UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação

Alocação de tarefas para a coordenação de robôs heterogêneos aplicados à agricultura de precisão

Eduardo Sacogne Fraccaroli

Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Computação e Matemática Computacional (PPG-CCMC)

SERVIÇO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO ICMC-USP

Data de Depósito:

Assinatura: _____

Eduardo Sacogne Fraccaroli

Alocação de tarefas para a coordenação de robôs heterogêneos aplicados à agricultura de precisão

Tese apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC-USP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional. *VERSÃO REVISADA*

Área de Concentração: Ciências de Computação e Matemática Computacional

Orientadora: Profa. Dra. Roseli Aparecida Francelin Romero

USP – São Carlos
Fevereiro de 2018

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Achille Bassi
e Seção Técnica de Informática, ICMC/USP,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)

F797a Fraccaroli, Eduardo Sacogne
Alocação de tarefas para a coordenação de robôs
heterogêneos aplicados à agricultura de precisão /
Eduardo Sacogne Fraccaroli; orientadora Roseli
Aparecida Francelin Romero. -- São Carlos, 2018.
126 p.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências de Computação e Matemática Computacional) --
Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
Universidade de São Paulo, 2018.

1. Robótica. 2. Alocação de Tarefas. 3. Robôs
Heterogêneos. 4. Agricultura de Precisão. 5. MD-
MTSP. I. Romero, Roseli Aparecida Francelin,
orient. II. Título.

Eduardo Sacogne Fraccaroli

**Task allocation for the coordination of heterogeneous robots
applied to precision agriculture**

Doctoral dissertation submitted to the Institute of Mathematics and Computer Sciences – ICMC-USP, in partial fulfillment of the requirements for the degree of the Doctorate Program in Computer Science and Computational Mathematics. *FINAL VERSION*

Concentration Area: Computer Science and Computational Mathematics

Advisor: Profa. Dra. Roseli Aparecida
Francelin Romero

USP – São Carlos
February 2018

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados à todos que de alguma maneira contribuíram para o aprimoramento e formação do pesquisador.

À Profa. Dra. Roseli Aparecida Francelin Romero pela orientação, paciência e confiança.

Meus pais pelo incentivo e pelo suporte durante toda essa jornada.

Marcelo, o primeiro amigo que fiz quando cheguei em São Carlos.

André, pela amizade, companheirismo e pelas partidas de tênis.

Valéria, amiga para todas horas.

Raphael, pelo sei jeito engraçado e cativante.

Murillo, por me dar medo toda vez que dava risada.

Os panças-bikers (Alexandre, Ivo e Rover).

Teresa Hernadez, pelo companheirismo e carinho.

À todo o pessoal do CRHEA, Bruno, Rafael Sanches, Rafael Perussi, Gustavo, Diego, Maurício e Núria, com quem pude conviver e passar bons momentos.

À toda equipe da pós graduação do ICMC/USP, em especial ao Prof. Dr. Adenilso da Silva Simão e a assistente administrativa Carol.

À todos os técnicos do STI, especialmente para o Rogério M. B. Pascual, Thiago B. Zanoello e Cleber G. dos Santos.

À todos do Serviço de Apoio Operacional que colaboraram durante a montagem e execução da LARC2014, especialmente para o Marcelo, Roberto, Antônio, Wanderley e José Roberto.

À todos do Serviço de Apoio Administrativo, especialmente para o Paulo Cesar, Cristiano e Germano.

À todos da Seção de Apoio Institucional, especialmente para o Neylor, Thiago, Marília e Denise.

À todos os seguranças do bloco 1, 4 e 6, especialmente para o Alex, Luis, Alexandre e Coletti.

“O mundo é minha Vontade.” Arthur Schopenhauer

RESUMO

FRACCAROLI, E. S. **Alocação de tarefas para a coordenação de robôs heterogêneos aplicados à agricultura de precisão**. 2018. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2018.

O Brasil é uma referência mundial na produção e exportação de citros, entretanto esse cultivo pode sofrer diversos problemas e perdas de produtividade por motivos diversos, como por exemplo, pragas. Para reduzir os riscos e perdas, torna-se interessante o uso de sistemas automatizados de monitoramento, justificando a necessidade de realizar a coleta de dados para determinar diversos fatores. Determinadas plantações, como a de citros, não podem ser monitoradas somente via solo ou somente via imagens aéreas, tornando necessário mesclar ambas as abordagens de acordo com o parâmetro a ser monitorado. Para a realização desse monitoramento devem ser utilizados robôs com habilidades distintas, robôs aéreos e robôs terrestres. Assim, é preciso designar as tarefas que cada robô realizará e também coordenar todos os robôs durante a execução do sistema como um todo, visando otimizar o processo de coleta de dados. Esse problema pode ser analisado e modelado como um problema de alocação de tarefas para robôs (*Multi-Robot Task Allocation* (MRTA)). Para resolver esse problema propõe-se um *framework* baseado em técnicas de cobertura de conjuntos e em mecanismo de mercado baseado em leilão. Testes simulados são realizados e demonstram que a presente proposta cumpre o papel na alocação das tarefas aos robôs. Além disso, visando a aplicação da solução proposta é projetado e desenvolvido uma plataforma robótica aérea (quadrirotor) de baixo custo utilizando peças prototipadas. Para o controle de estabilidade dessa plataforma, propõe-se um modelo matemático de acordo com os parâmetros inerciais do quadrirotor. Esse quadrirotor é utilizado em diversas aplicações reais, mostrando que o projeto desenvolvido pode ser reproduzido e destinado a execução de tarefas reais, como por exemplo a coleta de dados na agricultura de precisão.

Palavras-chave: Alocação de Tarefas, Robôs Heterogêneos, Agricultura de Precisão, MD-MTSP, Quadrirotor, *Robot Operating System* (ROS).

ABSTRACT

FRACCAROLI, E. S. **Task allocation for the coordination of heterogeneous robots applied to precision agriculture**. 2018. 126 p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2018.

Brazil is a world reference in the production and export of citrus, although this crop can suffer several problems and losses of productivity for diverse reasons, as for example, pests. In order to reduce risks and losses, it is interesting to use automated monitoring systems, justifying the need to perform data collection to determine several factors. Certain plantations, such as citrus plantations, can not be monitored only via soil or only via aerial images, making it necessary to merge both approaches according to the parameter to be monitored. To perform this monitoring, robots with different abilities, such as unmanned aerial vehicle (UAV) and unmanned ground vehicle (UCV) should be used. Therefore, it is necessary to assign the tasks that each robot will perform and also to coordinate all the robots during the execution of the system as a whole, in order to optimize the process of data collection. The problem can be studied and modeled as a task allocation problem for robots (MRTA). To solve this problem we propose a framework based set covering techniques and auction-based market mechanism. Simulated tests are performed and demonstrate that the present proposal fulfills the role in assigning tasks to robots. In addition, aiming at the application of the proposed solution is designed and developed a low cost aerial robotic platform (quadrirotor) which use prototyped parts. This quadrirotor is used in several real applications, showing that the developed project can be reproduced and destined to perform real tasks, such as data collection in precision agriculture.

Keywords: Task Allocation, Heterogeneous Robots, Precision Agriculture, MD-MTSP, Quadro-
tor, Robot Operating System (ROS).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de subsistemas de tarefas em um robô agrícola.	33
Figura 2 – Modelo do quadrirotor simulado.	55
Figura 3 – Kit para montagem do robô aéreo ErleCopter.	56
Figura 4 – Plataforma robótica HUSKY.	57
Figura 5 – Impressora 3D modelo <i>Prusa Mendel</i> , montada e calibrada pelo autor. . . .	66
Figura 6 – Quadrirotor desenvolvido em operação.	67
Figura 7 – Peças prototipadas na impressora 3D.	68
Figura 8 – Sistema de coordenadas inercial e do corpo de um quadrirotor genérico. . .	69
Figura 9 – Ambiente do exemplar ilustrativo.	76
Figura 10 – Comparação entre a distância total percorrida e o raio de comunicação dos cenários apresentados na Tabela 5.	78
Figura 11 – Rotas percorridas pelos robôs no final do algoritmo5	79
Figura 12 – Ambiente do exemplar real.	80
Figura 13 – Rotas percorridas por todos os robôs nos cenários C1 e C3.	82
Figura 14 – Rotas percorridas por cada um dos robôs no cenário C1.	83
Figura 15 – Rotas percorridas por cada um dos robôs no cenário C2.	84
Figura 16 – Quadrirotor desenvolvido simulado no Gazebo.	85
Figura 17 – Plataforma acoplada ao robô terrestre utilizada para decolagens e pousos dos robôs aéreos.	86
Figura 18 – Processamento e memória exigidos para a simulação dos robôs em um ambiente 3D.	87
Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema de controle do quadrirotor.	88
Figura 20 – Ambiente de Simulação e Controle do Quadrotor - ASCQ	89
Figura 21 – Posições lineares.	90
Figura 22 – Posições angulares.	91
Figura 23 – Modelo 3D e vista explodida do quadrirotor.	116
Figura 24 – Desenho técnico com as cotas do protetor de hélice do quadrirotor.	117
Figura 25 – Desenho técnico com as cotas do trem de pouso do quadrirotor.	118
Figura 26 – Desenho técnico com as cotas do suporte do motor do quadrirotor.	119
Figura 27 – Desenho técnico com as cotas do chassi principal do quadrirotor.	120
Figura 28 – Desenho técnico com as cotas da caixa de proteção dos componentes eletrônicos.	121
Figura 29 – Desenho técnico com as cotas do suporte da câmera GoPro.	122
Figura 30 – Desenho técnico com as cotas da haste quadrada de alumínio.	123

Figura 31 – Análise estática do protetor de hélice.	124
Figura 32 – Análise estática do trem de pouso.	124
Figura 33 – Análise estática do suporte do motor.	125
Figura 34 – Análise estática do chassi principal.	125
Figura 35 – Análise estática da caixa de proteção dos componentes eletrônicos.	125
Figura 36 – Análise estática do suporte da camera.	126

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Algoritmo Geral de Alocação de Tarefas - GAT	61
Algoritmo 2 – Definição dos Depósitos	61
Algoritmo 3 – Alocação as Tarefas	63
Algoritmo 4 – Constrói o Percorso de cada Robô	63
Algoritmo 5 – Elimina Tarefas Justapostas	64
Algoritmo 6 – Elimina Tarefa com Pior Custo	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado da arte dos trabalhos.	32
Tabela 2 – Taxonomia para o problema de MRTA.	43
Tabela 3 – Características da Abordagem Baseada no Mecanismo de Mercado.	48
Tabela 4 – Valores dos parâmetros do quadrirotor projetado (Figura 23).	73
Tabela 5 – Variação de cenários no exemplar ilustrativo	76
Tabela 6 – Resultados obtidos para os cenários considerados em um ambiente real. . .	81
Tabela 7 – Valores de ganho do controlador.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CD	<i>Complex Dependencies</i>
CHREA	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
DART	<i>Dynamic Animation and Robotics Toolkit</i>
ESC	<i>Electronic Speed Control</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUIDE	<i>Graphical User Interface Design Environment</i>
IA	<i>Instantaneous Assignment</i>
ICMC	Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
ID	<i>In-Schedule Dependencies</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LiPo	<i>Lithium Polymer</i>
MD-MTSP	<i>Multiple Depots Multiple Traveling Salesman Problem</i>
MR	<i>Multi-Robot</i>
MRS	<i>Multi-Robot System</i>
MRTA	<i>Multi-Robot Task Allocation</i>
MT	<i>Multi-task</i>
mTSP	<i>Multiple Traveling Salesman Problem</i>
ND	<i>No Dependencies</i>
ODE	<i>Open Dynamics Engine</i>
OGRE	<i>Object-Oriented Graphics Rendering Engine</i>
ROS	<i>Robot Operating System</i>
SCP	<i>Set Covering Problem</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	<i>Single Robot</i>
ST	<i>Single Task</i>
TA	<i>Time Extended Assignment</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
TSP	<i>Travelling Salesman Problem</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

USV	<i>Unmanned Surface Vehicle</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>
XD	<i>Cross-Schedule Dependencies</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	26
1.2	Contribuições do trabalho	27
1.3	Organização do Texto	27
2	REVISÃO DA LITERATURA RELACIONADA	29
2.1	A robótica na agricultura	29
2.2	O problema de alocação de tarefas para múltiplos robôs (MRTA)	34
2.3	Considerações Finais	36
3	MÉTODOS E MATERIAIS	39
3.1	Sistemas com Múltiplos Robôs	39
3.2	Definição do Problema de MRTA	40
3.2.1	<i>Classificação do Problema de MRTA</i>	41
3.2.2	<i>Formulação do Problema</i>	42
3.2.3	<i>Função Objetivo</i>	44
3.2.4	<i>Paradigmas da Arquitetura de MRTA</i>	45
3.3	MRTA Baseada no Mecanismo de Mercado	47
3.3.1	<i>Prós e Contra das Abordagens Baseadas em Mercado</i>	49
3.4	Ambiente de Simulação	50
3.4.1	<i>Robôs suportados pelo ROS</i>	51
3.4.2	<i>Simulador 3D Gazebo</i>	52
3.5	Robôs utilizados	53
3.5.1	<i>Robô Aéreo Simulado</i>	54
3.5.2	<i>Robô Terrestre Simulado</i>	56
3.6	Considerações Finais	58
4	SISTEMA PROPOSTO	59
4.1	Descrição e Modelagem do Problema	59
4.2	Abordagem de Resolução Baseada no Mecanismo de Mercado	60
4.3	Quadrirotor Desenvolvido	66
4.3.1	<i>Modelo Matemático para Controle do Quadrirotor</i>	68
4.3.2	<i>Equações de Newton-Euler-Lagrange</i>	70
4.3.3	<i>Obtenção dos Parâmetros do Modelo Dinâmico do Quadrirotor</i>	72

4.3.4	<i>Obtenção dos Parâmetros</i>	73
4.4	Considerações Finais	74
5	RESULTADOS E ANÁLISE DO MODELO PROPOSTO	75
5.1	Resultados obtidos com o modelo proposto	75
5.2	Estudo das Simulações	84
5.3	Simulação do Controlador PD (<i>Proportional Derivative</i>) do quadri- rotor desenvolvido	87
5.4	Considerações Finais	92
6	CONCLUSÃO	93
6.1	Trabalhos Futuros	95
REFERÊNCIAS		97
APÊNDICE A PROJETO DO QUADRIROTOR		115
A.1	Projeto das Peças Estruturais	116
A.2	Análise Estática	124

INTRODUÇÃO

A agricultura é a mais antiga e ainda a mais importante atividade econômica da humanidade, fornecendo alimentos, rações, fibras e combustível necessários para nossa sobrevivência. Com a expectativa de que a população mundial chegue a 9 bilhões de pessoas até 2050, a produção agrícola deve duplicar para atender às crescentes demandas de alimentos e bioenergia (ONU, 2016). Dada a limitação dos recursos de terra, água e mão-de-obra, estima-se que é necessário que a eficiência da produtividade agrícola aumente 25% para atingir esse objetivo (REDBOND, 2015).

A agricultura pode ser vista como um ramo da álgebra matricial. Um agricultor deve constantemente lidar com um conjunto de variáveis, tais como o clima, os níveis de umidade do solo, o teor de nutrientes, a concorrência às suas culturas de ervas daninhas, ameaças de pragas e doenças, e os custos de tomar medidas para lidar com esses fatores. Se a álgebra é feita corretamente pelo agricultor, ele melhorará seu rendimento e maximizará seu lucro.

A agricultura de precisão trata-se de um sistema de manejo integrado de informações e tecnologias, fundamentado nos conceitos de que as variabilidades de espaço e tempo influenciam nos rendimentos dos cultivos (EMBRAPA, 2014). A agricultura de precisão visa o gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo, não somente das aplicações de insumos ou de mapeamentos diversos, mas de todo os processos envolvidos na produção. Esse conjunto de ferramentas para a agricultura pode fazer uso do *Global Navigation Satellite System* (GNSS), do Sistema de Informações Geográficas (SIG), de instrumentos e de sensores para medidas ou detecção de parâmetros ou de alvos de interesse no agroecossistema (solo, planta, insetos e doenças), de geoestatística e da mecatrônica.

A robótica e a automação podem desempenhar um papel significativo na sociedade, e aliada à agricultura de precisão pode atender às necessidades de produção agrícola de 2050 (REDBOND, 2015). Durante seis décadas, os robôs desempenharam um papel fundamental no aumento da eficiência e na redução do custo da produção industrial e dos produtos. Nos últimos

vinte anos, uma tendência semelhante começou a ter lugar na agricultura, com o GPS e tratores auto-guiados utilizando visão computacional e colheitadeiras que já estão disponíveis comercialmente. Mais recentemente, os agricultores começaram a experimentar sistemas autônomos que automatizam ou aumentam operações como poda, desbaste e colheita, além de ceifar, pulverizar e remover ervas daninhas e até mesmo semear. Na indústria de árvores frutíferas, por exemplo, os trabalhadores montados em plataformas robóticas mostraram ser duas vezes mais eficientes que os trabalhadores que utilizam escadas (IEEERAS, 2017). Os avanços nos sensores e nos sistemas de controle permitem um recurso e uma gestão integrada das pragas e doenças.

Os robôs agrícolas devem ser capazes de operar em ambientes agrícolas não estruturados com a mesma qualidade de trabalho alcançada pelos métodos e meios atuais. Para assimilar os sistemas robóticos, as tecnologias devem ser desenvolvidas para superar condições e variabilidade em constante mudança nos produtos e ambientes. Sistemas inteligentes são necessários para o desempenho de tarefas bem sucedidas em tais ambientes. O sistema robótico deve ser rentável, sendo intrinsecamente seguro e confiável para a segurança humana e a preservação do meio ambiente. Apesar de muitos progressos nos últimos anos, na maioria dos casos a tecnologia ainda não está comercialmente disponível. Sistemas de aquisição de informação, incluindo sensores, algoritmos de fusão e análise de dados, precisam ser ajustados às condições dinâmicas de ambientes agrícolas não estruturados. É necessária uma investigação intensiva sobre a integração de operadores humanos no circuito de controle do sistema para aumentar o desempenho e a confiabilidade do sistema. O tamanho do sistema deve ser reduzido, melhorando a integração de todas as peças e componentes. Para que os robôs atuem em ambientes agrícolas e executem tarefas agrícolas, a pesquisa deve focar-se em: fusão de sensores complementares para localizações e sensores adequados, desenvolvimento de manipuladores simples para cada tarefa agrícola, desenvolvimento de algoritmos de planejamento, navegação e orientação adequados a ambientes além de campos abertos e conhecidos *a priori*, e integrando operadores humanos nesta complexa e altamente dinâmica situação.

