b) deslocamento durante a navegação e c) chegada à região de cooperação.

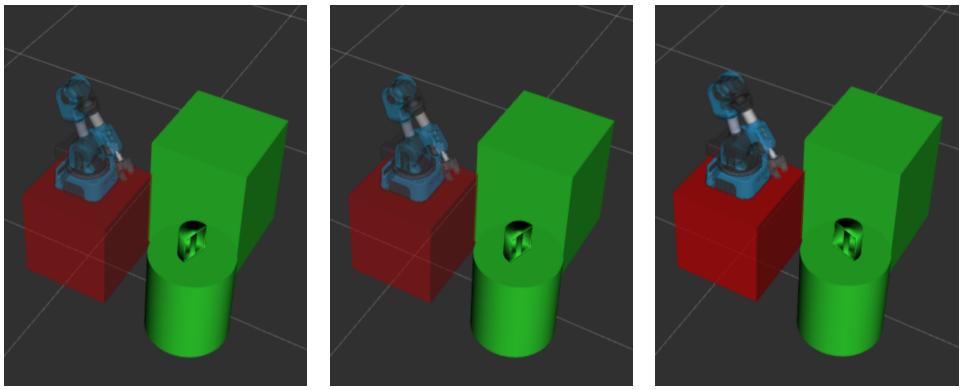


a) b) c)

Fonte: do autor.

Após a chegada do UGV à região de cooperação, conforme apresentado na Figura 4.6(c), realiza-se a identificação da pose do objeto e a atualização da cena de planejamento no MoveIt 2. Quando a configuração inicial não permite uma apreensão viável, o algoritmo de reorientação avalia novas orientações do UGV na cena de planejamento, sem que ocorra, nesse momento, a movimentação física do robô móvel. A Figura 4.7 ilustra esse processo, no qual o UGV é representado por um cilindro e diferentes orientações são analisadas até que seja encontrada uma configuração favorável à apreensão.

Figura 4.7 – Avaliação de diferentes orientações do UGV na cena de planejamento do MoveIt 2: a) configuração inicial avaliada, sem apreensão viável; b) nova orientação analisada pelo algoritmo de reorientação; e c) configuração favorável para a execução da apreensão.

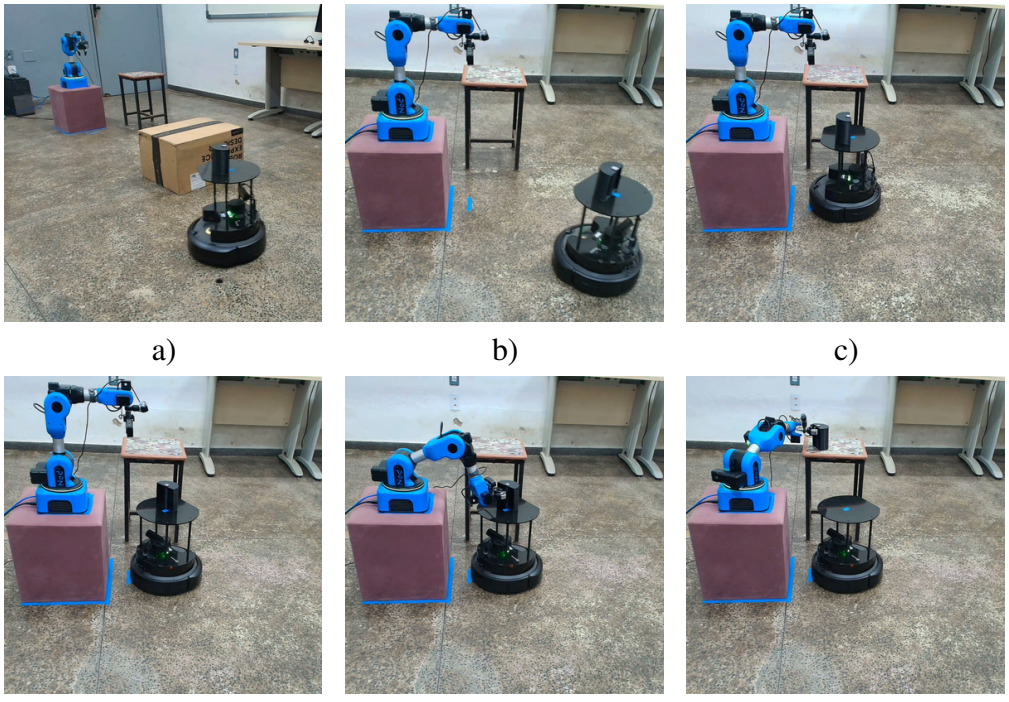


a) b) c)

Fonte: do autor.