Para um melhor acompanhamento das plantações, alguns agricultores utilizam agricultura de precisão para coletar informações aéreas sobre suas terras. Antes do aparecimento de drones, somente eram utilizadas imagens de satélite, coletadas por sensores orbitais, e até mesmo imagens aéreas de aviões. Atualmente os drones vêm sendo utilizados para captação de imagens no campo (BARRIENTOS *et al.*, 2011; PURI; NAYYAR; RAJA, 2017). Através de instrumentos aerotransportados (fotografias aéreas) é possível medir a quantidade de cobertura vegetal e distinguir entre culturas e ervas daninhas. Usando uma técnica chamada análise multiespectral (SAQUI *et al.*, 2016), que analisa a forma como as plantas absorvem ou refletem diferentes comprimentos de onda da luz solar, eles podem descobrir quais as culturas estão florescendo e quais não. Essas imagens podem fornecer ainda o tipo de nutriente que está faltando em uma determinada área, as áreas que precisam de mais água, as partes que estão tomadas por pragas e ervas daninhas entre outras informações.

Um outro exemplo de coleta de dados são os sensores multiespectrais montados nas barras de pulverização de um trator que podem estimar as necessidades de nitrogênio das colheitas a serem pulverizadas e ajustar a dose de acordo (SANKARAN *et al.*, 2013). A fazenda moderna, então, produz dados em abundância. Entretanto, esses dados precisam ser coletados e interpretados de maneira eficiente, e para isso, a tecnologia da informação é essencial.

É sabido que o uso de sistemas com multi-robôs representa uma abordagem efetiva para resolver complexos problemas reais, como por exemplo, vigilância de áreas (GHAFFARKHAH; MOSTOFI, 2012), e mapeamento de regiões (CHEN *et al.*, 2010; CONTE; CRISTOFARO; MARTINELLI, 2011), entre diversas outras aplicações. Isso porque um sistema cooperativo de robôs representa uma alternativa efetiva ao uso de apenas um único robô. De fato, considerar uma colaboração efetiva entre um conjunto de robôs implica no cumprimento de uma missão de maneira mais eficiente do que o uso de um único robô. Um exemplo da aplicação um sistema de robôs na agricultura poderia ser na captação de dados que uma grande área deve ser varrida e a cooperação entre robôs terrestres e aéreos poderia cumprir essa missão de maneira muito mais eficiente que um único robô.

Em algumas culturas é preciso varrer toda a planta para detectar alguma praga, e somente com um robô terrestre essa tarefa pode não ser cumprida pela dificuldade de mobilidade desse tipo de robô. Um exemplo disso é na cultura de citros que compreende plantações de laranjas, limões, pomelos e tangerinas.

O Brasil é o quarto produtor mundial de citros e o maior produtor de laranja do mundo. Somente no ano de 2015 foram colhidos 760.646 hectares de citros em todas as regiões do Brasil (EMBRAPA, 2016). Uma doença que atinge o citros e que pode ser devastadora para a plantação é o *greening*. Trata-se da doença mais grave e destrutiva do citros do mundo em função da dificuldade de controle e da sua rápida disseminação. Para controle e detecção da doença recomenda-se fazer inspeções constantes, planta a planta, pelo menos quatro vezes por ano (FILHO; BARBODA; NASCIMENTO, 2009). Logo, neste caso é preciso analisar todas as plantas de áreas de plantações imensas de maneira rápida e efetiva. Esse é um exemplo em que a cooperação de robôs pode fazer toda a diferença na coleta de dados. Um robô terrestre pode percorrer a plantação em lugares acessíveis a este. Robôs aéreos podem estar acoplados ao robô terrestre e a partir do ponto onde o robô terrestre estiver estacionado, os robôs aéreos podem fazer a varredura das plantas, uma a uma, e sempre que preciso podem voltar para o robô terrestre para alguma manutenção, como por exemplo, uma carga de bateria.

Por outro lado, para utilizar um sistema multirrobôs é preciso designar as tarefas a serem realizadas por cada robô e coordenar todo o sistema. O presente trabalho considera um contexto particular dos sistemas multirrobôs em que um time de robôs heterogêneos tem que varrer uma grande área, visitando pontos específicos dessa área para executar uma determinada tarefa. Assim, é preciso determinar os pontos de onde os robôs partirão para executar as tarefas e designar essas tarefas para cada um dos robôs. Os robôs saem de um determinado ponto, determinado *a priori*,

e retornam para o mesmo ponto depois de executar as tarefas a ele designadas. A motivação desse cenário é justamente a agricultura de precisão em que robôs aéreos e terrestres podem cobrir uma grande área para coletar dados, como exemplificado anteriormente.

Assim, esse problema pertence à classe dos problemas de alocação de tarefas para robôs heterogêneos, conhecido na literatura como MRTA. Existem diversas formas de modelar e resolver esse problema na literatura (GERKEY; MATARIĆ, 2004). Nesta tese esse problema é modelado como uma combinação de um problema de cobertura de área (*set covering problem - SCP*) (CHVATAL, 1979) e um problema do caixeiro viajante com múltiplas viagens e múltiplos depósitos (*multiple depots multiple traveling salesman problem- MD-MTSP*) (BEKTAS, 2006). Inicialmente é preciso definir o local dos depósitos, ou seja, os pontos onde serão localizados os robôs terrestres, com o objetivo de cobrir toda a área com o menor número possível de robôs, ou seja, resolver um problema SCP. Em seguida, a partir dos robôs terrestres (depósitos) definir de maneira otimizada as rotas dos robôs aéreos (viajantes) que iniciam sua rota no depósito, e depois de passar por todas as tarefas a ele designadas, retornam para o depósito. Para resolver o problema podem ser usados diversos métodos de solução que são divididos em três categorias: abordagem centralizada, distribuída e baseada em leilão (mercado) (GERKEY; MATARIĆ, 2004). Nesta tese é proposto um método de solução baseado em leilão, pois segundo alguns autores essa abordagem é mais aplicável a sistemas dinâmicos, do que uma abordagem centralizada, por exemplo, e tem mais sucesso em aplicações em ambientes reais (KOUBAA *et al.*, 2017).

Na literatura existem alguns trabalhos que tratam o MD-MTSP aplicado a um sistema multirrobôs, (BOTELHO; ALAMI, 1999; SARIEL; ERDOGAN; BALCH, 2007; CHEIKH-ROUHO; KOUBAA; BENNACEUR, 2014; KOUBAA *et al.*, 2017; TRIGUI *et al.*, 2017). Existem também trabalhos que utilizam o SCP com multi-robôs (SHEHORY; KRAUS, 1998). Até onde se pesquisou, nenhum trabalho integrou o SCP e o MD-MTSP em um sistema multirrobô para resolver o problema tratado nessa tese. Assim, nessa tese investiga-se a utilização desses dois modelos em um sistema multirrobôs para coleta dados em grandes áreas, como encontradas no setor de agricultura.

Além disso, investiga-se também a viabilidade da construção de um quadrirotor de baixo custo por meio da impressão de peças utilizando uma impressora 3D. Avalia-se também a usabilidade e a aplicabilidade desse quadrirotor em situações reais. O intuito é provar a viabilidade desse projeto para que num futuro esse quadrirotor possa ser aprimorado e integrado com o modelo de alocação de tarefas proposto nessa tese para a coleta de dados na agricultura.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é pesquisar e aplicar abordagens de alocação de tarefas para múltiplos robôs, tendo como aplicação a coleta de dados na agricultura de precisão. Para alcançar esse objetivo principal será necessário realizar o estudo do processo de alocação de

tarefas para múltiplos robôs para identificar a melhor abordagem para o determinado problema. Neste contexto, destaca-se a proposta de setorização de grandes áreas através de um método de otimização da alocação das tarefas baseado no modelo de mercado. Através de um processo de leilão que considera diversos fatores, para determinar qual o robô mais apto para realizar a tarefa num determinado instante. O objetivo é desenvolver um *framework* capaz de alocar diversas tarefas para múltiplos robôs heterogêneos, levando em consideração as especificidades do ambiente dinâmico da agricultura de precisão.

Aliado ao objetivo principal desse projeto, pretende-se desenvolver um protótipo de quadrirotor de baixo custo, como plataforma robusta para diversas aplicações, tais quais: coleta de dados, imageamento aéreo, rastreamento de veículos, segurança entre outros. Com isso, pretende-se mostrar que é possível desenvolver robôs de baixo custo e que podem ser aplicados inclusive na agricultura de precisão. Pretende-se replicar esse robô aéreo a fim de testar e validar o *framework* em um ambiente dinâmico e real.

1.2 Contribuições do trabalho

O presente trabalho possui duas contribuições principais. A primeira é a proposta, implementação e validação de um *framework*, fazendo uso de uma técnica de cobertura de área, para o monitoramento e distribuição otimizada de tarefas entre os robôs utilizando o mecanismo baseado em mercado. Uma possível aplicação para esse problema é a otimização da alocação de tarefas para a coleta de dados na agricultura de precisão com robôs heterogêneos.

A segunda contribuição é o projeto e desenvolvimento de um quadrirotor de baixo custo: projeto mecânico, projeto eletrônico, modelagem dinâmica e validação do projeto por meio de simulação computacional e em aplicações reais. O desenvolvimento e a aplicação desse quadrirotor geraram os seguintes trabalhos: [Fraccaroli et al. \(2016\)](#), [Montanari et al. \(2015a\)](#), [Montanari et al. \(2015b\)](#) e [Neves et al. \(2015\)](#). As aplicações reais do quadrirotor demonstram o potencial dessa plataforma para ser utilizada na coleta de dados na agricultura de precisão.

1.3 Organização do Texto

Este documento está organizado em 6 capítulos, que abordam a contextualização e os objetivos, os trabalhos relacionados, a base conceitual, o modelo proposto, os experimentos e os resultados, bem como as considerações finais. A estrutura e os conteúdos de cada um dos capítulos, estão resumidos a seguir:

- O Capítulo 2 tem como objetivo geral, apresentar os trabalhos relacionados que abordam a solução da coordenação de múltiplos robôs utilizando alocação de tarefas.

- O Capítulo 3 trata dos fundamentos teóricos e principais conceitos sobre alocação de tarefas para múltiplos robôs e sobre o ambiente que pode ser utilizado para simulação do modelo em uma situação real.
- No Capítulo 4 é apresentado com detalhes o problema a ser resolvido e explanado o modelo proposto para a alocação de tarefas. Neste capítulo apresenta-se também o projeto e desenvolvimento do quadrirotor.
- No Capítulo 5 são explicados o ambiente utilizado para simulação dos experimentos realizados e também são analisados os resultados obtidos.
- O Capítulo 6 encerra o documento, onde serão revisados os objetivos e conceitos que motivaram o desenvolvimento desse trabalho. Serão detalhadas as contribuições resultantes e os trabalhos futuros.
- No Apêndice A é detalhado o projeto, construção e desenvolvimento do quadrirotor.

REVISÃO DA LITERATURA RELACIONADA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre a robótica aplicada na agricultura e uma revisão da literatura relacionada a modelagem e resolução de problemas de alocação de tarefas para multirrobo. Dada a vasta bibliografia sobre ambos assuntos, não há nenhuma pretensão de esgotá-los, mas sim ter um panorama do estado da arte dos mesmos.

2.1 A robótica na agricultura

A produtividade agrícola aumentou significativamente ao longo dos anos como resultado da intensificação, mecanização e automação dos processos do campo (NOF, 2009; ZHANG, 2013). É um alvo importante para a aplicação de vários tipos de tecnologias projetadas para aumentar tanto o rendimento como a qualidade da produção, e ao mesmo tempo reduzir os custos da agricultura. Por exemplo, a semeadura de precisão e o plantio aumentam o tamanho médio da planta e a uniformidade da maturidade da planta. A fertilização e irrigação precisa, consiste em adicionar água e nutrientes necessários à cultura apenas no momento e posição ideais, diminuindo assim a proporção de insumos agrícolas para a produção (TREMBLAY; FALLON; ZIADI, 2011) e o impacto ambiental (TREMBLAY *et al.*, 2012). Em outro exemplo, a otimização da aplicação de nitrogênio, com base no sistema de detecção remota e inferência *fuzzy*, resultou no mesmo rendimento que o obtido com a aplicação uniforme recomendada que exigiu 31% mais nitrogênio (TREMBLAY *et al.*, 2010) do que a aplicação otimizada. Além disso, estudos recentes indicam que o uso de robôs ou tratores autônomos em diversas tarefas agrícolas reduzem o consumo de combustível e a poluição do ar (SOTO *et al.*, 2016; SOTO *et al.*, 2015).

No século XX, o progresso tecnológico nos países desenvolvidos reduziu a mão-de-obra tradicionalmente disponível para as atividades agrícolas (CERES *et al.*, 1998). A automação aumentou consideravelmente a produtividade das máquinas agrícolas, aumentando a eficiência,

a confiabilidade e a precisão e reduzindo a necessidade de intervenção humana (SHUELLER, 2006). No entanto, a agricultura continua sofrendo de uma importante falta de trabalhadores minimamente treinados.

Os problemas gerados pela ausência de trabalhadores são ampliados pelas tendências de aumento do tamanho da fazenda, diminuição do número de agricultores e aumento do impacto ambiental da produção de alimentos, exigindo práticas agrícolas ainda mais eficientes (NAGASAKA *et al.*, 2004). A produtividade da agricultura convencional, em que o cultivo e manejo manualmente conduzidos pelos agricultores pode ser significativamente melhorado usando máquinas inteligentes (XIA *et al.*, 2015). Embora a robótica e a automação exijam uma força de trabalho e equipamentos especializados mais onerosos, estas contribuem para o aumento da produtividade agrícola, porque a força de trabalho necessária, incluindo operadores de máquinas qualificados, geralmente diminui o suficiente para compensar o custo inicial mais alto. Além do número reduzido de fazendas, a idade média da mão-de-obra agrícola está aumentando continuamente, indicando que essa profissão não é suficientemente atraente para a geração mais jovem (IIDA *et al.*, 2013; NOGUCHI *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2013). No entanto, apesar do grande desafio das aplicações de robótica e automação para as explorações agrícolas, a redução das tarefas realizadas em condições adversas e o aumento da qualidade de vida do agricultor devem aumentar a sua atratividade para a profissão agrícola.

A maioria das operações agrícolas ocorre em ambientes não estruturados caracterizados por rápidas mudanças no tempo e no espaço, como ambientes militares, subaquáticos e espaciais (BECHAR; EDAN, 2003). O terreno, a paisagem da vegetação, a visibilidade, a iluminação e outras condições atmosféricas são indefinidos, variam continuamente, possuem incerteza inerente e geram situações imprevisíveis e dinâmicas (BECHAR, 2010).

A complexidade aumenta quando se trata de objetos naturais, como frutas e folhas, devido à alta variabilidade de forma, textura, cor, tamanho, orientação e a posição que, em muitos casos, não podem ser determinadas *a priori*.

O mundo robótico pode ser dividido em quatro grupos de acordo com as características estruturais dos ambientes e objetos:

1. O ambiente e os objetos são estruturados;
2. O ambiente não é estruturado e os objetos são estruturados;
3. O ambiente é estruturado e os objetos não são estruturados, e
4. O ambiente e os objetos são desestruturados.

Cada domínio da robótica, como industrial, médico, saúde, mineração, entre outros, pode ser categorizado e associado a um desses grupos. O domínio agrícola está associado ao quarto grupo no qual nada está estruturado, tornando-o um desafio em termos de comercialização.

Ambientes agrícolas exigem que o robô seja capaz de se mover, ao contrário da maioria dos robôs em fábricas ou veículos em parques de estacionamento (CANNING; EDWARDS; ANDERSON, 2004). Em tais ambientes, há muitas situações nas quais robôs autônomos falham devido a muitos eventos inesperados (STEINFELD, 2004). Para operar em ambientes não estruturados este requisito complica a aplicação da robótica e resulta em um sistema que é difícil e caro de se desenvolver.

A pesquisa com veículos autônomos na agricultura teve início nos anos 60, concentrando-se principalmente no desenvolvimento de sistemas de direção automáticos (WILSON, 2000). Na década de 90, a maioria das operações mecânicas em culturas no campo envolveu máquinas pesadas, poderosas e de alta capacidade, caracterizadas por alta demanda de energia e altos custos de manuseio e operação. No entanto, na última década, a pesquisa em várias universidades e instituições de pesquisa em todo o mundo passou por uma completa mudança de paradigma (STRATEN, 2004; SIVARAMAN; BURKS, 2006). A automatização de robôs agrícolas é agora considerada essencial para melhorar a eficiência do trabalho e deve incluir o potencial para melhorar a qualidade dos produtos frescos, reduzir os custos de produção e reduzir o trabalho árduo (CHOI *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, houve uma quantidade significativa de pesquisas em todo o mundo (CONESA-MUÑOZ *et al.*, 2015) demonstrando a viabilidade técnica de robôs agrícolas para uma variedade de culturas, tarefas agrícolas e habilidades robóticas, conforme apresentado na Tabela 1. No entanto, soluções de automação ainda não foram comercialmente implementadas com sucesso para operações de campo e apenas poucos desenvolvimentos foram adotados e colocados em prática (BURKS *et al.*, 2005; XIANG; JIANG; YING, 2014).

As ineficiências de produção são causadas por autonomia limitada e interação homem/robô, levando a longos tempos de ciclo e atrasos, baixas taxas de detecção (ZHAO *et al.*, 2016) e incapacidade de realizar tarefas agrícolas em ambientes não estruturados. No entanto, embora limitado em número, algumas aplicações de robótica estão agora comercialmente disponíveis. Estas aplicações foram implementadas passo a passo, resultando em bom desempenho de algumas tarefas dedicadas. Exemplos incluem robôs de ordenha (HALACHMI *et al.*, 2003; HANSEN, 2015; KOLBACH *et al.*, 2013) e combinações ou tratores autônomos (BELL, 2000; SHUELLER, 2006; THUILOT *et al.*, 2002). O processo de implementação para o desenvolvimento destes primeiros robôs autônomos indicou que as desvantagens e ineficiências requerem soluções que usam as vantagens do ser humano para permitir ao robô reagir e lidar com condições dinâmicas e complexas, incorporando assim sistemas homem/robô colaborativos, pelo menos por um tempo (HENTEN *et al.*, 2013).