A Figura 4.8 apresenta um exemplo de execução bem-sucedida da tarefa cooperativa em ambiente real, evidenciando a integração entre a navegação e reposicionamento do UGV e a manipulação realizada pelo braço robótico. Essa execução é demonstrada no vídeo disponível em: https://youtu.be/R0CcL4kNPNM.

Figura 4.8 – Sequência da execução da tarefa cooperativa em ambiente real: a) pose inicial do UGV, b) navegação até a região de cooperação, c) chegada e identificação da pose do objeto, d) rotação do UGV após a aplicação do algoritmo de reorientação, e) apreensão do objeto e f) posicionamento na mesa de destino.



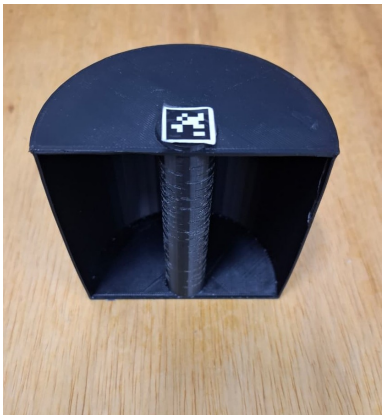
a) b) c)

d) e) f)

Fonte: do autor.

Nos experimentos físicos, foi utilizado o objeto apresentado na Figura 4.9. A escolha desse objeto foi motivada para explorar a eficácia do algoritmo de reorientação em uma situação na qual a orientação do objeto influencia diretamente a viabilidade da apreensão pelo manipulador robótico.

Figura 4.9 – Objeto utilizado durante os testes em ambiente real.



Fonte: do autor.

Os experimentos foram conduzidos em dois cenários distintos, conforme apresentado nas Figuras 4.10 e 4.11. Em cada cenário, foram definidas uma disposição específica de obstáculos e uma pose inicial fixa para o UGV. Além disso, durante a etapa de navegação, o robô móvel foi direcionado para a mesma pose-alvo próxima ao manipulador, permitindo repetir os testes sob as mesmas condições de chegada à região de cooperação.

Figura 4.10 – Primeiro cenário experimental utilizado nos testes em ambiente real.



Fonte: do autor.

Figura 4.11 – Segundo cenário experimental utilizado nos testes em ambiente real.