Tabela 1 – Estado da arte dos trabalhos.

CATEGORIA	TIPO (FOCO DA PESQUISA)	REFERÊNCIAS
Cultura	Citros	(OZTURK; KIRCI; GUNES, 2016; LU; SANG, 2015) (HANNAN; BURKS; BULANON, 2007; HARRELL <i>et al.</i> , 1990) (MEHTA; MACKUNIS; BURKS, 2016; MUSCATO <i>et al.</i> , 2005); (BROWN, 2005; EDAN; MILES, 1993)
	Milho	(LI; GU; ZHAO, 2016; LIANGXI <i>et al.</i> , 2016; LIU <i>et al.</i> , 2016; ZERMAS <i>et al.</i> , 2015) (TROYER; PITLA; NUTTER, 2016; KARGAR; SHIRZADIFAR, 2013);
	Flores	(TANG <i>et al.</i> , 2016; RATH; KAWOLLEK, 2009) (OOSTER <i>et al.</i> , 2013; ABARNA; SELVAKUMAR, 2015);
	Arroz	(CHEN; TOJO; WATANABE, 2003b; CHOI <i>et al.</i> , 2015) (TAMAKI; NAGASAKA; KOBAYASHI, 2009; TAMAKI <i>et al.</i> , 2013);
Tarefas agrícolas	Semear e enxerto	(CHOUDHURY; KAUR; VERMA, 2016; NAIK; SHETE; DANVE, 2017) (HU <i>et al.</i> , 2014; HUANG; LEE, 2008; LIN; YI; LIU, 2016) (HAIBO <i>et al.</i> , 2015; MAO <i>et al.</i> , 2014; NAGASAKA <i>et al.</i> , 2007) (NAGASAKA <i>et al.</i> , 2001; RUANGURAI <i>et al.</i> , 2015) (KUTZ <i>et al.</i> , 1987; RYU; KIM; HAN, 2001);
	Proteção da planta e controle de ervas daninhas	(SABANCI; AYDIN, 2017; LAURSEN <i>et al.</i> , 2016; SANTOS <i>et al.</i> , 2016) (YOON; KIM, 2013; CHEN; TOJO; WATANABE, 2003a; CHOI <i>et al.</i> , 2015) (HIREMATH <i>et al.</i> , 2012; KIM <i>et al.</i> , 2012; LAMM; SLAUGHTER; GILES, 2002) (ASTRAND; BAERVELDT, 2005; BAK; JAKOBSEN, 2004; BAKKER <i>et al.</i> , 2010) (CHEN <i>et al.</i> , 2015; OGAWA <i>et al.</i> , 2006; PEREZ-RUIZ <i>et al.</i> , 2014) (RUCKELSHAUSEN <i>et al.</i> , 2006; TORRES-SOSPEDRA; NEBOT, 2014) (SLAUGHTER; GILES; DOWNEY, 2008; TILLET <i>et al.</i> , 2008; EVERT <i>et al.</i> , 2011);
	Colheita	(YOU; BURKS, 2016; MEHTA; MACKUNIS; BURKS, 2016) (DAVIDSON <i>et al.</i> , 2016; EDAN <i>et al.</i> , 2000; FOGLIA; REINA, 2006) (HAYASHI <i>et al.</i> , 2010; KONDO; MONTA; FUJIURA, 1996; ZHAO <i>et al.</i> , 2011) (CERES <i>et al.</i> , 1998; RATH; KAWOLLEK, 2009) (AHAMMED <i>et al.</i> , 2015; SCARFE <i>et al.</i> , 2009; TANIGAKI <i>et al.</i> , 2008) (ZHANG <i>et al.</i> , 2013; MEHTA; BURKS, 2014; MUSCATO <i>et al.</i> , 2005);
Tarefas de apoio	Direção e navegação	(KIM; LEE, 2015; BALL <i>et al.</i> , 2016; BENGOCHEA-GUEVARA <i>et al.</i> , 2016) (ASTRAND; BAERVELDT, 2005; BAHADORIAN <i>et al.</i> , 2014; BAKKER <i>et al.</i> , 2011) (BELL, 2000; BOCHTIS; SØRENSEN; VOUGIOUKAS, 2010; SOUSA <i>et al.</i> , 2013) (DONG; HEINEMANN; KASPER, 2011; GÁLGERAN; CARRERAS, 2013) (KHOT <i>et al.</i> , 2006; MORIMOTO; SUGURI; UMEDA, 2005; MOUSAZADEH, 2013) (THUILOT <i>et al.</i> , 2002; HAMEED; COUR-HARBO; OSEN, 2016; WILSON, 2000);
	Mapeamento e localização	(ZHAO; ZHANG, 2016; LEPEJ; RAKUN, 2016) (BAYAR <i>et al.</i> , 2015; EIZICOVITS; BERMAN, 2014; GIMENEZ <i>et al.</i> , 2015) (GRIEPENTROG <i>et al.</i> , 2005; HANSEN <i>et al.</i> , 2013; IP; RAD, 2004) (QIAO <i>et al.</i> , 2005; SE; LOWE; LITTLE, 2005; UNDERWOOD <i>et al.</i> , 2015);
	Colheita de frutas e vegetais	(HOU, 2016; WANG <i>et al.</i> , 2017; SUBIĆ <i>et al.</i> , 2017) (CHIU; YANG; CHEN, 2013; DIMEAS <i>et al.</i> , 2015; EIZICOVITS; BERMAN, 2014) (KONDO <i>et al.</i> , 2010; KUBOTA <i>et al.</i> , 2008; LI <i>et al.</i> , 2013; MONTA; KONDO; TING, 1998)
	Interação multirrobô	(LI <i>et al.</i> , 2015; PATTEN; FITCH; SUKKARIEH, 2016; ZHANG; NOGUCHI; YANG, 2016) (CONESA-MUÑOZ <i>et al.</i> , 2015; BECHAR; NOF; WACH, 2015; TERVO; KOIVO, 2014) (EMMI <i>et al.</i> , 2013; GARCÍA-PÉREZ <i>et al.</i> , 2008).

Fonte: Adaptada de Bechar e Vigneault (2016).

Segundo Bechar e Vigneault (2016), sistemas que fazem uso de robôs autônomos para produção de culturas são compostos por vários subsistemas e dispositivos que lhes permitem operar e executar suas tarefas. Esses sub-sistemas e dispositivos lidam com o planejamento do caminho a ser seguido, a navegação ou habilidades de orientação, a mobilidade, a direção

e controle, os sensores de detecção, manipuladores ou dispositivos funcionais similares, e acima de todas essas, lidam com o gerenciamento individual ou simultâneo eventos inesperados em algum nível de autonomia. Conforme apresentado na Figura 1, os robôs agrícolas são geralmente designados para executar uma tarefa principal, como por exemplo, plantio, capina, poda, colheita, embalagem, manuseio, monitoramento, coleta de informação, etc. Para ter sucesso na execução da tarefa principal, os sistemas de robôs autônomos exigem a capacidade de executar várias tarefas de apoio, como por exemplo, localização e navegação, planejamento do caminho percorrido, detecção do objeto que será tratado, etc. Informações e comandos são transferidos entre a tarefa principal e as tarefas de suporte e entre as próprias tarefas de suporte. Por exemplo, no desenvolvimento de um robô para monitoramento de doenças, a tarefa principal é o monitoramento de doenças (SCHOR *et al.*, 2016), o sistema de robô autônomo utilizado precisa ter a capacidade de executar as tarefas de apoio de auto-localização, planejamento de rotas, direção e navegação do trajeto desde sua atual localização até a próxima designada, a colaboração com o operador humano ou ainda a iteração, ou comunicação, com outros robôs, a iteração com objetos inesperados no caminho, e a modificação da trajetória planejada quando necessário.

Figura 1 – Estrutura de subsistemas de tarefas em um robô agrícola.

Fonte: Bechar e Vigneault (2016).

Uma vez que para a operacionalização de robôs agrícolas estão envolvidas diversas tarefas de apoio em torno de uma tarefa principal, as pesquisas dessas tarefas de apoio de forma particular são tão importantes quanto a pesquisa e operacionalização de todo o sistema de fato.

Por exemplo, o planejamento da trajetória dos robôs é uma das tarefas de apoio mais comum e exigida nos robôs agrícolas (BOCHTIS; SØRENSEN; VOUGIOUKAS, 2010). O planejamento básico da rota do robô envolve encontrar um caminho de qualidade de um dado ponto de início até um ponto de destino evitando colisão com obstáculos. O planejamento da trajetória foi originalmente estudado nas aplicações de robótica, mas tem ganhado mais relevância em outras áreas também, como por exemplo, computação gráfica, simulação e jogos. Em um

sistema com multirrobo, por exemplo, essa trajetória deve ainda considerar a comunicação entre os robôs para não haver sobreposição de tarefas e nem colisão entre eles. Apesar de todos os estudos em torno dessa tarefa de apoio, muito ainda pode ser contribuído e desenvolvido para essa tarefa em particular.

De forma geral, para que os robôs atuem satisfatoriamente em ambientes agrícolas e executem tarefas agrícolas, a pesquisa deve se concentrar na fusão de vários sensores complementares para alcançar capacidade adequada de localização e detecção, o desenvolvimento de manipuladores simples para realização de tarefas agrícolas específicas, o desenvolvimento de planejamento de trajetórias, navegação e algoritmos de orientação adequados ao ambiente agrícola e, a integração do operador humano nesta situação complexa e altamente dinâmica.

2.2 O problema de alocação de tarefas para múltiplos robôs (MRTA)

Em aplicações complexas de robótica, tais como encontradas em [Khamis, Elmogy e Karray \(2011\)](#), [Koubaa, Trigui e Chaari \(2012\)](#), [Trigui *et al.* \(2012\)](#) e [Pippin, Christensen e Weiss \(2013\)](#), os robôs precisam colaborar entre si para completar suas respectivas missões de forma eficiente. Na verdade, os sistemas de multirrobo cooperativos representam uma alternativa aos sistemas de um único robô para uma vasta gama de aplicações, uma vez que a consideração do efeito colaborativo entre robôs levam-os a realizar suas missões de forma mais eficiente. Como já mencionado no Capítulo 1, o problema de alocação de tarefas para robôs aborda justamente a atribuição de tarefas a robôs para realização de missões colaborativas.

O problema de MRTA pode ser formulado como: dado n robôs e m tarefas, é preciso definir uma eficiente atribuição de robôs a tarefas com o objetivo de minimizar os custos totais do sistema. Na literatura há muitos trabalhos propondo diferentes soluções para o MRTA e aplicando-o nos mais diversos contextos. Uma taxonomia para o MRTA nos mais diversos campos é apresentada por [Gerkey e Mataric \(2004\)](#). Os autores definem três principais eixos. O primeiro é robôs de tarefa única (*single-task robots* - ST) versus robôs multitarefa (*multi-task robots* - MT), que distingue os problemas em que cada robô pode executar apenas uma tarefa em um tempo e problemas nos quais alguns robôs podem executar múltiplas tarefas simultaneamente. A segunda classificação é para tarefas de um único robô (*single-robot tasks* - SR) versus tarefas de multirrobo (*multi-robot tasks* - MR), que distingue entre problemas em que cada tarefa exige exatamente um robô para executá-la e problemas em que algumas tarefas podem exigir múltiplos robôs. E o último eixo, diferencia entre atribuição instantânea (*instantaneous assignment* - IA) e atribuição de tempo prolongado (*time-extended assignment* - TA) distinguindo entre problemas que abordam a atribuição instantânea de tarefas aos robôs sem planejamento para futuras alocações e problemas com alocações atuais e futuras, o que significa que cada um dos robôs tem várias tarefas atribuídas que devem ser executadas de acordo com

um determinado cronograma.

A partir de uma falha dessa taxonomia apresentada pelos próprios autores [Gerkey e Mataric \(2004\)](#), uma taxonomia mais abrangente e sistematizada para o MRTA, chamada de *iTax*, foi apresentada por [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#). A partir das classificações propostas em [Gerkey e Mataric \(2004\)](#), [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#) são correlacionadas às classificações de restrições e utilidades. Os autores inicialmente classificam os problemas em **Sem Dependência** (*No Dependencies* (ND)) em que não há nenhuma dependência de quaisquer outras tarefas ou robôs no sistema, **Dependência de Programação** (*In-Schedule Dependencies* (ID)), dependência entre a programação das tarefas ou robôs, **Dependência de Cronograma** (*Cross-Schedule Dependencies* (XD)), em que há dependência de cronograma próprio e de outros robôs e **Dependências Complexas** (*Complex Dependencies* (CD)) que é similar ao XD, mas o robô também lida com subtarefas de outros robôs. Além disso, [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#) mapeia categorias de MRTA para modelos matemáticos existentes de otimização combinatorial e pesquisa operacional e desenha paralelos importantes entre a robótica e esses campos. Mais detalhes dessa taxonomia são apresentados no Capítulo 3.

Conforme discutido no Capítulo 1 o problema abordado nessa tese envolve a designação de tarefas a multirrobôs, em que cada robô executa uma única tarefa de cada vez e cada tarefa pode ser executada por um único robô. A motivação é que cada árvore seja escaneada/monitorada por um único robô. Assim, múltiplas tarefas são designadas para cada robô, ou seja, é necessário fazer a programação das tarefas de cada robô. Entretanto, como os robôs estão dividindo as tarefas, a programação de um robô influencia na programação dos outros robôs. Logo, pela taxonomia apresentada em [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#), trata-se de um problema ID[ST-SR-TA]. Segundo [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#), esse problema pode ser considerado como um problema do caixeiro viajante com múltiplas viagens e múltiplos depósitos, MD-MTSP, como é considerado nessa tese. Além disso, considera-se também que os robôs aéreos partirão de robôs terrestres estrategicamente posicionados na plantação, que são os depósitos. A definição do posicionamento desses robôs depósitos pode ser abordada através de um problema de cobertura de conjuntos, o SCP. Note que como observado por [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#), ambos os problemas MD-MTSP e SCP são problemas de otimização combinatória e pertencem a classe *NP-hard*. Mais detalhes do problema estão descritos no Capítulo 4.

Dada a vasta literatura existente sobre o problema de alocação de tarefas para multirrobôs, a partir daqui nessa revisão serão apresentados os trabalhos que se inter-relacionam com o problema resolvido nessa tese.

Para resolver o MRTA as abordagens existentes na literatura podem ser divididas em três categorias: (1) abordagens centralizadas, que assumem o conhecimento da informação global por um agente (por exemplo, uma estação de controle); (2) abordagens descentralizadas, em que as decisões (ou soluções locais) são baseadas na informação local de cada agente que está executando uma tarefa (um robô, por exemplo); e (3) abordagens baseadas em leilão (mercado),

que podem ser centralizadas ou descentralizadas.

Abordagens centralizadas podem ser encontradas por exemplo nos trabalhos de [Brumitt e Stentz \(1998\)](#), [Vidal et al. \(2012\)](#) e [Escobar et al. \(2014\)](#). Os três trabalhos propõem meta-heurísticas para resolver o MD-MTSP que encontram soluções próximas da ótima. Embora abordagens centralizadas sejam boas para encontrar soluções próximas da ótima, elas apresentam algumas limitações porque normalmente são computacionalmente caras. Outra limitação das abordagens centralizadas é que estas não lidam de forma eficiente com sistemas dinâmicos de mudanças, como acontece na realidade, e requerem conhecimentos prioritários sobre todos os estados do sistema para apresentarem uma solução. De qualquer forma, esses métodos permanecem apropriados para uma determinada classe de problemas quando o sistema é estático e não muda com frequência.

As abordagens descentralizadas são mais efetivas para sistemas reais. [Fazli, Davoodi e Mackworth \(2013\)](#) modelam o problema de multirrobôs repetindo uma área de cobertura como um MTSP e propõem três algoritmos distribuídos de clusterização. Em [Kulkarni e Tai \(2010\)](#) os autores propõem uma solução para o MD-MTSP usando coletivos de probabilidade, em que os veículos (robôs) são considerados agentes autônomos e todas as rotas atribuídas aos veículos como uma estratégia. Quando o problema de cobertura é conduzido sem qualquer informação *a priori* sobre o meio ambiente, trata-se de um problema equivalente ao problema geral de exploração com múltiplos robôs. [Batalin e Sukhatme \(2002\)](#) propõem algoritmos baseados na iteração entre os robôs para resolver o problema. Nesse trabalho os robôs são equipados com comunicação *wireless* e eles se repelem mutuamente um dos outros quando estão dentro do alcance dos seus sensores. Isto é baseado na observação de que os robôs se espalham sobre o meio ambiente, a fim de alcançar uma boa cobertura como uma equipe. [Zheng et al. \(2005\)](#) também apresentam uma abordagem de cobertura de tarefas para um sistema multirrobôs.

As abordagens baseadas em mercado podem ser centralizadas ou distribuídas. Essa pode ser considerada um outra categoria de solução do MRTA por seguir um procedimento específico. Mais detalhes sobre essa abordagem são descritos no Capítulo 3. [Sariel, Erdogan e Balch \(2007\)](#) propõem um algoritmo dinâmico baseado em mercado para resolver o MTRV *multiple traveling robots problem*. Cada robô seleciona suas próprias tarefas de maneira incremental e distribuída. Inicialmente os robôs selecionam as tarefas mais próximas otimizando uma função de distância, por exemplo. Através de um protocolo de comunicação, os robôs trocam as tarefas entre eles visando otimizar suas próprias funções de custo. Os resultados da simulação proposta pelos autores mostraram a eficiência da abordagem proposta em termos de escalabilidade, comprimento total do caminho e sobrecarga das mensagens de comunicação. Nessa mesma linha de algoritmo incremental estão os trabalhos de [Botelho e Alami \(1999\)](#), [Kivelevitch, Cohen e Kumar \(2013\)](#) e [Koubaa et al. \(2017\)](#). Essas abordagens mostram-se em geral eficientes para resolverem o MRTA inclusive em simulações reais, como descrito por [Botelho e Alami \(1999\)](#).

Em [Cui, Guo e Gao \(2013b\)](#) os autores propõem também uma estratégia de negociação

entre robôs baseados na teoria dos jogos. As tarefas no final da negociação são melhor alocadas do que no início, entretanto a eficiência do algoritmo é limitada a um número médio de tarefas e robôs. Outras abordagens de mercado para resolver o MRTA são encontradas em [Brumitt e Stentz \(1998\)](#), [Dias \(2004\)](#), [Abarna e Selvakumar \(2015\)](#) entre outros [Lagoudakis et al. \(2005\)](#).

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se uma breve revisão bibliográfica sobre como a robótica vem sendo aplicada na agricultura de precisão e de como o MRTA está sendo abordado na literatura. Na agricultura os sistemas robóticos envolvem uma tarefa principal, como por exemplo, coleta de imagens e tarefas de apoio são utilizadas para execução dessa tarefa principal. Aponta-se que uma das tarefas de apoio que merece atenção é justamente o planejamento da trajetória. Ou seja, o planejamento da rota das tarefas que deverão ser executadas.

Paralelamente, nos trabalhos de MRTA, a classe de problemas estudada nessa tese ID[ST-SR-TA] visa alocar tarefas a múltiplos robôs minimizando uma função custo, como por exemplo, a distância percorrida. Os problemas dessa classe podem ser modelados via MD-MTSP. A abordagem de resolução mais utilizada para esses problemas é a baseada em mercado.

MÉTODOS E MATERIAIS

Este capítulo tem como objetivo descrever um panorama geral do problema de alocação de tarefas para múltiplos robôs (MRTA), apresentando conceitos teóricos, classificação e arquitetura, assim como as abordagens e as características básicas de sistemas com múltiplos robôs. Além disso, são descritos aspectos da abordagem baseada no mecanismo de mercado, aplicado ao problema de MRTA, uma vez que essa é a metodologia utilizada para resolver o problema desta tese que foi brevemente apresentado no Capítulo 1 e que está descrito em mais detalhes no Capítulo 4.

Além disso, neste capítulo descreve-se a plataforma de simulação, apresentando suas principais características. Apresenta-se o ambiente gráfico 3D integrado ao simulador para visualização dos robôs. Por fim, descrevem-se duas plataformas robóticas que são utilizadas para validação experimental do modelo proposto.

3.1 Sistemas com Múltiplos Robôs

Os sistemas com múltiplos robôs (*Multi-Robot System* (MRS)), são grupos de robôs projetados visando executar algum comportamento coletivo. Por meio desse comportamento coletivo, alguns objetivos que até então eram impossíveis de serem executados por um único robô, tornam-se viáveis e atingíveis. O MRS está na agenda da comunidade robótica há vários anos. É apenas na última década, no entanto, que o tema realmente ascendeu, como visto a partir do crescente número de publicações que aparecem nas revistas e conferências. Uma das razões que o tópico tornou-se mais popular é os vários benefícios previstos de MRS em comparação com sistemas de robô único. Esses benefícios incluem, mas não estão limitados ao seguinte:

- Resolver a complexidade da tarefa: algumas tarefas podem ser bastante complexas para um único robô, ou até mesmo impossível. Esta complexidade pode também ser devida à

natureza distribuída das tarefas e / ou à diversidade das tarefas em termos de diferentes requisitos.

- Aumentar o desempenho: o tempo de conclusão da tarefa pode ser dramaticamente diminuído se muitos robôs cooperarem para executar as tarefas em paralelo.
- Aumento da confiabilidade: aumentando a confiabilidade do sistema através da redundância porque ter apenas um robô pode funcionar como um gargalo para todo o sistema, especialmente em momentos críticos. Mas quando ter vários robôs fazendo uma tarefa e uma falha, outros ainda poderiam fazer o trabalho.
- Simplicidade no design: ter robôs pequenos e simples será mais fácil e mais barato de implementar do que ter apenas um único robô poderoso.

Estes benefícios têm atraído muitos pesquisadores da academia e da indústria para investigar a aplicabilidade da MRS em muitas áreas pertinentes de importância industrial e comercial, tais como segurança inteligente, busca e salvamento, vigilância, desminagem, monitorização do ambiente e cuidados com a saúde.

Para desenvolver e implantar um MRS robusto em aplicações no mundo real, uma série de problemas desafiadores precisam ser resolvidos. Dentre os mais importantes, temos: alocação de tarefas, formação de grupos, detecção e rastreamento cooperativo de um objeto, transmissão das informações, mapeamento e localização e auto-organização. A seção a seguir discute em detalhes o problema de alocação de tarefas como um dos problemas desafiadores do MRS.

3.2 Definição do Problema de MRTA

A alocação de tarefas para múltiplos robôs é um dos problemas mais desafiadores do MRS, especialmente quando se trata de robôs heterogêneos equipados com diferentes tipos de sensores e atuadores, e são obrigados a executarem da melhor forma diversas tarefas, com diferentes requisitos e restrições. Esse problema pode ser visto como um problema de atribuição ótima, onde o objetivo é atribuir da melhor maneira um conjunto de tarefas à um conjunto de robôs, de tal forma que otimize o desempenho geral do sistema sujeito a um conjunto de restrições. Até o momento, apesar do grande número de algoritmos de MRTA relatados na literatura, aspectos importantes têm recebido pouca atenção. Dentre esses aspectos incluem: alocação de tarefas complexas, alocação dinâmica de tarefas, alocação de tarefas com fortes restrições e alocação heterogênea.

Formalmente, considerando o objetivo de atribuir de forma ótima, um conjunto R de robôs para um conjunto T de tarefas, de maneira que otimize o sistema como um todo, sujeito a um conjunto de restrições. Nesse problemas tem-se:

1. R : conjunto de r_i robôs;
2. T : conjunto de t_{ij} tarefas;
3. C : conjunto de capacidades dos robôs, , onde c_{ij} é a capacidade do robô r_i de executar a tarefa t_j ;

Para um único tipo de tarefa, o problema é encontrar a alocação ótima dos robôs com as tarefas. Assim, formando um conjunto de pares (robô/tarefa):

$$(r_1, t_1), (r_2, t_2), \dots, (r_k, t_k) \quad \text{para} \quad 1 \leq k \leq m \quad (3.1)$$

Para o caso geral, o problema é encontrar a alocação ótima de conjunto de tarefas para um subconjunto de robôs, que serão responsáveis por completá-las:

$$A : T \rightarrow R \quad (3.2)$$

O problema de MRTA aborda a seguinte questão: “como encontrar a atribuição ótima das tarefas para os robôs, a fim de alcançar o objetivo global do sistema?” (LERMAN *et al.*, 2006; TANG; PARKER, 2007). Isso pode ser dividido em dois subproblemas: (1) “como um conjunto de tarefas são atribuídas a um conjunto de robôs?”; (2) “como o comportamento da equipe de robôs é coordenado, a fim de realizar as tarefas de forma eficiente e confiável?”. O problema de alocação das tarefas é um problema de decisão dinâmico, varia em função dos fenômenos como mudanças no ambiente. Para resolver esse problema dinâmico é necessário sua execução de forma iterativa ao longo do tempo (GERKEY; MATARIĆ, 2003). Dessa forma, o problema da alocação de tarefas torna-se mais complexo. O conjunto de restrições desse domínio em particular, afetam as características e a complexidade para resolver o problema de alocação das tarefas para múltiplos robôs (KORSAH; STENTZ; DIAS, 2013).

3.2.1 Classificação do Problema de MRTA

A taxonomia de Gerkey e Mataric (2004) é baseada em três características de robôs, tarefas e tempo. Considera-se os seguinte eixos:

- (*Single Task* (ST)) versus (*Multi-task* (MT)): Os robôs são classificados de acordo com a capacidade de execução de uma ou mais tarefas ao mesmo tempo. ST significa que cada robô está apto para executar apenas uma tarefa por vez, enquanto MT significa que alguns robôs podem executar mais de uma tarefa simultaneamente.
- (*Single Robot* (SR)) versus (*Multi-Robot* (MR)): Algumas tarefas são tratadas por apenas um robô e algumas tarefas exigem mais de um robô para que sejam concluídas. SR significa

que cada tarefa exige exatamente um robô para executá-la, enquanto MR significa que algumas tarefas necessitam de múltiplos robôs para executá-la.

- (*Instantaneous Assignment* (IA)) versus (*Time Extended Assignment* (TA)): Algumas tarefas são planejadas para serem executadas instantaneamente e outras necessitam de mais informações sobre os robôs e o ambiente. IA significa que as informações a respeito dos robôs, das tarefas e do ambiente naquele momento só permitam realizar a alocação instantânea, enquanto TA significa realizar a alocação continuamente de acordo com as dependências entre as tarefas (KHAMIS; ELMOGY; KARRAY, 2011).

Em Korsah, Stentz e Dias (2013) também discute-se a categorização dos problemas de MRTA com classificações de restrições e utilidades, como apresentado no Capítulo 2. Com base nessa nova classificação os autores fazem uma relação com modelos matemáticos de otimização combinatorial e pesquisa operacional. Korsah, Stentz e Dias (2013) estende a taxonomia proposta por Gerkey e Matarić (2004) e acrescenta o grau de interdependência que é classificada como abaixo:

- Sem Dependência **ND**: nenhuma dependência de quaisquer outras tarefas ou robôs no sistema.
- Dependência de Programação **ID**: dependência de outras tarefas ou robôs. Podem existir restrições entre tarefas na agenda de um único robô ou podem afetar a programação geral do robô.
- Dependência de Cronograma **XD**: dependência de cronograma próprio e de outros robôs. Podem existir restrições entre as programações de diferentes robôs.
- Dependências Complexas **CD**: similar ao XD, o robô também lida com subtarefas de outros robôs. Podem existir restrições entre as programações de diferentes robôs.

Assim, em um primeiro nível os problemas são categorizados de acordo com as características propostas por Korsah, Stentz e Dias (2013) e em um segundo nível de acordo com a classificação de Gerkey e Matarić (2004). Na Tabela 2 está um sumário de todas as possíveis classificações do MRTA de acordo com Korsah, Stentz e Dias (2013).

3.2.2 Formulação do Problema

Existem diversos métodos na literatura para modelar o problema de MRTA, o mais utilizado é uma generalização do problema do caixeiro viajante *Traveling Salesman Problem* (TSP).

No *Multiple Traveling Salesman Problem* (mTSP) é permitido mais de um caixeiro (SARIN; SHERALI; BHOOTRA, 2005; XU; WEN, 2010). Dado um conjunto de cidades e

Tabela 2 – Taxonomia para o problema de MRTA.

Grau de Inter-relação	Sem Dependência	Dependência de Programação	Dependência de Cronograma	Dependências Complexas
Configuração do Problema	ST-SR-IA		ST-SR-IA	ST-SR-IA
	ST-SR-TA	ST-SR-TA	ST-SR-TA	ST-SR-TA
		MT-SR-IA	MT-SR-IA	MT-SR-IA
		MT-SR-TA	MT-SR-TA	MT-SR-TA
			ST-MR-IA	ST-MR-IA
			ST-MR-TA	ST-MR-TA
			MT-MR-IA	MT-MR-IA
			MT-MR-TA	MT-MR-TA

Fonte: Adaptada de [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#).

de caixeiros, o objetivo é determinar um percurso para cada caixeiro de modo que, a partir da mesma cidade base, cada caixeiro visite pelo menos uma cidade e regresse à cidade base para minimizar o custo total. O custo pode ser a distância ou o tempo. As diversas formulações apresentadas em [Sarin, Sherali e Bhootra \(2005\)](#) diferem pela maneira como as restrições para a eliminação de sub-percursos são modeladas. Assim, os modelos podem ser assim classificados da seguinte forma: aqueles que se baseiam no ranking das cidades; aqueles que são baseados em variáveis explícitas indexadas no tempo para classificar as cidades e aqueles que são baseados na construção do fluxo de múltiplas mercadorias.

A principal diferença no mTSP é que ao invés de um único caixeiro, são considerados m caixeiros. Os caixeiros são obrigados a cobrir todos as cidades disponíveis e retornar à sua cidade de partida de tal forma que cada caixeiro faça uma viagem de ida e volta. O mTSP pode ser formalmente definido como um grafo $G = (V, A)$, onde V é um conjunto de n nós e A é um conjunto de arcos. Seja $C = (c_{ij})$ a matriz de distância associada à A . Assumindo no caso geral que é mTSP assimétrico, assim $c_{ij} \neq c_{ji} \forall (i, j) \in A$. Segue a formulação do mTSP ([BEKTAS, 2006](#)):

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se arc}(i, j) \text{ for utilizado no percurso} \\ 0 & \text{outros casos} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{1j} = m \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{j1} = m \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}, j = 2, \dots, n \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}, i = 2, \dots, n \quad (3.8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall (i, j) \in A \quad (3.9)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |subTour| - 1, \forall S \subseteq V \setminus \{1\}, subTour \neq \emptyset \quad (3.10)$$

onde (3.4) representa a função objetivo que é a soma da distância total percorrida, (3.5) e (3.6) garantem que exatamente m caixeiros partiram de seu nó inicial e retornaram para o mesmo. As equações (3.7)-(3.9) são as restrições de designação em que cada cidade é visitada por um único caixeiro viajante e cada caixeiro viajante não repete a mesma cidade no seu curso. Finalmente, (3.10) é a restrição de eliminação de sub-percursos.

Esse modelo pertence a classe *NP-hard* e encontrar uma solução ótima para o mesmo não é possível em tempo polinomial (RUBIN *et al.*, 2016).

3.2.3 Função Objetivo

Uma das etapas mais importantes ao projetar um algoritmo para resolver um problema de MRTA é caracterizar os custos das tarefas executadas no domínio da aplicação.

Embora o problema de MRTA seja formulado como uma instância do mTSP, no entanto a mesma função objetivo do mTSP explicado anteriormente em (3.4) não pode ser diretamente utilizada como a função objetivo para o problema de MRTA. Portanto, algumas variações tiveram de ser introduzidas na função objetivo do mTSP para serem efetivamente utilizadas para o problema MRTA. A seguir são apresentadas três objetivos intuitivos descritos em (LAGOUDAKIS *et al.*, 2005).

- MINISUM: Minimizar a soma dos custos dos percursos de todos.
- MINIMAX: Minimizar o custo máximo dos percursos de todos robôs.
- MINIAVE: Minimizar o custo médio do percurso até todos destinos.

O MINISUM é o modelo mais comum, pois minimiza os custos individuais e em muitos casos a solução é melhor em comparação com MINIMAX e MINIAVE. O MINISUM é muito utilizado quando existe como restrição no sistema a eficiência, como exemplo, otimizar o consumo de combustível utilizado em uma situação de transporte ou entrega. Algoritmos que utilizam esse tipo de função, podem ser consultados em (CHOI; BRUNET; HOW, 2009; LUO; CHAKRABORTY; SYCARA, 2013; DAHL; MATARIĆ; SUKHATME, 2009; VIGURIA; MAZA; OLLERO, 2007; LOPE; MARAVALL; QUIÑONEZ, 2013; VIGURIA; MAZA; OLLERO, 2008). O critério MINIMAX, é conhecido por minimizar os custos do robô com pior desempenho. Este critério pode ser utilizado quando em missões com restrições de tempo, pois atribui a missão mais curto para o pior robô executar. Além disso, embora o modelo MINISUM possa sempre minimizar os custos globais, ele pode atribuir todas as tarefas para um único robô. Para evitar essa situação, o MINIMAX é utilizado como critério de otimização que encontra partições minimizando o máximo custo entre os robôs. Algoritmos que utilizam esse tipo de solução podem ser encontrados em (CHOI; BRUNET; HOW, 2009; HIGUERA; DUDEK, 2013; LAGOUDAKIS *et al.*, 2005; LEMAIRE; ALAMI; LACROIX, 2004). O MINIAVE é utilizado com objetivo de medir o tempo médio desde que uma tarefa aparece no sistema até que esteja concluída. Ele tem relevância em domínios onde a conclusão da tarefa é mais importante do que os custos globais agregados, por exemplo, em situações de resgate onde o tempo até a localização da vítima pode ser crítico.

3.2.4 Paradigmas da Arquitetura de MRTA

As abordagens de MRTA podem ser classificadas de acordo com o paradigma organizacional da equipe. Este paradigma mostra como os múltiplos robôs são organizados, especificando as relações e interações entre os robôs e os papéis específicos de cada robô dentro do sistema. A seguir são apresentados os paradigmas organizacionais centralizados, descentralizados e a diferença da utilização de robôs homogêneos e heterogêneos.

Abordagem Centralizada Neste tipo de sistemas, cada robô mantém uma conexão com uma unidade central que aloca as tarefas para os outros robôs. Assim, os robôs separados enviam todas as informações que têm para esse robô central, que por sua vez processa essas informações e envia os comandos apropriados a esses robôs para executar as tarefas atribuídas. As vantagens deste tipo incluem a redução da duplicação de esforços, recursos e minimização de custos e tempo (HORLING; LESSER, 2004). Embora os sistemas centralizados sejam amplamente implementados na literatura (BRUMITT; STENTZ, 1998), existem muitas desvantagens que restringem o uso desse paradigma na alocação de tarefas multi-robô. A falta de robustez é uma das desvantagens mais importantes do sistema centralizado. Em outras palavras, se o agente central falhar, todo o sistema falhará. Além disso, a escalabilidade do sistema é restrita porque todos os agentes estão conectados ao agente central que é considerado como um gargalo. Praticamente, abordagens totalmente centralizadas podem ser computacionalmente intratáveis, frágeis e não

respondem às mudanças (KHAMIS; HUSSEIN; ELMOGY, 2015). Assim, para problemas de alocação de tarefas multi-robô, onde o número de robôs e tarefas é pequeno e o ambiente é estático ou a informação de estado global é facilmente disponível, as abordagens centralizadas são a solução mais adequada. A abordagem centralizada é uma das abordagens mais divulgadas na literatura para resolver os problemas de alocação de tarefas (AL-YAFI; LEE; MANSOURI, 2009). Em (COLTIN; VELOSO, 2010), um algoritmo centralizado é proposto para resolver o problema MRTA, a fim de atribuir tarefas a robôs móveis para prolongar o tempo de vida da rede de sensores. Também em (LIU; KROLL, 2012), uma abordagem centralizada é introduzida para resolver o MRTA para o problema de inspeção em uma fábrica industrial. A abordagem de MRTA baseada em divisão justa descrita em (HIGUERA; DUDEK, 2013) é outro algoritmo centralizado que aloca uma única tarefa global entre um grupo de robôs heterogêneos.

Abordagem Descentralizada A descentralização é o processo de dispersão das tarefas e autoridades administrativas entre os agentes do sistema multi-agente (HORLING; LESSER, 2004). Neste tipo de configuração, não existe um agente centralizado que aloca as tarefas para os outros agentes. Cada agente está comunicando suas informações com os outros agentes. Cada agente pode trabalhar por conta própria sem a consideração principal dos outros agentes. Além disso, às vezes um agente do sistema descentralizado precisa trocar informações com outros agentes, a fim de cumprir sua missão de forma eficiente em harmonia com outros agentes.