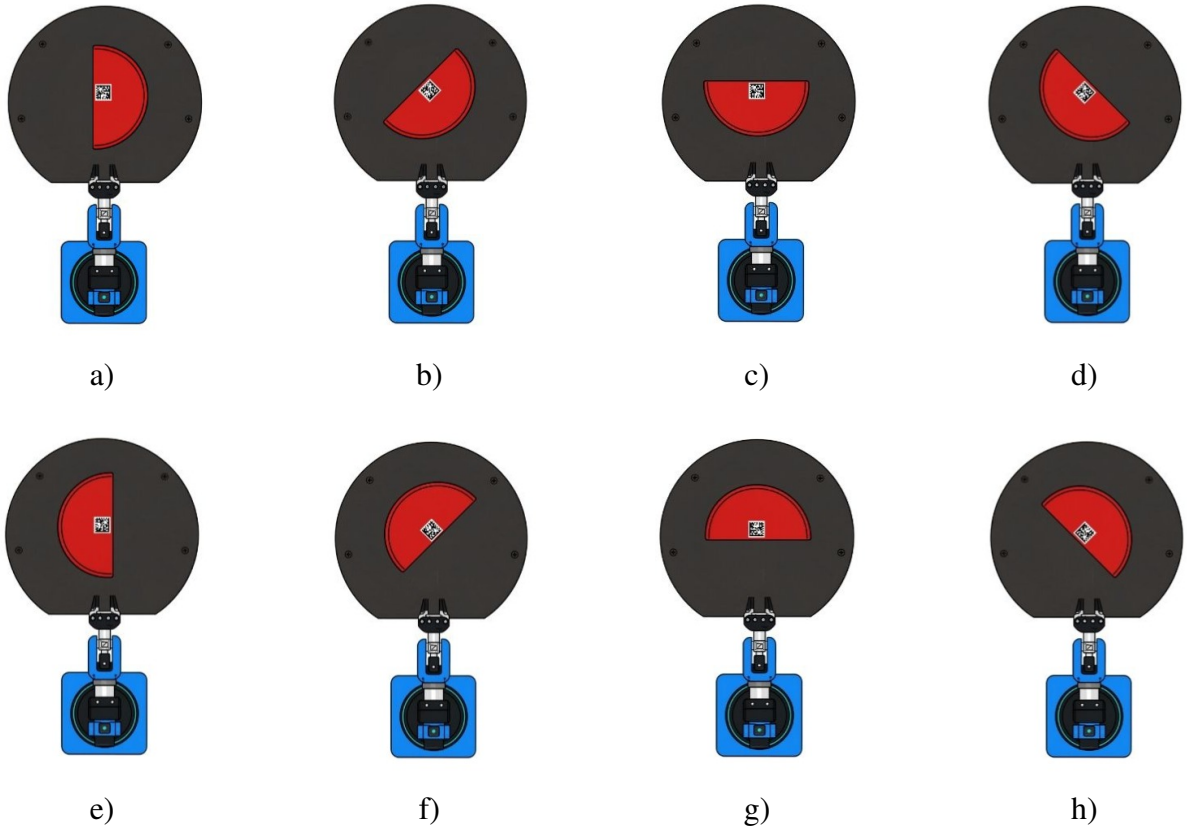


Fonte: do autor.

Em cada cenário experimental, o objeto foi posicionado sobre a base móvel do UGV em oito orientações iniciais distintas, variando de $0°$ a $315°$ com incrementos de $45°$, conforme apresentado na Figura 4.12. Essa definição permitiu testar o algoritmo de reorientação em diferentes condições iniciais do objeto, avaliando sua capacidade de buscar uma orientação mais

favorável para a apreensão pelo manipulador robótico.

Figura 4.12 – Configurações de orientação do objeto em relação ao braço robótico avaliadas durante os experimentos em ambiente real.



Fonte: do autor.

Para cada orientação, foram realizadas duas repetições dos testes em ambas as condições avaliadas: sem a aplicação do algoritmo de reorientação e com a utilização do algoritmo proposto. Dessa forma, considerando ambos os cenários experimentais, as oito orientações consideradas, as duas repetições realizadas para cada configuração e as duas condições analisadas, totalizaram-se 64 execuções em ambiente real.

4.2.2 Resultados

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos sem e com a utilização do algoritmo proposto, considerando o número de sucessos, falhas e a taxa de sucesso em cada condição.

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados obtidos nos testes em ambiente real sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação.

Condição	Sucessos	Falhas	Taxa de sucesso (%)
Sem algoritmo	11	21	34,4%
Com algoritmo	25	7	78,1%

Fonte: do autor.

Além da quantidade total de sucessos e falhas, foi realizada uma análise das ocorrências registradas nas diferentes etapas dos experimentos. A Tabela 4.5 evidencia essas ocorrências para as duas condições avaliadas, permitindo identificar em quais etapas surgiram as principais limitações do sistema.