Muitas abordagens descentralizadas são propostas para resolver o problema MRTA. Em (SEGUI-GASCO *et al.*, 2015), os autores propuseram uma implementação descentralizada do método húngaro proposto para resolver o problema MRTA. Em (CHOI; BRUNET; HOW, 2009), duas abordagens descentralizadas baseadas em leilões, a saber, o algoritmo de leilões baseado em consenso e o algoritmo baseado em consenso são propostas para resolver o problema MRTA de uma frota de robôs móveis autônomos. Também uma abordagem descentralizada computação evolutiva é proposta para resolver o problema de MRTA usando algoritmo genético em (GAO; CAI; YU, 2009). A abordagem hierárquica baseada no mercado foi proposta em (KHAMIS; ELMOGY; KARRAY, 2011) como uma abordagem descentralizada para o problema MRTA.

A principal vantagem do sistema descentralizado é a sua robustez. Por exemplo, em sistemas distribuídos, se um dos agentes falhar, os outros agentes ainda estão trabalhando sozinhos e/ou em cooperação com outros (ELMOGY; KHAMIS; KARRAY, 2012). Como não há agente centralizado como um gargalo, novos agentes podem ser adicionados em caso de falha, por exemplo. Isso significa que a escalabilidade não é mais um problema nos sistemas descentralizados. Em geral, as abordagens descentralizadas têm muitas vantagens sobre abordagens centralizadas tais como flexibilidade, robustez e baixas exigências de comunicação. No entanto, como uma boa solução local pode não somar a uma boa solução global, abordagens descentralizadas podem produzir soluções altamente sub-ótimas.

Homogêneos versus Heterogêneos Ao trabalhar com grupos de robôs, é necessário determinar quais as características que cada grupo possui para realizar uma tarefa de forma

mais eficiente, isto é, no menor tempo. Os pesquisadores costumavam empregar grupos comportamentalmente homogêneos, enquanto recentemente grupos de robôs comportamentalmente diferenciados (onde os robôs não executam as mesmas capacidades) foram desenvolvidos.

Os algoritmos projetados para grupos homogêneos podem ser muito mais fáceis, pois todos os robôs compartilham as mesmas capacidades. No entanto, a força de algoritmos homogêneos é, em troca, sobrecarregada pelo desperdício de recursos e a falta de aplicabilidade prática (DAHL; MATARIĆ; SUKHATME, 2009).

A heterogeneidade da equipe robótica decorre da dependência do desempenho sensorial e da locomoção sobre as características do ambiente. Em sistemas robóticos heterogêneos, diferentes robôs podem ter capacidades heterogêneas, que possuem aptidão diferente para tarefas diferentes. Portanto, um dos objetivos nestes problemas de MRTA é maximizar a aptidão quantitativa do robô através da atribuição de tarefas. Em (HIGUERA; DUDEK, 2013), por exemplo, os autores descreveram um exemplo de cenário de divisão justa em relação a uma tarefa de cobertura com robôs heterogêneos: um robô subaquático e um veículo de superfície são implantados em um ambiente não estruturado para realizar uma tarefa de busca. Com esse contexto, as melhorias de desempenho são obtidas através da atribuição do robô mais apropriado para cada região do ambiente. Portanto, os algoritmos heterogêneos podem aproveitar ao máximo as possibilidades que uma equipe de robôs pode oferecer (é até possível executar missões com uma tarefa envolvendo toda a equipe).

3.3 MRTA Baseada no Mecanismo de Mercado

A coordenação baseada no mecanismo de mercado tem sido amplamente utilizada nos últimos anos. É uma cooperação intencional que significa que ele usa a comunicação explícita dentro dos agentes do grupo (GERKEY; MATARIĆ, 2002). Os modelos de economia de mercado definidos pelos seres humanos são introduzidos no algoritmo baseado no mercado, onde indivíduos interessados tentam maximizar seus próprios lucros ao negociar bens e serviços. Eles são considerados uma opção eficiente para a coordenação em sistemas multi-robô devido ao seu bom compromisso entre os requisitos de comunicação e a qualidade das soluções obtidas (DIAS; STENTZ, 2003). Em termos de atribuição de tarefas, o algoritmo baseado no mercado assume que cada tarefa é uma mercadoria a ser negociada, e cada robô tenta maximizar seu próprio lucro para o grande benefício. Em sistemas multi-robô bem projetados, este modelo de leilão simultâneo melhora a eficiência do grupo.

Em termos de abordagem baseada no mercado aplicada à alocação de tarefas, existem dois tipos de robôs. Um é o robô leiloeiro, o outro é o robô que envia o lance. De acordo com essa abordagem, ambos os robôs desempenham papéis importantes no algoritmo de leilões baseado no mercado.

Robô leiloeiro No processo de atribuição de tarefas, o robô leiloeiro desempenha um

papel como leiloeiro. Inicialmente, não há leiloeiro em sistemas multi-robô. Todos os robôs desempenham o mesmo papel que o robô de busca. Quando um robô encontra uma tarefa, ele se tornará um robô de leilão. Neste momento, este robô de leilão avalia a tarefa e publica esta tarefa para outros robôs. O robô do leilão aguarda os lances computados pelos robôs de lance e decide o vencedor de acordo com o valor dos lances. O vencedor completará esta tarefa leiloada com o robô de leilão. O leiloeiro pode ser qualquer agente (um licitante honesto ou um agente excluído do lance atual).

Robô que envia o lance Quando um robô recebe informações de concurso publicadas pelo robô de leilão, este robô torna-se um robô de lance. Este robô avalia esta tarefa de leilão e calcula o lance para participar do lance. O lance é transferido para o robô de leilão de acordo com a rede de área local. Esse robô de lance espera pelo resultado do leilão. Este robô de lance irá para completar a tarefa leiloada com o robô de leilão quando ele ganhar o leilão.

O robô do leilão decide o vencedor de acordo com o valor do lance. O vencedor é muitas vezes o robô que tem um maior valor de lance. O número do vencedores é decidido pela tarefa. O número será grande se essa tarefa encontrada for complexa e difícil, caso contrário, o número será pequeno.

Formalmente essa abordagem pode ser formulada, considerando que cada robô $r \in R$ pode expressar sua capacidade de executar uma tarefa $t \in T$, ou um conjunto de tarefas $G \subseteq T$, por meio de lances $l_r(t)$ ou $l_r(G)$. O custo de um conjunto de tarefas pode ser calculado como a soma dos custos individuais de cada tarefa:

$$l_r(G) = \sum_{n=1}^n l_r(t_k) \{t_k \in G\}$$

O papel do robô não é fixo. Quando um robô de leilão recebe informações de oferta, o que significa que será um potencial robô de lance. Enquanto isso, se uma tarefa for encontrada pelo robô de lance, este robô de lance será um robô de leilão.

A cooperação entre robô de leilão e robô de lance em sistemas multi-robôs completa a alocação de tarefas. Pelo leilão continua, todas as tarefas serão leiloadas e concluídas de forma eficiente. O algoritmo de alocação de tarefas baseado no mecanismo de mercado é uma maneira eficiente de resolver os problemas relacionados de atribuição de tarefas. Na Tabela 3 estão sumarizadas as características das abordagens baseadas no mecanismo de mercado.

A característica comum nos mecanismos de alocação baseados no mercado é um protocolo de leilão para coordenar as tarefas entre diferentes robôs, como investigado por vários trabalhos (SMITH, 1981; BOTELHO; ALAMI, 1999; GERKEY; MATARIĆ, 2002; DIAS, 2004). Quando uma tarefa a ser executada é anunciada, cada robô capaz calcula lances, com base no seu lucro esperado para as tarefas e os robôs com o menor custo são recompensados com essa tarefa anunciada. Dias e Stentz (2000) utilizaram um esquema baseado no mercado para coordenar

Tabela 3 – Características da Abordagem Baseada no Mecanismo de Mercado.

	Abordagem Baseada no Mercado
Modelo de Comunicação	pública/assina
Algoritmo de Alocação das Tarefas	algoritmo guloso (leilão do primeiro valor)
Capacidade de Alocação das Tarefas (Etapa de Negociação)	única tarefa
Determinação do Papel dos Robôs	voluntária
Função de Utilidade	custo e ganho
Realocação da Tarefa	permitido
Complexidade da Comunicação	$O(1)$ - concorrente, $O(n)$ - leiloeiro
Complexidade Computacional	$O(n)$

Fonte: Adaptada de [Yan, Jouandeau e Cherif \(2013\)](#).

múltiplos robôs para a conclusão da tarefa cooperativa ST-MR que introduziu a aplicação de mecanismos de mercado para a coordenação de robôs intra-equipe. [Dias et al. \(2006\)](#) propôs uma estrutura para o controle distribuído em sistemas multi-robô. Um método dinâmico de alocação de tarefas foi proposto por [Zu, Tian e Mei \(2006\)](#), o que reduziu o tráfego de comunicação ao encurtar o tempo de conclusão da tarefa. [Guerrero e Oliver \(2012\)](#) apresentou o método MRTA parcialmente inspirado em leilões e métodos baseados em limiares, para alocar tarefas com prioridades em uma equipe de robôs heterogêneos. [Lee, Han e Kim \(2011\)](#) também apresentou uma estrutura baseada no mercado para atribuição de tarefas com base nas preferências de tarefas. A utilidade de um robô é calculada usando os elementos de lance e suas preferências ponderadas. Muitas das obras mencionadas acima lidam com tarefas que requerem apenas um único robô com capacidade de executar uma única tarefa. Isso também é chamado de ST-SR-IA categoria de MRTA, de acordo com taxonomia apresentada por [Gerkey e Matarić \(2004\)](#).

3.3.1 Prós e Contra das Abordagens Baseadas em Mercado

As abordagens baseadas no mercado têm várias vantagens ([DIAS, 2004](#); [ZLOT, 2006](#)), tais como:

- **Eficiência:** Uma das maiores forças das abordagens baseadas no mercado é a sua capacidade de utilizar as informações locais e as preferências dos seus participantes para chegar a uma solução eficiente, dado os recursos limitados ([COLTIN; VELOSO, 2010](#)). Abordagens baseadas no mercado têm elementos que são centralizados e outros elementos que são distribuídos ([COLTIN; VELOSO, 2010](#)). Assim, eles podem produzir soluções eficientes, capturando os respectivos pontos fortes das abordagens distribuídas e centralizadas. Foi demonstrado em ([KHAMIS; ELMOGY; KARRAY, 2011](#); [COLTIN; VELOSO, 2010](#); [DIAS; STENTZ, 2002](#); [BADRELDIN; HUSSEIN; KHAMIS, 2013](#)) que soluções eficientes podem ser produzidas por abordagens de mercado em relação a uma variedade de funções objetivos da equipe.

- **Robustez:** Como mencionado anteriormente, abordagens totalmente centralizadas empregam um único agente para coordenar toda a equipe em um sistema multi-agente. Eles podem sofrer de um único ponto de falha, e têm altas demandas de comunicação. As abordagens baseadas no mercado implementadas com base no paradigma descentralizado não requerem um agente coordenador central permanente e, portanto, não há ponto de falha em modo comum ou vulnerabilidade no sistema. Estas abordagens podem ser feitas robustas a vários tipos de avarias, incluindo falhas completas ou parciais de agentes (COLTIN; VELOSO, 2010; ZLOT, 2006; DIAS; STENTZ, 2000).
- **Escalabilidade:** Como mencionado anteriormente, os requisitos computacionais e de comunicação das abordagens baseadas no mercado são geralmente gerenciáveis e não proíbem que esses sistemas forneçam soluções eficientes porque não são sistemas totalmente centralizados. Assim, à medida que o tamanho das entradas no sistema aumenta, essas abordagens ainda podem fornecer uma solução eficiente (COLTIN; VELOSO, 2010). As abordagens baseadas no mercado podem escalar bem em aplicações onde a missão da equipe pode ser decomposta em tarefas que podem ser realizadas independentemente por pequenas sub-equipes (ZLOT, 2006). Contudo e como concluído em Badreldin, Hussein e Khamis (2013), a abordagem baseada em otimização supera a abordagem baseada no mercado no gerenciamento do cenário MRTA em larga escala (cinquenta tarefas e quinze robôs).
- **Decisão em tempo real:** As abordagens baseadas no mercado são capazes de incorporar de forma transparente a introdução de novas tarefas (DIAS; STENTZ, 2002). As abordagens baseadas no mercado podem muitas vezes incorporar tarefas em tempo real, leiloando novas tarefas à medida que são introduzidas no sistema ou geradas pelos próprios agentes (ZLOT, 2006).
- **Incertezas:** Os sistemas baseados no mercado são capazes de operar em ambientes desconhecidos e dinâmicos ao permitir que os membros da equipe se adaptem as estimativas de custo ao longo do tempo e realocar as tarefas quando apropriado (ZLOT *et al.*, 2002).

Embora as abordagens baseadas no mercado tenham muitas vantagens, elas não são desprovidas de suas desvantagens. Talvez o maior inconveniente das abordagens baseadas no mercado seja a falta de formalização na concepção de funções apropriadas de custos e receitas para captar os requisitos de projeto (DIAS *et al.*, 2006). Além disso, os protocolos de negociação, o desenvolvimento de funções de custos adequadas e a introdução de sistemas de sanções relevantes podem complicar a concepção da abordagem de mercado (DIAS, 2004). Em domínios onde abordagens totalmente centralizadas são viáveis, as abordagens baseadas no mercado podem ser mais complexas de implementar e podem produzir soluções mais pobres (DIAS *et al.*, 2006). Além disso, quando as abordagens totalmente distribuídas são suficientes, as abordagens

de mercado podem ser desnecessariamente complexas no projeto e podem requerer comunicação e computação excessivas (DIAS *et al.*, 2006).

3.4 Ambiente de Simulação

A utilização de um ambiente de simulação se faz necessário, quando por diversos motivos (segurança, custo, clima, etc) se torna proibitivo o teste com robôs em ambientes reais. Com isso faremos uso de um simulador de robôs móveis chamado *Robot Operating System* (ROS). O ROS, consiste em uma plataforma de *software* concebida para operar como um meta-sistema operacional para o desenvolvimento de aplicações em robótica, isto é, tem por objetivo oferecer funcionalidades e serviços em abstração de *hardware*, controle de dispositivos, gerenciamento de pacotes, integração com outros *frameworks* de robótica, recursos e ferramentas para a visualização e depuração das informações, além dos principais componentes de sistemas distribuídos, como infraestrutura de comunicação, troca de mensagens entre processos, chamadas remotas de procedimentos, elementos de sincronismo e recursos para a definição e interpretação de estruturas customizadas para a troca de dados através de uma linguagem independente. Esta plataforma comum permite que as pessoas compartilhem código e ideias mais facilmente e, talvez mais importante, significa que você não precisa passar anos escrevendo a infra-estrutura de *software* antes que seus robôs comecem a se mover. Existem onze distribuições do ROS desde a criação em 2010, mas as únicas que ainda recebem suporte e atualizações são: *Indigo*, *Igloo*, *Jade Turtle* e *Kinetic Kame*. No momento da redação deste trabalho, na distribuição atual do ROS (Kinetic Kame), existem mais de 1.200 pacotes de *software*, escritos e mantidos por quase 800 pessoas no mundo todo. Aproximadamente 160 robôs comercialmente disponíveis são suportados, e pelo menos 2.000 artigos acadêmicos mencionam o ROS.

O *framework* do ROS divide-se em diversas camadas de abstração, cada qual com suas respectivas funções. Cada camada fornece um ambiente transparente ao desenvolvedor para a utilização de um conjunto de ferramentas, como:

- Um conjunto de *drivers* que permitem ler dados de sensores e enviar comandos para motores e outros atuadores. Uma grande variedade de *hardware* é suportada, incluindo um número crescente de plataformas robóticas comercialmente disponíveis;
- Uma grande e crescente coleção de algoritmos robóticos que permitem construir mapas do mundo, navegar em torno dele, representar e interpretar dados de sensores, planejar movimentos, manipular objetos, dentre outros. O ROS tornou-se muito popular na comunidade de pesquisa em robótica, e diversos algoritmos estão agora disponíveis no ROS;
- Toda a infraestrutura computacional que permite mover dados, conectar os diversos componentes de um complexo sistema robótico e incorporar seus próprios algoritmos.

O ROS é inerentemente distribuído e permite a divisão da carga de trabalho em outros computadores;

- Um conjunto de ferramentas que facilitam a visualização do estado do robô e dos algoritmos, depuração de comportamentos anômalos e registro de dados de sensores.

Finalmente, o *framework* ROS inclui um conjunto extenso de recursos, como um *wiki* ([WIKIROS, 2016](#)) que documenta muitos dos aspectos do *framework*, um site de perguntas e respostas onde é possível pedir ajuda e compartilhar com a comunidade de usuários e desenvolvedores lições aprendidas. Ele permite abstrair o *hardware* e a complexidade da integração com os sensores e foca nas partes do sistema a serem desenvolvidas.

3.4.1 Robôs suportados pelo ROS

As plataformas robóticas são estruturadas de acordo com as seguintes categorias ([QUIGLEY et al., 2009](#)).

- Manipuladores Móveis;
- Manipuladores Móveis Customizados;
- Robôs Móveis;
- Robôs Móveis Customizados;
- Manipuladores;
- Carros Autônomos;
- Robôs Sociais;
- Humanoides;
- *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV);
- *Unmanned Underwater Vehicle* (UUV);
- *Unmanned Surface Vehicle* (USV);
- Outros.

A lista completa das plataformas robóticas disponíveis no ROS, podem ser acessada em [WikiROS \(2016\)](#).

3.4.2 Simulador 3D Gazebo

O Gazebo é parte do projeto [Player/Stage \(2016\)](#) e disponibiliza uma ferramenta de simulação robótica que tem a capacidade de simulação dinâmica precisa e eficiente de robôs, sensores e objetos em um mundo 3D. Ele gera uma resposta realista dos sensores e possui um robusto motor de física para gerar interações entre objetos, robôs e o meio ambiente ([KOENIG; HOWARD, 2004](#)). O Gazebo é um ambiente que permite o teste de sistemas complexos, robóticos ou não. Ele pode ser utilizado em diversas aplicações, incluindo o teste da dinâmica de um sistema de controle. Também pode ser utilizados para testar novos algoritmos, sistemas e robôs que possam ser muito perigosos ou com alto custo para serem testados no mundo real. Ele possui uma arquitetura cliente/servidor e tem um modelo baseado em tópicos *publish/subscribe* de comunicação entre processos. Os clientes Gazebo podem acessar seus dados através de uma memória compartilhada. Cada objeto de simulação no Gazebo pode ser associado a um ou mais controladores que processam comandos para controlar o objeto e gerar o estado desse objeto. Os dados gerados pelos controladores são publicados na memória compartilhada usando interfaces Gazebo (*Ifaces*). Os *Ifaces* de outros processos podem ler os dados da memória compartilhada, permitindo assim a comunicação entre os processos, o *software* de controle do robô e o Gazebo, independentemente da linguagem de programação ou da plataforma de *hardware*.