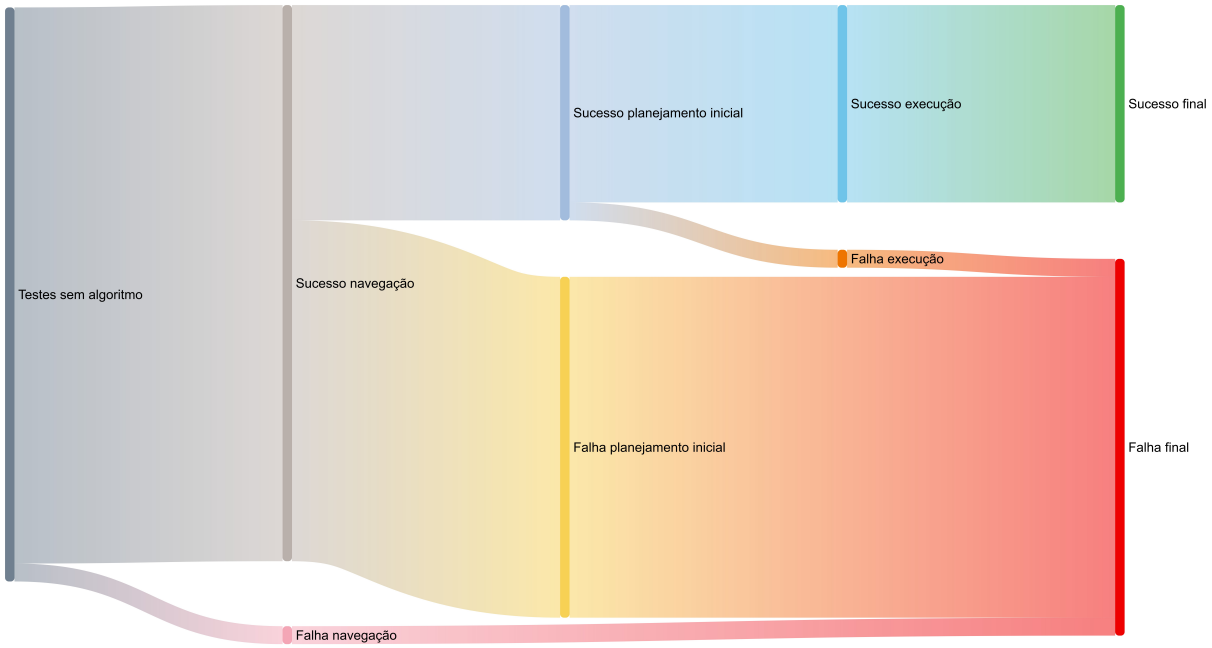
Tabela 4.5 – Distribuição das ocorrências registradas nas etapas dos testes em ambiente real sem e com a aplicação do algoritmo de reorientação.

Ocorrência	Sem algoritmo de reorientação	Com algoritmo de reorientação
Falha na navegação	1	1
Configuração inicial sem apreensão viável	19	–
Falha ao encontrar apreensão válida após reposicionamento	–	3
Colisão durante a execução da apreensão	1	3

Fonte: do autor.

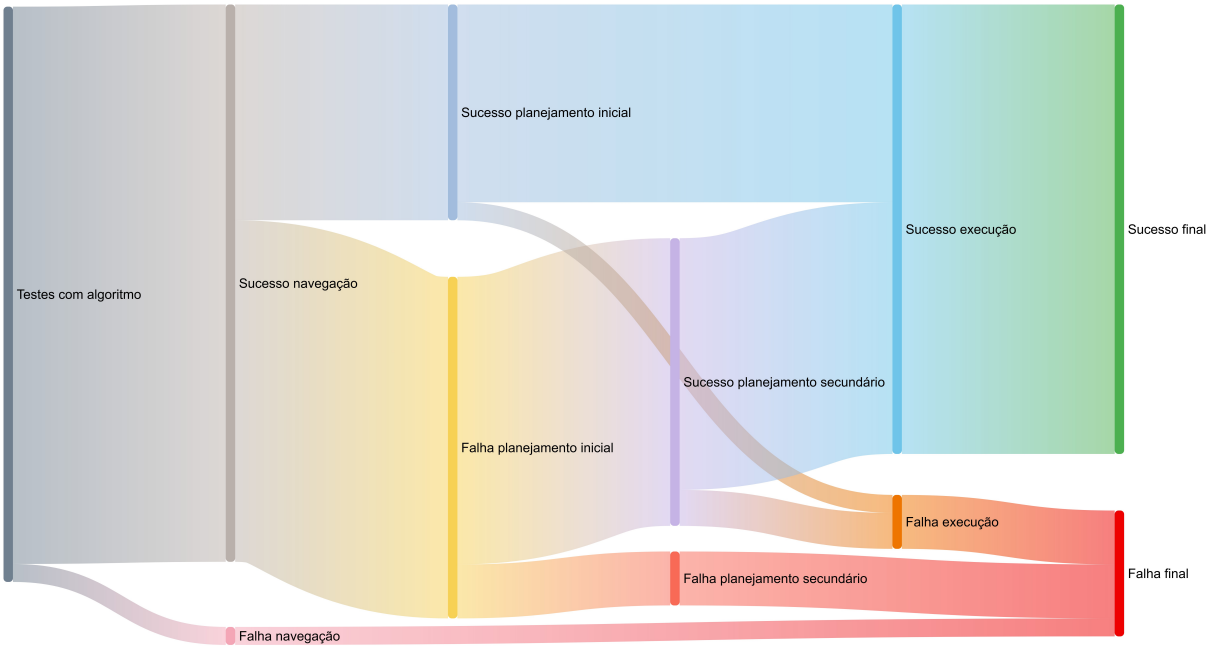
Para complementar a análise, os diagramas de Sankey das Figuras 4.13 e 4.14 ilustram o fluxo dos resultados ao longo das etapas da tarefa cooperativa. Esse tipo de diagrama permite representar fluxos por meio de conexões cuja espessura é proporcional à quantidade representada (RIEHMANN; HANFLER; FROEHLICH, 2005). Neste trabalho, essa representação foi utilizada para visualizar como os testes avançaram entre navegação, planejamento, execução da apreensão e resultado final.

Figura 4.13 – Diagrama de Sankey dos resultados obtidos nos testes realizados sem a aplicação do algoritmo de reorientação.



Fonte: do autor.

Figura 4.14 – Diagrama de Sankey dos resultados obtidos nos testes realizados com a aplicação do algoritmo de reorientação.



Fonte: do autor.

A análise da Figura 4.13 permite observar que, sem a aplicação do algoritmo de reorientação, as falhas de planejamento inicial resultaram diretamente no encerramento da tarefa. Nessa condição, quando a orientação inicial do UGV não permitia uma apreensão viável, o sistema não realizava novas tentativas de ajuste da orientação, o que levou a 19 falhas nessa etapa.

Já na Figura 4.14, observa-se que as configurações inicialmente inviáveis passaram a ser avaliadas em uma nova etapa de planejamento, por meio da análise de diferentes orientações do UGV. Com isso, parte dessas configurações passou a permitir a apreensão do objeto, evitando o encerramento imediato da tarefa e contribuindo para o aumento do número de execuções bem-sucedidas.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o algoritmo de reorientação contribuiu para o aumento da taxa de sucesso da tarefa cooperativa em ambiente real. A taxa de sucesso passou de 34,4%, nos testes sem algoritmo, para 78,1%, nos testes com algoritmo, representando um aumento relativo de aproximadamente 127,3%. Além disso, o número de falhas foi reduzido de 21 para 7 ocorrências, correspondendo a uma redução de 66,7%. Esses resultados evidenciam a importância da orientação adequada do objeto em relação ao manipulador para a execução de tarefas cooperativas de *pick-and-place*.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um sistema cooperativo entre um UGV e um braço robótico de base fixa para a execução de tarefas de *pick-and-place* com objetos assimétricos. A proposta foi motivada pela necessidade de melhorar o desempenho dessa integração, especialmente em situações nas quais a orientação do objeto transportado pode influenciar diretamente a viabilidade da apreensão pelo manipulador.

O sistema foi inicialmente implementado em ambiente simulado, utilizando o TurtleBot3 Waffle Pi e o manipulador WidowX-250 6DOF, e posteriormente implementado em ambiente real, com o TurtleBot 4 Standard e o manipulador Niryo Ned2. Além disso, foi desenvolvido um algoritmo de reorientação do UGV, responsável por avaliar diferentes orientações do robô móvel a fim de buscar uma configuração mais favorável para a execução da apreensão do objeto.

Os resultados obtidos em ambiente simulado demonstraram que a aplicação do algoritmo de reorientação proporcionou uma melhoria expressiva na execução da tarefa cooperativa. Nos testes sem algoritmo, as taxas de sucesso variaram entre 16,7% e 33,3%, enquanto, com a aplicação do algoritmo, foram obtidas taxas entre 73,3% e 90,0%. Esses resultados indicam que a avaliação de novas orientações do UGV contribuiu para aumentar o número de configurações viáveis para a apreensão dos objetos, especialmente nos casos envolvendo geometrias assimétricas.

A validação em ambiente real também confirmou a contribuição do algoritmo para o desempenho do sistema físico. A taxa de sucesso passou de 34,4%, nos testes sem algoritmo, para 78,1%, nos testes com algoritmo, representando um aumento relativo de aproximadamente 127,3%. Além disso, o número de falhas foi reduzido de 21 para 7 ocorrências, correspondendo a uma redução de 66,7%. Esses resultados evidenciam que a estratégia proposta contribuiu para melhorar o desempenho do sistema, mesmo diante dos desafios presentes no ambiente real.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a orientação do objeto em relação ao manipulador exerce influência direta na viabilidade de tarefas de *pick-and-place*. O algoritmo de reorientação desenvolvido mostrou-se capaz de ampliar as possibilidades de encontrar configurações favoráveis para a apreensão, reduzindo falhas e melhorando o desempenho do sistema. Assim, a abordagem proposta contribui para o aumento da taxa de sucesso em operações cooperativas de manipulação de objetos assimétricos. Além disso, os resultados evidenciam a importância da robótica cooperativa com sistemas heterogêneos, uma vez que a combinação

entre diferentes plataformas robóticas permite explorar as vantagens de cada sistema e aumentar a flexibilidade na execução da tarefa.