No processo de simulação dinâmica o Gazebo pode utilizar um motor de física de alto desempenho como: *Open Dynamics Engine* (ODE) ([SMITH, 2016](#)), *Bullet* ([BULLET, 2016](#)), *Simbody* ([SIMBODY, 2016](#)) e *Dynamic Animation and Robotics Toolkit* (DART) ([DART, 2016](#)) que são usados para a simulação física do corpo rígido. O *Object-Oriented Graphics Rendering Engine* (OGRE) ([OGRE3D, 2016](#)) fornece a renderização de gráficos 3D de ambientes do Gazebo.

O cliente envia dados de controle, coordenadas de objetos simulados para o servidor que executa o controle em tempo real do robô simulado. É possível realizar uma simulação distribuída colocando o cliente e o servidor em diferentes computadores. A implantação do *plugin* ROS para o Gazebo ajuda a implementar uma interface de comunicação direta com o ROS, controlando assim os robôs simulados e os reais usando o mesmo *software*. Isso fornece uma ferramenta de simulação eficaz para testar e desenvolver sistemas robóticos reais ([TAKAYA et al., 2016](#)). O ROS integra-se de com Gazebo por meio do pacote *gazebo_ros* pacote. Este pacote fornece um *plugin* para acoplar o Gazebo, permitindo a comunicação bidirecional entre o Gazebo e o ROS. Os sensores simulados e os dados físicos podem ser enviados do Gazebo para o ROS e os comandos do atuador podem ser enviados do ROS para o Gazebo. Na verdade, ao escolher nomes consistentes e tipos de dados desses fluxos de dados, é possível que o Gazebo corresponda exatamente à um *plugin* do ROS de um robô. Quando isso ocorre o *software* do robô acima do nível do *driver* do dispositivo pode ser executado de forma idêntica tanto no robô real como (após a configuração dos parâmetros) no simulador.

3.5 Robôs utilizados

Uma plantação de citros possui um formato estruturado (isto é, consistem numa série de linhas e corredores), mas também possuem elementos irregulares (por exemplo, as árvores podem ser plantadas em relevos irregulares). Esse é um dos fatores que devem ser considerados na seleção dos robôs, mas também para definir as estratégias para o planejamento do caminho e localização.

Algumas possíveis contribuições de usar uma equipe de robôs em vez de um único robô são as seguintes:

- **Eficácia:** Uma equipe de robôs é obviamente mais eficaz do que um único robô, porque tem mais recursos para executar as mesmas tarefas. Por exemplo, se um robô cobre uma área em um determinado período de tempo, vários robôs irão necessariamente cobrir múltiplas subáreas, gastando menos tempo;
- **Eficiência:** A frota de robôs também é mais eficiente do que os robôs individuais, uma vez que a alocação das tarefas aos robôs pode ser otimizada. Por exemplo, uma unidade aérea irá cobrir mais superfície do que uma unidade terrestre em algumas tarefas, como vigilância, monitoramento ou coleta de dados;
- **Flexibilidade:** Uma frota de robôs é mais flexível do que um único robô, pois é capaz de se adaptar a diferentes cenários apenas alterando a atribuição de tarefas;
- **Tolerância a falhas:** Usar uma equipe de robôs em vez de um único robô reduz o impacto de falhas e contingências; Se um dos robôs falhar, o resto pode assumir suas tarefas.

Nesse trabalho são utilizados dois tipos de robôs com características complementares. Os robôs terrestres (UGVs) possuem maior autonomia de funcionamento em relação aos robôs aéreos (UAVs), mas apresentam certas limitações, como: capacidade reduzida de cobertura de uma área e na existência de um obstáculo intransportável ele terá que voltar e utilizar outra rota. Já os UAVs não possuem limitações de locomoção, pois podem se deslocar em qualquer direção.

3.5.1 Robô Aéreo Simulado

Toda aeronave que não precisa de piloto embarcado para ser guiada é chamada de UAV. Esse tipo de aeronave é controlada remotamente através de recursos eletrônicos e computacionais, podendo-se utilizar a supervisão humana ou controladores programáveis. Os UAVs foram idealizados para uso militar, com o intuito de serem usados em missões de alto risco para um ser humano realizar. Como por exemplo no controle de mísseis de cruzeiro, em diversas áreas da inteligência militar, para controle e apoio de tiro de artilharia, para apoio aéreo às tropas de cavalaria e infantaria, em atividades de patrulhamento costeiro, urbano, de fronteira, ambiental, em atividades de busca e resgate, entre outros.

Optou-se pela utilização de um UAV simulado, dentre eles: baixo custo, ambiente de teste controlado e segurança. O robô aéreo escolhido foi o Erle-Copter (2). Esse robô aéreo possui autonomia de voo em torno de 20 minutos e pode levantar voo com até 2kg de carga. O quadrirotor ErleCopter possibilita a utilização de uma ampla gama de sensores. Ele pode ser equipado com uma *Inertial Measurement Unit* (IMU) que mede as velocidades angulares e acelerações do corpo do veículo. Ele utiliza um sensor ultra-sônico para medir a distância do solo em uma faixa específica. Além disso, possui um sensor de campo magnético que serve de orientação (bússola), para saber para onde o UAV está apontado. Um receptor de *Global Positioning System* (GPS) também é instalado para fornecer informações de posicionamento. Além dos dispositivos padrões, é possível acoplar outros sensores, como: o *Hokuyo UTM-30LX*, uma câmera de profundidade como *Kinect* e uma câmera comum *RGB*. Além disso, como todos os outros simuladores, é possível manipulá-lo usando um controle USB, bem como teclado.

O robô ErleCopter simulado está disponível para as versões do ROS (Indigo, Jade e Kinetic).

Figura 2 – Modelo do quadrirotor simulado.

(a) Robô ErleCopter real.

(b) Robô ErleCopter simulado no gazebo.

Fonte: [Robotics \(2017\)](#).

Para iniciar o quadrirotor ErleCopter no ambiente 3D do Gazebo é necessário o seguinte comando:

```
roslaunch ardupilot_sitl_gazebo_plugin erlecopter_spawn.launch
```

Existe a possibilidade de adquirir um kit para montagem desse robô (Figura 3), ele é comercializado pela empresa *Acutronic Robotics*. Qualquer sistema desenvolvido no ambiente simulado é portátil para o robô real, facilitando assim a validação do sistema em um ambiente real.

Figura 3 – Kit para montagem do robô aéreo ErleCopter.

Fonte: [Robotics \(2017\)](#).

3.5.2 Robô Terrestre Simulado

Um UGV é um veículo terrestre que opera em contato com o solo e sem a presença de um operador humano. O UGV pode ser utilizado em diversas aplicações onde pode ser inconveniente, perigoso, ou impossível a presença de um operador humano. Geralmente, o veículo terrestre possui um conjunto de sensores para se orientar no ambiente, e irá tomar decisões sobre seu comportamento de maneira autônoma, ou passar informações para um operador humano utilizando uma estação de controle para operações remotas. A capacidade de exploração do ambiente neste tipo de veículo depende dos diversos tipos de terrenos encontrados, o que está diretamente associado ao mecanismo utilizado para locomoção.

O UGV utilizado como plataforma de transporte e sensoriamento em terra é o *Husky*, modelo A200 (Figura 4). Ele foi desenvolvido e é comercializado pela empresa *Clearpath Robotics*.

Figura 4 – Plataforma robótica HUSKY.

(a) Robô real.

(b) Robô simulado.

(c) Vista lateral do robô.

(d) Vista frontal do robô.

Fonte: [WikiROS \(2016\)](#).

Suas dimensões podem ser encontradas na Figura 4. Ele pesa 50 kg e tem capacidade máxima de carga de 75 kg, podendo ser utilizado em terrenos irregulares. Com seu comprimento de quase 1 metro, o robô é capaz de superar grandes obstáculos com facilidade, devido ao seus pneus de 330mm de diâmetro com torque nas quatro rodas. A base do robô não possui conexão entre os eixos das rodas (esquerda/direita). Em vez disso, as duas rodas de um lado são conectadas e giram independentemente ao outro lado. Seu modelo simulado no ambiente 3D Gazebo, está disponível para as versões do ROS (Fuerte, Groovy, Hydro e Indigo) ([WIKIROS, 2016](#)).

Para iniciar o robô terrestre HUSKY no ambiente 3D do Gazebo é necessário o seguinte comando:

roslaunch husky_gazebo husky_empty_world.launch

Este robô utiliza para navegar, os *encoders*, a IMU e o GNSS. Ele também pode utilizar *scanners* a laser lineares (270°) para detectar e evitar possíveis obstáculos nos corredores (por

exemplo, ferramentas agrícolas e ramos das plantas). Além disso, ele pode equipado com uma câmera de profundidade como *Kinect*, que pode ser útil em determinadas tarefas de inspeção. Finalmente, este UGV pode atingir uma velocidade máxima de $1m/s$ e tem uma autonomia entre 3 horas (movimento contínuo) e 8 horas (uso padrão em laboratório).

3.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os diferentes aspectos desafiadores do problema de alocação de tarefas multi-robô, as abordagens recentes para abordar este problema e as orientações futuras. O capítulo também discutiu a abordagem baseada em mercado abordagens que é utilizada extensivamente para resolver o problema MRTA. Muitas das abordagens analisadas são capazes de lidar com a alocação de tarefas complexas com diferentes formas de restrições, tais como restrições de tempo e capacidades de robôs - requisitos de tarefas que correspondem às restrições. A alocação de tarefas de multi-robô com capacidade de lidar com restrições mais complexas ainda está aberta e precisa ser abordada por pesquisadores.

Descreveu-se também um panorama geral do ambiente de simulação utilizado e modelagem de sistemas robóticos, apresentando suas características, categorias e aplicações. Além disso, foram descritos aspectos relacionados ao ambiente 3D que simula a física do corpo do robô. Por fim, foram descritos os dois tipos de plataformas robóticas (Subseção 3.5.1 e 3.5.2) utilizadas para simular um ambiente do cultivo de citros.

SISTEMA PROPOSTO

Neste capítulo é apresentado a abordagem proposta distribuída baseada em mecanismo de mercado, para resolver o problema de MD-MTSP, baseado na melhoria incremental da qualidade da solução por meio da coordenação entre os robôs. Atrelado a esse problema, resolve-se inicialmente um problema de cobertura de conjuntos para definir inicialmente as melhores posições dos depósitos que serão utilizados no MD-MTSP. A descrição do problema em detalhes é feita na Seção 4.1 e a solução proposta é descrita na Seção 4.2.

Ainda neste capítulo apresenta-se o projeto e modelagem do quadricóptero desenvolvido na Seção 4.3. Nesta seção apresenta-se o modelo matemático utilizado para controle do quadricóptero e a obtenção dos parâmetros dinâmicos do mesmo.

4.1 Descrição e Modelagem do Problema

Como mencionado no Capítulo 2 o planejamento do caminho dos robôs é uma tarefa de apoio importante para uma tarefa principal de um robô agrícola, como por exemplo, na tarefa principal de coleta de dados e monitoramento.

Formalmente para resolver o MD-MTSP aplicado na agricultura de precisão, são considerados um conjunto de n localização das tarefas $\{T_1, \dots, T_n\}$, que podem ser consideradas como as localizações das plantas a serem escaneadas ou monitoradas. Essas n tarefas devem ser visitadas por m robôs $\{R_1, \dots, R_m\}$ ($m < n$), que estão inicialmente localizados em k depósitos $\{D_1, \dots, D_k\}$ ($k \geq m$). Cada robô R_i , $i = 1, \dots, m$ é considerado como um robô aéreo. Os depósitos são considerados como robôs terrestres, de onde partem os robôs aéreos. Cada robô R_i inicia do seu depósito D_k e então visita uma lista de tarefas $\{T_{i_1}, \dots, T_{i_r}\}$ nessa ordem, e finalmente retorna para seu depósito (robô terrestre). O mesmo robô pode sair e voltar do depósito diversas vezes e vários robôs aéreos podem partir de um único robô terrestre.

O objetivo dessa abordagem é identificar uma atribuição eficiente da localização das

tarefas, para o conjunto de robôs, tal que todas as tarefas sejam realizadas por um robô e no menor custo. O custo de viajar da tarefa T_i para a tarefa T_j é denotado como $C(T_i, T_j)$. O custo para o robô R_i realizar todo o percurso é denotado por $C(T_{perR_i})$, expressado em (4.1).

$$C(T_{perR_i}) = C(D_i, T_{i_1}) + \sum_{k=1}^{r-1} C(T_{i_k}, T_{i_{k+1}}) + C(T_{i_1}, D_i) \quad (4.1)$$

A motivação desse método consiste em projetar uma abordagem distribuída para resolver o problema de MD-MTSP, buscando atingir três objetivos: realizar a cobertura otimizada dos robôs; realizar a convergência da solução ótima de alocação e possuir um comportamento adaptativo a mudanças e falhas do sistema.

Para a simulação considera-se o custo como a distância Euclidiana entre o robô e a localização da tarefa, mas o custo pode ser relacionado com outras métricas, como consumo de energia e tempo total para completude da missão. A função objetivo é definida pela minimização da distância total viajada por todos robôs:

$$\underset{T_{perR_i} \in PERC}{\text{minimizar}} \left(\sum_{i=1}^m C(T_{perR_i}) \right). \quad (4.2)$$

Neste trabalho assume-se que cada robô possui o conhecimento global *a priori* de todas as tarefas que o mesmo pode executar a partir do seu depósito e suas localizações, mas não tem conhecimento dos outros robôs e suas localizações, a menos que possam se comunicar quando estiverem dentro do mesmo raio de comunicação. Além disso, cada robô pode estimar a distância entre sua posição atual e de cada tarefa através da distância Euclidiana. Além disso, assume-se também que possíveis posições de depósitos e as tarefas cobertas por cada depósito são conhecidas *a priori* e uma decisão que deve ser tomada antes de iniciar a varredura das tarefas é de quais os depósitos que serão instalados, ou seja, quais as posições que os robôs terrestres devem se posicionar.

4.2 Abordagem de Resolução Baseada no Mecanismo de Mercado

Como mencionado no Capítulo 4.4, segundo a taxonomia de [Korsah, Stentz e Dias \(2013\)](#), o problema descrito na Seção 4.1 e que será resolvido aqui, trata-se de um problema ID[ST-SR-TA]. De acordo com a revisão bibliográfica realizada, as abordagens de solução baseadas em mercado são as que obtêm melhor desempenho para esse tipo de problema, principalmente quando considera-se sistemas dinâmicos de situações reais.

A presente abordagem proposta nesse trabalho é baseada nas estratégias de solução do problema de MD-MTSP por forma incremental, como as encontradas nos trabalhos ([BOTELHO](#);

ALAMI, 1999; SARIEL; ERDOGAN; BALCH, 2007; KIVELEVITCH; COHEN; KUMAR, 2013; KOUBAA *et al.*, 2017). Segundo esses autores, a resolução de forma incremental melhora a solução final para ambientes dinâmicos.

Além disso, considerando que as áreas a serem varridas são de grande porte, realiza-se inicialmente a escolha da alocação dos depósitos através da resolução de um problema de *set covering*. A solução do *set covering* é feita através de um procedimento guloso (*greedy*).

A solução proposta para resolver o problema de MD-MTSP aplicado a agricultura de precisão utilizando múltiplos robôs heterogêneos, no qual o presente trabalho está focado, é composta de cinco etapas: etapa que determina a alocação dos depósitos de onde partirão os robôs aéreos; etapa de alocação das tarefas para os robôs; etapa de construção do percurso a ser realizado por cada robô; etapa de eliminação das tarefas justapostas; e etapa de eliminação da tarefa com o pior custo (Algoritmo 1).

Algoritmo 1 – Algoritmo Geral de Alocação de Tarefas - GAT

- 1: **Início**
 - 2: Definição dos Depósitos
 - 3: Alocação das Tarefas
 - 4: Construção do Percurso
 - 5: Eliminação das Tarefas Justapostas
 - 6: Eliminação da Tarefa com Pior Custo
 - 7: **Fim**
-

Algoritmo 2 – Definição dos Depósitos

- 1: Seja Universo = todas as n tarefas que devem ser visitadas.
 - 2: Cobertura = $\cup \{\text{Depósitos que serão abertos}\} = \emptyset$
 - 3: **enquanto** Cobertura $\neq$ Universo **faça**
 - 4: Encolha D_i com o maior número de tarefas que ainda não estão em Cobertura
 - 5: Cobertura = Cobertura $\cup D_i$
 - 6: **fim enquanto**
 - 7: Retona os D_i que compõem a Cobertura.
-

As tarefas alocadas a cada depósito podem ser pré-determinadas, por exemplo, pelo alcance de comunicação desse depósito com os robôs aéreos. O número de robôs aéreos disponíveis por depósito é pré-determinado.

Na etapa de alocação das tarefas, apresentada no Algoritmo 3, cada robô recebe a lista das tarefas disponíveis para serem executadas. Essa lista de tarefas é enviada pelo controle central posicionado no robô terrestre. Cada robô R_i possui as duas listas: (1) a lista das tarefas disponíveis que não foram alocadas, e (2) a lista de tarefas alocadas, que contém as tarefas executadas e alocadas ao próprio robô R_i . No início da missão, todas tarefas são marcadas como disponíveis em cada robô, e a lista de tarefas alocadas está vazia. Em seguida, cada tarefa alocada será

removida da lista de tarefas disponíveis e o robô informa a seus vizinhos para também removê-la de sua lista de tarefas disponíveis. Uma tarefa é considerada alocada quando um robô termina de executá-la. Cada robô inicia calculando o custo (distância do percurso) de executar cada tarefa, e finalmente seleciona a tarefa com menor custo (tarefa mais perto). Então, cada robô R_i inicia o deslocamento para a tarefa selecionada $T_{selecionada}$, e ao mesmo tempo, permanece procurando robôs vizinhos dentro de seu raio de comunicação, e trocando informações sobre as tarefas alocadas. Essa troca é realizada de maneira bidirecional, ambos trocam suas listas de tarefas disponíveis e as tarefas que ainda não foram executadas. Com isso, cada robô pode atualizar sua própria lista de tarefas disponíveis, descartando aquelas que estão alocadas/executadas por outro robô. Essa verificação se dá na linha 10 do Algoritmo 3. Se a tarefa selecionada $T_{selecionada}$ permanece não alocada por outro robô, o robô dá um lance para essa tarefa junto com seus vizinhos. Os robôs vizinhos enviam seus custos para o robô R_i , que executa o papel de leiloeiro para a tarefa $T_{selecionada}$, em resposta a demanda solicitada. Finalmente, o robô R_i irá atribuir a tarefa $T_{selecionada}$ ao robô com menor custo, incluindo-se. (Algoritmo 3: Linha 14). Um robô completa o Algoritmo 3, quando todas suas tarefas estiveram marcadas como executadas, tendo sido executadas por ele ou por outro robô que compartilhou sua lista de tarefas.