5.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se a utilização do método FoundationPose (WEN et al., 2024), um modelo unificado para estimativa e rastreamento de poses 6D de objetos, como alternativa ao uso de marcadores AprilTag. Essa abordagem permitiria estimar a pose dos objetos sem a necessidade de marcadores fiduciais, ampliando a flexibilidade do sistema para a identificação e manipulação de diferentes objetos.

Além disso, sugere-se a ampliação dos experimentos em ambiente real, considerando um maior número de objetos, diferentes geometrias e novas configurações de obstáculos. Essa expansão permitiria avaliar o comportamento do sistema em cenários mais variados e aprofundar a análise da influência da orientação do objeto e do posicionamento do UGV sobre a viabilidade da apreensão.

Com base nos avanços obtidos neste estudo, espera-se que a continuidade dessa linha de pesquisa contribua para o aprimoramento das estratégias de cooperação entre robôs móveis e manipuladores, ampliando a aplicabilidade desses sistemas em tarefas de *pick-and-place* com objetos assimétricos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. G. L. et al. Collaboration between ugv and robotic arm for pick and place tasks. In: **2025 Brazilian Conference on Robotics (CROS)**. [S.l.: s.n.], 2025. v. 1, p. 1–6.

COLEMAN, D. et al. **Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a MoveIt! Case Study**. 2014. Disponível em: https://arxiv.org/abs/1404.3785.

GIAMPÀ, S. **Development of an Autonomous Mobile Manipulator for Industrial and Agricultural Environments**. Dissertação (Master's thesis) — Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2024. Disponível em: https://hdl.handle.net/10589/223386.

KALAITZAKIS, M. et al. Fiducial markers for pose estimation: Overview, applications and experimental comparison of the ARTag, AprilTag, ArUco and STag markers. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, Springer, v. 101, n. 4, p. 71, 2021.

KOENIG, N.; HOWARD, A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In: . [S.l.: s.n.], 2004. p. 2149 – 2154 vol.3. ISBN 0-7803-8463-6.

LI, S. et al. **Demonstrating Large-Scale Package Manipulation via Learned Metrics of Pick Success**. 2023. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2305.10272.

MACENSKI, S. et al. Robot operating system 2: Design, architecture, and uses in the wild. **Science Robotics**, v. 7, n. 66, 2022.

PICKNIK ROBOTICS. **MoveIt 2 Documentation**. 2025. Disponível em: https://moveit.picknik.ai/main/index.html. Acesso em: 10 jun. 2026.

PIETRANTONI, L. et al. Integrating collaborative robots in manufacturing, logistics, and agriculture: Expert perspectives on technical, safety, and human factors. **Frontiers in Robotics and AI**, Volume 11 - 2024, 2024. ISSN 2296-9144. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2024.1342130.

QUIGLEY, M. et al. Ros: An open-source robot operating system. In: **ICRA Workshop on Open Source Software**. [S.l.: s.n.], 2009.

RAMALEPA, L.; JAMISOLA, R. A review on cooperative robotic arms with mobile or drones bases. **International Journal of Automation and Computing**, v. 18, 05 2021.

RIEHMANN, P.; HANFLER, M.; FROEHLICH, B. Interactive sankey diagrams. In: **IEEE Symposium on Information Visualization, 2005. INFOVIS 2005.** [S.l.: s.n.], 2005. p. 233–240.

ROS WIKI. **ROS Tutorials**. 2022. Disponível em: http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials. Acesso em: 10 jun. 2026.

SAINI, M. et al. Planning robot placement for object grasping. In: BARROS, E. et al. (Ed.). **RoboCup 2024: Robot World Cup XXVII**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. p. 269–280. ISBN 978-3-031-85859-8.

SANDAKALUM, T.; ANG, M. Motion planning for mobile manipulators—a systematic review. **Machines**, v. 10, p. 97, 01 2022.

SLAVOV, D.; SLAVOVA, A. Task execution and dynamic re-planning with a mobile robot and manipulator: A real-robot study using rdk x3 and mycobot 320 – part 1. p. 1–4, 2025.