Essa etapa de deslocamento para a tarefa $T_{selecionada}$ é repetida até que o robô R_i descarte a tarefa selecionada, quando descobrir que ela está alocada para outro robô, ou até executar a tarefa selecionada. Ainda nessa etapa, o robô adiciona essa tarefa na sua própria lista de tarefas alocadas, e o remove da sua própria lista de tarefas disponíveis. O robô R_i repete o processo de seleção de uma nova tarefa e deslocamento, até que sua lista de tarefas disponíveis esteja vazia (Algoritmo 3).

Algoritmo 3 – Alocação as Tarefas

```

1: Lista de Tarefas Disponíveis = Todas tarefas a serem visitadas
2: Lista de Tarefas Alocadas de  $R_i = \emptyset$ 
3: enquanto Lista de Tarefas Disponíveis  $\neq \emptyset$  faça
4:   Calcula o custo da posição atual para cada tarefa disponível
5:   Seleciona a tarefa com o menor custo
6:   repita
7:     Procura por robôs vizinhos
8:     se vizinhos  $\neq \emptyset$  então
9:       Se comunica com o(s) vizinho(s) e atualiza a lista de tarefas disponíveis
10:      se tarefa selecionada  $\notin$  tarefas disponíveis então
11:        vá para linha 3: {a tarefa selecionada já está alocada para outro robô}
12:      fim se
13:      Envia lance para a tarefa selecionada
14:      se o custo do robô  $R_i > R_j$ , onde  $R_j$  é vizinho de  $R_i$  então
15:        vá para linha 3: {a tarefa pode ser executada pelo robô com menor custo}
16:      fim se
17:    fim se
18:    Move o robô para a tarefa selecionada
19:  até Robô alcance a tarefa selecionada
20:  Adiciona a tarefa na lista de tarefas alocadas
21:  Remove a tarefa da lista de tarefas disponíveis
22: fim enquanto

```

Após a conclusão da etapa de alocação das tarefas (a lista das tarefas disponíveis vazia), cada robô constrói um percurso próximo do percurso ótimo, utilizando um *solver* TSP (Algoritmo 4). É possível utilizar qualquer construtor de percurso TSP disponível na literatura, como por exemplo, uma heurística do tipo *greedy* ou abordagem evolutiva com em Braun (1991). Para a construção dos percursos pelos robôs, nesta proposta foi utilizada uma meta-heurística *simulated annealing* (WANG; TIAN; LI, 2013).

Algoritmo 4 – Constrói o Percurso de cada Robô

```

1: chama TSP (Alocação das tarefas ao robô através da resolução do problema do caixeiro viajante)

```

Após a etapa de construção do percurso, cada robô gera uma primeira solução para o problema MD-MTSP e obtém o percurso apropriado para deslocar até as tarefas alocadas. Porém, pode acontecer de várias tarefas terem sido alocadas para mais de um robô, durante a etapa de alocação. Isso é possível pois os robôs possuem um raio de comunicação limitado, com isso não tiveram oportunidade de trocar suas listas de tarefas alocadas, de forma direta ou indireta por meio de outros vizinhos. Isso significa que, quando os robôs trocam suas listas de tarefas disponíveis, e após qualquer troca, a lista resultante em cada robô conterá a união das duas listas de tarefas alocadas.

Algoritmo 5 – Elimina Tarefas Justapostas

```

1: PercFeito=falso {indica se o percurso foi feito}
2: posição atual=robô terrestre
3: repita
4:   Procura por robôs vizinhos
5:   se vizinhos  $\neq \emptyset$  então
6:     Troca a lista de tarefas alocadas com os vizinhos
7:     Tarefas em comum = Tarefas alocadas  $\cap (\cup \{ \text{Tarefas alocadas dos vizinhos} \})$ 
8:     para todo  $t_i \in$  tarefas em comum faça
9:       Envia lance para  $t_i$ 
10:      se Robô não é o vencedor de  $t_i$  então
11:        remove  $t_i$  das Tarefas alocadas
12:        chama TSP(Tarefas alocadas) {constrói um novo percurso}
13:        posição atual=robô terrestre
14:        PercFeito=falso
15:      fim se
16:    fim para
17:  fim se
18:  Move o robô para a próxima tarefa
19:  se posição atual==robô terrestre então
20:    PercFeito=verdadeiro
21:  fim se
22: até PercFeito

```

O objetivo da etapa de eliminação das tarefas justapostas (Algoritmo 5), consiste em aprimorar a solução MD-MTSP, eliminando tarefas alocadas em comum para mais de um robô, por meio de uma abordagem distribuída baseada no mecanismo de mercado. Essa etapa ocorre enquanto os robôs estão se deslocando entre as tarefas durante o percurso. Formalmente, considerando um robô R_i e um robô R_j , ambos têm a mesma tarefa alocada T_k . Se o ganho resultante da eliminação de T_k do percurso de R_i , for maior que o ganho resultante da eliminação de T_k do percurso de R_j , então R_i elimina T_k do seu percurso e constrói outro percurso baseado nas tarefas alocadas restantes. O ganho é definido pela diferença entre o custo do percurso anterior, antes de remover as tarefas em comum, com o custo novo após remover a tarefa. No caso de existirem diversas tarefas justapostas, os robôs podem enviar lances separadamente ou todos juntos. Com o objetivo de minimizar o custo total, a função objetivo do custo é expressada por:

$$ganho_i = C(T_{perR_i}) - C(T_{perR_i}/T_k)$$

$$ganho_j = C(T_{perR_j}) - C(T_{perR_j}/T_k)$$

onde $C(T_{perR_i})$ é o custo do T_{perR_i} contendo a tarefa T_k e $C(T_{perR_i}/T_k)$ é o custo do T_{perR_i} depois de remover a tarefa T_k . $C(T_{perR_i})$ é calculado usando o Algoritmo 4 aplicado nas tarefas

alocadas de R_i , exceto a tarefa T_k . O $ganho_i$ representa o ganho obtido quando a tarefa T_k é removida do percurso do robô R_i , e o $ganho_j$ representa o ganho obtido quando a tarefa T_k é removida do percurso do robô R_j . Se o $ganho_i > ganho_j$, a tarefa T_k deve ser removida do percurso do robô R_i e o percurso do robô R_j deve ser mantido inalterado.

A última etapa de eliminação da tarefa com pior custo (Algoritmo 6), consiste em aprimorar a solução do percurso resultante da etapa de eliminação das tarefas justapostas.

Algoritmo 6 – Elimina Tarefa com Pior Custo

```

1: PercFeito=falso {indica se o percurso total foi finalizado}
2: posição atual=robô terrestre
3: repita
4:   Procura por robôs vizinhos
5:   se vizinhos  $\neq \emptyset$  então
6:     Seleciona a pior tarefa alocada ( $t_w$ )(a que tiver o pior custo).
7:     Envia lance para  $t_w$ 
8:     se Robô não é o vencedor de  $t_w$  então
9:       remove  $t_w$  das Tarefas alocadas
10:      chama TSP(Tarefas alocadas) {constrói um novo percurso}
11:      posição atual=robô terrestre
12:      PercFeito=falso
13:    fim se
14:  fim se
15:  Move o robô para a próxima tarefa
16:  se posição atual==robô terrestre então
17:    PercFeito=verdadeiro
18:  fim se
19: até PercFeito
  
```

Quando o robô R_i entra no raio de comunicação do robô R_j , ele envia um lance da tarefa T_k para o robô R_j , induzindo o processo de leilão com a tarefa de maior custo para ele executar dentro do percurso. Em outras palavras, se a tarefa T_k for removida do percurso do robô R_i , irá alcançar o custo mínimo em relação as outras tarefas alocadas. Formalmente, T_k é calculado como:

$$T_k = \arg \min_{T_j} C(T_{perR_i}/T_j)$$

O robô R_i calcula o ganho obtido quando remove a tarefa T_k de seu percurso e o robô vizinho R_j calcula o custo extra obtido quando é adicionada a tarefa T_k no seu percurso. No caso do *MinSum*, o ganho é calculado da seguinte forma:

$$ganho = [C(T_{perR_i}) + C(T_{perR_j})] - [C(T_{perR_i}/T_k) + C(T_{perR_j} \cup T_k)]$$

$C(T_{perR_j} \cup T_k)$ é calculado utilizando o Algoritmo 4 aplicado nas tarefas alocadas de R_j somando T_k . Se o ganho obtido da remoção de T_k do percurso de R_i for maior que o custo extra obtido ao adicionar T_k ao percurso de R_j , o robô vizinho R_j ganha esta tarefa T_k e, portanto, T_k será removido das tarefas alocadas para o robô R_i , e adicionada na lista de tarefas alocadas do robô R_j .

Esse processo de remoção da tarefa T_k pode ser repetido mais de uma vez, de acordo com o Algoritmo 6, para melhorar o resultado final.

4.3 Quadrirotor Desenvolvido

O quadrirotor desenvolvido nesse projeto foi projetado e elaborado como plataforma padrão para ser utilizado em diversas aplicações, dentre elas: imageamento aéreo, coleta de dados e rastreamento de veículos. Foi utilizado uma impressora 3D, Figura 5, para fabricação de suas peças estruturais.

Figura 5 – Impressora 3D modelo *Prusa Mendel*, montada e calibrada pelo autor.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O quadrirotor, Figura 6a, possui um piloto automático que o controla por meio da fusão dos dados dos sensores (IMU e GPS). Para realizar a captura de imagens aéreas (Figuras 6b, 6c, 6d) foi acoplado uma câmera *GoPro Hero 3*.

Atualmente esse quadrirotor possui dois modos de voo: voo autônomo ou voo rádio controlado. No voo autônomo utilizamos um *tablet* para controle, onde via *bluetooth* envia comandos à uma estação situada em terra, que por sua vez envia os comandos para o quadrirotor.

Figura 6 – Quadrirotor desenvolvido em operação.

(a) Quadrirotor projetado em voo teste no ICMC.

(b) Imagem área do Campus 1 da USP de São Carlos.

(c) Imagem área do Campus 3 da USP de São Carlos (CHREA).

(d) Imagem área da UFSCAR de São Carlos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

No voo rádio controlado utilizamos um controle com 6 canais para controlar os movimentos do quadrirotor.

O quadrirotor foi projetado e desenhado com o auxílio de uma ferramenta *CAD*. Todas suas peças estruturais, como: protetor de hélice, trem de pouso, suporte do motor, chassi principal, caixa de proteção das placas eletrônicas e suporte da câmera, foram impressas em uma impressora 3D (Figura 7).

Figura 7 – Peças prototipadas na impressora 3D.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para maiores detalhes, no Apêndice A são apresentados os desenhos técnicos do quadrirotor projetado e desenvolvido, detalhes estruturais da montagem mecânica/eletrônica e análise da tensão máxima suportada pelas peças.

4.3.1 Modelo Matemático para Controle do Quadrirotor

Nesta seção apresenta-se o modelo matemático para controle do quadrirotor projetado. As equações diferenciais usadas são obtidas da derivação das equações de Newton-Euler-Lagrange. A Figura 8 representa a estrutura do quadrirotor, com as velocidades angulares, torques e forças criadas por cada um dos rotores e o modelo projetado.

Onde $i = 1, 2, 3, 4$, ω_i é a velocidade angular em cada rotor, f_i é a força em cada rotor, τ_{M_i} é o torque em cada rotor, ϕ é o ângulo de rolagem dado pela rotação em torno do eixo x , θ é o ângulo arfagem dado pela rotação em torno do eixo y , e ψ é o ângulo de guinada dado pela rotação em torno do eixo z .

Figura 8 – Sistema de coordenadas inercial e do corpo de um quadrirotor genérico.

Fonte: [Luukkonen \(2011\)](#).

A origem da estrutura do corpo fica no centro de massa do quadrirotor. Na estrutura do corpo, as velocidades lineares são determinadas por $V_B = [v_{x_B} \ v_{y_B} \ v_{z_B}]$ e as velocidades angulares por $v = [p \ q \ r]$. A matriz de rotação da estrutura do corpo para o referencial inercial é

$$R = \begin{bmatrix} C_\psi C_\theta & (C_\psi S_\theta S_\phi - S_\psi C_\phi) & (C_\psi S_\theta C_\phi + S_\psi S_\phi) \\ S_\psi C_\theta & (S_\psi S_\theta S_\phi + C_\psi C_\phi) & (S_\psi S_\theta C_\phi - C_\psi S_\phi) \\ -S_\theta & C_\theta S_\phi & C_\theta C_\phi \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

em que $S_x = \sin(x)$ e $C_x = \cos(x)$. A matriz de rotação R é ortogonal então $R^{-1} = R^T$. Além disso, temos que a transformação das velocidades angulares do referencial inercial para a estrutura é dada por,

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \frac{\sin \phi}{\cos \theta} & \frac{\cos \phi}{\cos \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

Sejam I_{xx}, I_{yy} e I_{zz} os momentos de inércia com relação aos eixos x , y e z , respectivamente. Assume-se que o quadrirotor tem estrutura simétrica com os quatro braços alinhados com os eixos x e y do corpo, ou seja, $I_{xx}=I_{yy}$. Portanto, a matriz do momento de inércia I é dada por:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

A velocidade angular do rotor i , chamada de ω_i , gera uma força $f_i = k\omega_i^2$ na direção do eixo do rotor e um torque $\tau_{M_i} = b\omega_i^2 + I_M \dot{\omega}_i$. Sendo k uma constante de elevação, b uma

constante do vento e I_M o momento de inércia do rotor. As equações geradas pelo controlador PD são dadas por:

$$\begin{aligned} T &= (g + (K_{zd})(\dot{z}_d - \dot{z}) + (K_{zp})(z_d - z)) \frac{m}{(\cos\phi \cos\theta)}, \\ \tau_\phi &= (K_{\phi d}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + K_{\phi p}(\phi_d - \phi))I_{xx}, \\ \tau_\theta &= (K_{\theta d}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_{\theta p}(\theta_d - \theta))I_{yy}, \\ \tau_\psi &= (K_{\psi d}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + K_{\psi p}(\psi_d - \psi))I_{zz}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

Onde T denota o impulso total gerado pelas forças combinadas dos rotores, τ_ϕ é o torque gerado pela rotação em torno do eixo x , τ_θ é o torque gerado pela rotação em torno do eixo y , τ_ψ é o torque gerado pela rotação em torno do eixo z ; K_{zd} , $K_{\phi d}$, $K_{\theta d}$ e $K_{\psi d}$ são os ganhos derivativos, K_{zp} , $K_{\phi p}$, $K_{\theta p}$ e $K_{\psi p}$ são os ganhos proporcionais; $\dot{z}_d$ é a velocidade desejada no eixo z , z_d é a posição desejada no eixo z ; ϕ_d , θ_d e ψ_d são os ângulos desejados de rolagem, arfagem e guinada, $\dot{\phi}_d$ e $\dot{\theta}_d$ e $\dot{\psi}_d$ são as velocidades angulares desejadas de rolagem, arfagem e guinada. E finalmente, define-se o vetor de torque total como sendo τ_B , dado por:

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lk(-\omega_2^2 + \omega_4^2) \\ lk(-\omega_1^2 + \omega_3^2) \\ \sum_{n=1}^4 \tau_{M_i} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

Sendo l a distância entre o rotor e o centro de massa do quadrirotor. Com as equações de torques e de impulso total, é possível calcular a velocidade angular de cada rotor w_i ,

$$\begin{aligned} w_1^2 &= \frac{T}{4k} - \frac{\tau_\theta}{2kl} - \frac{\tau_\psi}{4b}, \\ w_2^2 &= \frac{T}{4k} - \frac{\tau_\phi}{2kl} + \frac{\tau_\psi}{4b}, \\ w_3^2 &= \frac{T}{4k} + \frac{\tau_\theta}{2kl} - \frac{\tau_\psi}{4b}, \\ w_4^2 &= \frac{T}{4k} + \frac{\tau_\phi}{2kl} + \frac{\tau_\psi}{4b}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

4.3.2 Equações de Newton-Euler-Lagrange

O quadrirotor é considerado como um corpo rígido e então, por meio das equações de Newton-Euler, pode-se descrever sua dinâmica. Na estrutura do corpo, a força necessária para acelerar a massa $m \dot{V}_B$ e a força centrífuga $(mV_B)v$ são iguais a força da gravidade $R^T G$ e o impulso total dos rotores T_B , ou seja,

$$m\dot{V}_B + v(mV_B) = R^T G + T_B. \quad (4.9)$$

Como no referencial a força centrífuga é nula, apenas a força gravitacional e o impulso irão contribuir na aceleração do veículo. Logo, a equação é dada por,

$$m\ddot{s} = G + RT_B, \quad (4.10)$$

$$\ddot{s} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = -g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T}{m} \begin{bmatrix} \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (4.11)$$

O Lagrangiano L é a soma das energias translacional E_{trans} e rotacional E_{rot} menos a energia potencial E_{pot} .

$$L(q, \dot{q}) = E_{trans} + E_{rot} - E_{pot} = \frac{m}{2} \dot{s}^T \dot{s} + \frac{1}{2} v^T I v - mgz. \quad (4.12)$$

Como as componentes linear e angular são independentes, elas podem ser estudadas separadamente. A força externa linear é o impulso total dos rotores, então a equação linear de Euler-Lagrange é dada por,

$$f = RT_B = m\ddot{s} + mg \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.13)$$