SOBHAN, N.; SHAIKAT, A. S. Implementation of pick place robotic arm for warehouse products management. In: **2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 156–161.

STIBINGER, P. et al. Mobile manipulator for autonomous localization, grasping and precise placement of construction material in a semi-structured environment. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 6, n. 2, p. 2595–2602, 2021.

SZE, D. L.; REYES, R. S.; ABU, P. A. R. Simulation of a pick and place system for electronic cards using a yumi cobot. In: **2024 10th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 128–132.

WADA, K.; JAMES, S.; DAVISON, A. J. **ReorientBot: Learning Object Reorientation for Specific-Posed Placement**. 2022. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2202.11092.

WANG, J.; OLSON, E. Apriltag 2: Efficient and robust fiducial detection. In: **2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 4193–4198.

WEN, B. et al. **FoundationPose: Unified 6D Pose Estimation and Tracking of Novel Objects**. 2024. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2312.08344.

YANG, M.; YANG, E. Two-stage multi-sensor fusion positioning system with seamless switching for cooperative mobile robot and manipulator system. **International Journal of Intelligent Robotics and Applications**, v. 7, p. 1–16, 03 2023.

YANG, M. et al. A cooperative mobile robot and manipulator system (co-mrms) for transport and lay-up of fibre plies in modern composite material manufacture. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, 03 2022.

APÊNDICE A – Modelo cinemático do robô móvel TurtleBot 4 Standard

O TurtleBot4 Standard utiliza a base móvel iRobot Create 3, que possui acionamento diferencial. Assim, seu movimento no plano pode ser descrito a partir da pose do robô $q = [x\ y\ \theta]^T$, em que x e y representam a posição no plano e θ representa a orientação do robô.

O modelo cinemático direto de um robô diferencial é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\cos\theta & \frac{r}{2}\cos\theta \\ \frac{r}{2}\sin\theta & \frac{r}{2}\sin\theta \\ \frac{r}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix}, \tag{A.1}$$

em que r corresponde ao raio das rodas, L à distância entre as rodas, ω_R à velocidade angular da roda direita e ω_L à velocidade angular da roda esquerda.

Considerando as dimensões mecânicas da base iRobot Create 3, tem-se o diâmetro da roda igual a 72 mm, resultando em $r = 0{,}036$ m, e a distância entre as rodas igual a $L = 0{,}235$ m. Substituindo esses valores no modelo, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}018\cos\theta & 0{,}018\cos\theta \\ 0{,}018\sin\theta & 0{,}018\sin\theta \\ 0{,}1532 & -0{,}1532 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \end{bmatrix}. \tag{A.2}$$

APÊNDICE B – Modelo cinemático do braço robótico Niryo Ned2

A cinemática direta do manipulador Niryo Ned2 foi descrita por meio de transformações homogêneas sucessivas.

Considerando o vetor de juntas

$$q = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 & q_4 & q_5 & q_6 \end{bmatrix}^T, \tag{B.1}$$

em que q_i representa o ângulo da i-ésima junta do manipulador, a transformação homogênea do efetuador final em relação à base é dada por:

$$\begin{aligned} {}^0T_{ef}(q) = {} & T_z(101{,}3) R_z(q_1) T_z(65) R_y(-q_2) T_x(12) T_z(221) R_y(-q_3) \\ & \cdot T_z(32{,}5) T_x(65) R_x(q_4) T_x(170) R_y(-q_5) \\ & \cdot T_x(19{,}7) T_z(9{,}25) R_x(q_6) T_x(30). \end{aligned} \tag{B.2}$$

Os valores utilizados nas translações estão em milímetros e foram definidos a partir das dimensões geométricas do robô.

Além disso, R_x, R_y e R_z representam rotações em torno dos eixos x, y e z, respectivamente, enquanto T_x e T_z representam translações ao longo desses eixos. As matrizes homogêneas de rotação são dadas por:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{B.3}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{B.4}$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{B.5}$$

em que θ representa o ângulo de rotação.

As matrizes homogêneas de translação utilizadas no modelo são dadas por:

$$T_x(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{B.6}$$

$$T_z(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{B.7}$$

em que d representa o deslocamento linear ao longo do eixo correspondente.

A matriz homogênea resultante possui a seguinte forma geral:

$${}^0T_{ef}(q) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{B.8}$$

em que os termos r_{ij} representam a orientação do efetuador final, enquanto x, y e z representam sua posição em relação ao sistema de coordenadas da base.