A matriz Jacobiano $J(n)$ de v para $\dot{n}$ é,

$$J = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & -I_{xx} \sin \theta \\ 0 & I_{yy} \cos^2 \phi + I_{zz} \sin^2 \phi & (I_{yy} - I_{zz}) \cos \phi \sin \phi \cos \theta \\ -I_{xx} \sin \theta & (I_{yy} - I_{zz}) \cos \phi \sin \phi \cos \theta & I_{xx} \sin^2 \theta + I_{yy} \sin^2 \phi \cos^2 \theta + I_{zz} \cos^2 \phi \cos^2 \theta \end{bmatrix}.$$

Então, a energia rotacional E_{rot} pode ser expressa no referencial inercial como,

$$E_{rot} = \frac{1}{2} v^T I v = \frac{1}{2} \dot{n}^T J \dot{n}. \quad (4.14)$$

Como a força angular externa é o próprio torque nos rotores, as equações angulares de Euler-Lagrange são,

$$\tau = \tau_B = J\ddot{n} + \frac{d}{dt}(J)\dot{n} - \frac{1}{2} \frac{d}{dn}(\dot{n}^T J \dot{n}) = J\ddot{n} + C(n, \dot{n})\dot{n}, \quad (4.15)$$

em que $C(n, \dot{n})$ é o termo de Coriolis, que contém os termos giroscópico e centrípeto. A matriz $C(n, \dot{n})$ é dada por,

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix},$$

sendo,

$$C_{11} = 0,$$

$$C_{12} = (I_{yy} - I_{zz})(\dot{\theta} \cos \phi \sin \phi + \dot{\psi} \sin \phi^2 \cos \theta) + (I_{zz} - I_{yy})\dot{\psi} \cos \phi^2 \cos \theta - I_{xx}\dot{\psi} \cos \theta,$$

$$C_{13} = (I_{zz} - I_{yy})\dot{\psi} \cos \phi \sin \phi \cos \theta^2,$$

$$C_{21} = (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\theta} \cos \phi \sin \phi + \dot{\psi} \sin \phi \cos \theta) + (I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi} \cos \phi^2 \cos \theta + I_{xx}\dot{\psi} \cos \theta,$$

$$C_{22} = (I_{zz} - I_{yy})\dot{\phi} \cos \phi \sin \phi,$$

$$C_{23} = -I_{xx}\dot{\psi} \sin \theta \cos \theta + I_{yy}\dot{\psi} \sin \phi^2 \sin \theta \cos \theta + I_{zz}\dot{\psi} \cos \phi^2 \sin \theta \cos \theta,$$

$$C_{31} = (I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi} \cos \theta^2 \sin \phi \cos \phi - I_{xx}\dot{\theta} \cos \theta,$$

$$C_{32} = (I_{zz} - I_{yy})(\dot{\theta} \cos \phi \sin \phi \sin \theta + \dot{\phi} \sin \phi^2 \cos \theta) + (I_{yy} - I_{zz})\dot{\phi} \cos \phi^2 \cos \theta \\ + I_{xx}\dot{\psi} \sin \theta \cos \theta - I_{yy}\dot{\psi} \sin \phi^2 \sin \theta \cos \theta - I_{zz}\dot{\psi} \cos \phi^2 \sin \theta \cos \theta,$$

$$C_{33} = (I_{yy} - I_{zz})\dot{\phi} \cos \phi \sin \phi \cos \theta^2 - I_{yy}\dot{\theta} \sin \phi^2 \cos \theta \sin \theta - I_{zz}\dot{\theta} \cos \phi^2 \cos \theta \sin \theta \\ + I_{xx}\dot{\theta} \cos \theta \sin \theta.$$

Portanto, a equação para as acelerações angulares é dada por,

$$\ddot{n} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = J^{-1}(\tau_B - C(\dot{n}, \ddot{n})). \quad (4.16)$$

A Equação 4.16 é utilizada em 4.3.4 para calcular as acelerações desejadas de rolagem, arfagem e guinada do quadrirotor, por meio dos parâmetros obtidos no *software* CAD.

4.3.3 Obtenção do Parâmetros do Modelo Dinâmico do Quadrirotor

A obtenção dos parâmetros do modelo dinâmico do quadrirotor se deu por meio da utilização do *software* CAD (Figura 23). Durante o processo de desenho das peças nesse *software*, foi configurado o tipo de material que a peça final seria produzida, com isso o *software* atribui as constantes inerciais e de massa de cada peça de acordo com o tipo de material, nesse caso o ABS. A partir do desenho de todas as peças, iniciou-se o processo de montagem utilizando o *software* e obteve-se as propriedades do conjunto, como a massa m , os momentos de inércia com

relação aos três eixos I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} e a distância dos rotores até o centro de massa do veículo l , entre outros. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros do quadrirotor projetado (Figura 23).

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
g	9.81	m/s^2
m	1.221	Kg
l	0.225	m
k	2.98010^{-6}	-
b	1.14010^{-7}	-
I_M	3.35710^{-5}	Kgm^2
I_{xx}	3.16718^{-3}	Kgm^2
I_{yy}	6.16466^{-3}	Kgm^2
I_{zz}	3.23107^{-3}	Kgm^2
A_x	0.25	Kg/s
A_y	0.25	Kg/s
A_z	0.25	Kg/s

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.4 Obtenção dos Parâmetros

O quadrirotor é considerado como um corpo rígido e então, por meio das equações de Newton-Euler, pode-se descrever sua dinâmica (LUUKKONEN, 2011). A equação para as acelerações angulares é dada por:

$$\ddot{n} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = J^{-1}(\tau_B - C\dot{n}), \quad (4.17)$$

sendo $\ddot{\phi}_d$ e $\ddot{\theta}_d$ e $\ddot{\psi}_d$ as acelerações angulares desejadas de rolagem, arfagem e guinada, J a matriz Jacobina, $\tau_B = [\tau_\phi \ \tau_\theta \ \tau_\psi]^T$ o vetor de torque total, τ_ϕ o torque gerado pela rotação em torno do eixo x , τ_θ o torque gerado pela rotação em torno do eixo y , τ_ψ o torque gerado pela rotação em torno do eixo z e C a matriz de Coriolis. E a equação para as acelerações lineares é dada por:

$$\ddot{s} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} - g \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{T}{m} \begin{bmatrix} \cos\psi \sin\theta \cos\phi + \sin\psi \sin\phi \\ \sin\psi \sin\theta \cos\phi - \cos\psi \sin\phi \\ \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix} - \frac{1}{m} \begin{bmatrix} A_x & 0 & 0 \\ 0 & A_y & 0 \\ 0 & 0 & A_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

sendo $\ddot{x}$, $\ddot{y}$, e $\ddot{z}$ as acelerações lineares nos eixos x , y , e z , respectivamente, g a constante gravitacional, T o impulso total gerado pelas forças combinadas dos rotores, e A_x , A_y e A_z os coeficientes da força do vento nas correspondentes direções do referencial inercial.

As equações geradas pelo controlador PD são dadas por:

$$\begin{aligned}
 T &= (g + (K_{zd})(\dot{z}_d - \dot{z}) + (K_{zp})(z_d - z)) \frac{m}{(\cos\phi \cos\theta)}, \\
 \tau_\phi &= (K_{\phi d}(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + K_{\phi p}(\phi_d - \phi))I_{xx}, \\
 \tau_\theta &= (K_{\theta d}(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_{\theta p}(\theta_d - \theta))I_{yy}, \\
 \tau_\psi &= (K_{\psi d}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) + K_{\psi p}(\psi_d - \psi))I_{zz},
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

sendo K_{zd} , $K_{\phi d}$, $K_{\theta d}$ e $K_{\psi d}$ os ganhos derivativos, K_{zp} , $K_{\phi p}$, $K_{\theta p}$ e $K_{\psi p}$ os ganhos proporcionais; $\dot{z}_d$ a velocidade desejada no eixo z , z_d a posição desejada no eixo z ; ϕ_d , θ_d e ψ_d os ângulos desejados de rolagem, arfagem e guinada, e $\dot{\phi}_d$ e $\dot{\theta}_d$ e $\dot{\psi}_d$ as velocidades angulares desejadas de rolagem, arfagem e guinada.

A trajetória desejada x_d , y_d e z_d é obtida através de um polinômio de quinto grau, (CRAIG, 1989). E os ângulos desejados por:

$$\begin{aligned}
 \phi_d &= as\left(\frac{d_x \sin(\psi) - d_y \cos(\psi)}{d_x^2 + d_y^2 + (d_z + g)^2}\right), \\
 \theta_d &= at\left(\frac{d_x \cos(\psi) + d_y \sin(\psi)}{d_z + g}\right),
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

sendo

$$\begin{aligned}
 d_x &= K_{xp}(x_d - x) + K_{xd}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{xdd}(\ddot{x}_d - \ddot{x}), \\
 d_y &= K_{yp}(y_d - y) + K_{yd}(\dot{y}_d - \dot{y}) + K_{ydd}(\ddot{y}_d - \ddot{y}), \\
 d_z &= K_{zp}(z_d - z) + K_{zd}(\dot{z}_d - \dot{z}) + K_{zdd}(\ddot{z}_d - \ddot{z}).
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

O quadricóptero desenvolvido foi utilizado e testado em outras aplicações (FRACCAROLI *et al.*, 2016; NEVES *et al.*, 2015; FRACCAROLI *et al.*, 2014; MONTANARI *et al.*, 2015a; MONTANARI *et al.*, 2015b; FRACCAROLI; ROMERO, 2014; BATISTA *et al.*, 2013)

4.4 Considerações Finais

Este capítulo teve como objetivo descrever o modelo proposto de alocação das tarefas para múltiplos robôs heterogêneos, utilizando uma abordagem descentralizada e baseada no modelo de mercado. Além disso, foi apresentado o desenvolvimento de um quadricóptero real constituído por hastes de alumínio e peças prototipadas por uma impressora 3D de baixo custo. Também foram apresentados como foi realizada a identificação dos parâmetros do modelo dinâmico dessa aeronave através da utilização de um software CAD.

RESULTADOS E ANÁLISE DO MODELO PROPOSTO

Nesse capítulo será apresentado testes para validação do algoritmo proposto no Capítulo 4. Foram realizado testes em cenários similares ao formato de uma plantação de citros. O objetivo destes testes é analisar a capacidade do algoritmo proposto de resolver problema de designação de tarefas para robôs heterogêneos. Inicialmente foram realizados testes considerando um ambiente 2D. Analisou-se também a possibilidade de simulação da resolução do problema em um ambiente 3D por meio da plataforma ROS. Por fim, é apresentado o teste simulado do controlador PD ao quadricóptero desenvolvido simulado.

5.1 Resultados obtidos com o modelo proposto

Nesta seção são avaliados os resultados obtidos com o modelo proposto para resolução do problema MRTA em um ambiente agrícola. Considera-se assim que as tarefas estão enfileiradas em linhas e que ocupam uma área no formato de um retângulo. Foi utilizado *C++* e *Python* para o desenvolvimento do algoritmo do modelo proposto ¹.

As simulações são realizadas em um ambiente 2D. Inicialmente são realizados testes com um exemplar ilustrativo pequeno, porém seguindo a configuração de uma plantação. E na segunda simulação considera-se a configuração de uma área de um hectare de uma plantação, como a de citros, por exemplo. Os resultados dessas simulações estão descritos a seguir.

Exemplar Ilustrativo

Na Figura 9 está apresentado o ambiente de simulação do exemplar ilustrativo.

¹ <https://github.com/efraccaroli/GAT.git>

Figura 9 – Ambiente do exemplar ilustrativo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerou-se um ambiente de simulação de tamanho $9\text{m} \times 12\text{m}$. As tarefas foram alocadas em fileiras com um espaçamento de 1m na vertical e 2m na horizontal. Um total de 20 tarefas foram distribuídas nessa área. Como dado de entrada, foram disponibilizadas seis opções de locais para posicionamento do robô terrestre, ou seja, para abertura dos depósitos. Cada depósito tem uma área de cobertura pré-determinada e o algoritmo vai escolher quais depósitos serão abertos.

A partir desses dados, variou-se o número de robôs e o alcance de comunicação entre eles. Os cenários foram gerados de acordo com os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Variação de cenários no exemplar ilustrativo

Dados	Número de robôs aéreos para cada robô terrestre	Alcance de comunicação(m)
Cenário 1	1	1,2,3,4,5
Cenário 2	2	1,2,3,4,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos resultados obtidos com o modelo proposto, a primeira decisão tomada foi a abertura de somente três depósitos: *D2*, *D3* e *D4*, para todos os testes. Note que a decisão de abertura de depósitos é tomada *a priori* e, se nenhuma alteração é realizada nos dados de entrada das tarefas cobertas por cada depósito, o resultado sempre será o mesmo.

Um resumo dos resultados obtidos para os cenários da Tabela 5 é apresentado na Figura 10. Na Figura 10a está apresentado um gráfico com a comparação entre a distância total percor-

rida por todos os robôs e o alcance de comunicação. Percebe-se que existe uma tendência de diminuição da distância percorrida à medida que o alcance de comunicação é aumentado, como era de se esperar. Essa tendência é comprovada pela linha de regressão plotada na Figura 10b. Isso mostra que quando os robôs se comunicam, o esforço individual (aqui no caso avaliado através da métrica de distância percorrida) de cada um é reduzido. Obviamente em um cenário com mais robôs a distância total percorrida é maior do que em um cenário com menos robôs. Considerando todos os valores de alcance, na média os 3 robôs do primeiro cenário percorreram juntos 230,43m, enquanto que os 6 robôs do segundo cenário percorreram juntos 308,36m. Entretanto, a média por robô é menor quanto mais robôs são usados, para o cenário 1 a média da distância percorrida por cada robô foi de 76,81m contra 51,4m para cada robô do cenário 2. Cabe notar que a diminuição da quantidade percorrida por cada robô implica diretamente na redução de tempo de execução de todas as tarefas e no aumento autonomia, por exemplo.

Para ilustrar os resultados obtidos são apresentadas nas Figuras 11a e 11b as rotas percorridas por cada um dos robôs, considerando 3 robôs e um raio de alcance de 1m e 5m, respectivamente. Nota-se que quanto maior o raio de comunicação entre os robôs, menor é o número de tarefas sobrepostas. Além disso, quanto maior o raio de comunicação melhor é aproveitada a concentração das tarefas em torno de cada depósito.

Figura 10 – Comparação entre a distância total percorrida e o raio de comunicação dos cenários apresentados na Tabela 5.

(a) Alcance de comunicação X Distância percorrida.

(b) Linhas de tendência.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 – Rotas percorridas pelos robôs no final do algoritmo⁵

(a) Rotas com raio de comunicação = 1m.

(b) Rotas com raio de comunicação = 5m.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Simulação com dimensões reais

Nesse exemplar, a área a ser monitorada será considerada com um hectare em um talhão retangular de 100m $\times$ 100m. As recomendações de espaçamento para o plantio de citros variam dependendo do tipo de cultura. Para plantação de laranja, por exemplo, segundo a [EMBRAPA \(2016\)](#) o espaçamento recomendado é de 6m entre as linhas e 4m entre as plantas. Assim em um hectare é possível plantar 416 plantas. Essas serão as medidas consideradas para um exemplar real. Nas propriedades agrícolas cada hectare é considerado como um talhão e a entrada de veículos terrestres nesses talhões nem sempre é viável. Sendo assim os depósitos serão considerados em torno das plantas, ou seja, em torno dos talhões. Para esse exemplo serão considerados 8 possíveis posições de depósitos. A Figura 12 ilustra o ambiente real considerado.

Figura 12 – Ambiente do exemplar real.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Três cenários foram avaliados a partir desse ambiente:

- C1: 1 robô por depósito com um alcance de comunicação de 10m.
- C2: 1 robô por depósito com um alcance de comunicação de 50m.
- C3: 4 robôs por depósito com um alcance de comunicação de 50m.

Para todos os 3 cenários foram abertos 6 depósitos. O valor total da distância percorrida por todos os robôs e o valor médio por robô estão descritos na Tabela 6. Da mesma forma que para o exemplar ilustrativo percebe-se que com o aumento do alcance de comunicação o valor total percorrido pelos robôs diminui, e que com o aumento do número de robôs o valor total percorrido por todos os robôs aumenta, mas o valor médio percorrido por cada robô diminui.

O aumento da complexidade da atribuição das tarefas em um ambiente com muitas tarefas e muitos robôs, como no caso de uma plantação, pode ser visto na Figura 13. Nessa figura estão representadas todas as rotas de todos os robôs para os cenários C1 e C3.

Tabela 6 – Resultados obtidos para os cenários considerados em um ambiente real.

	Valor total percorrido por todos os robôs (<i>m</i>)	Valor médio percorrido por cada robô (<i>m</i>)
C1	11.180,28	1.863,38
C2	10.589,96	1.764,99
C3	39.074,30	1.628,10

Nas Figuras 14 e 15 são mostradas as rotas dos 6 robôs com o alcance de 10m e 50m respectivamente. Apesar de não haver um padrão bem definido entre nessas figuras, pode-se perceber que quando o alcance de comunicação é maior, as tarefas tendem a ficar mais concentradas na área de cobertura dos seus respectivos depósitos, uma vez que essas tem mais chance de vencer o leilão entre os outros robôs dos outros depósitos por estarem mais próximas. Um exemplo claro disso é o robô R1 quando compara-se as rotas da figuras 14a e 15a.

Uma vez que esse ambiente visa contemplar uma situação real, convém observar que os depósitos poderiam ser considerados como pontos de parada de um único robô terrestre carregando um ou mais robôs aéreos. Após a execução do algoritmo as posições dos depósitos abertos são as posições em que o robô terrestre vai parar para os robôs aéreos fazerem a varredura das tarefas designadas aquele depósito, trabalhando assim de forma cooperativa. A vantagem de considerar esses pontos de parada em lugares estratégicos é a varredura de áreas muito grandes com poucos robôs. Uma propriedade de citros pode ter mais de 50 hectares de plantas para serem avaliadas.

Obviamente em um ambiente 3D as distâncias percorridas para varrer uma planta também entrariam no valor total conta das distâncias percorridas por cada robô. Para se mover de uma planta para outra o robô aéreo percorre a plantação por cima, sem correr o risco de chocarem-se com objetos no chão.

Figura 13 – Rotas percorridas por todos os robôs nos cenários C1 e C3.

(a) Rotas percorridas por todos os robôs no cenário C1.

(b) Rotas percorridas por todos os robôs no cenário C3.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 14 – Rotas percorridas por cada um dos robôs no cenário C1.

(a) Rota percorrida pelo robô R1 no cenário C1.

(b) Rota percorrida pelo robô R2 no cenário C1.

(c) Rota percorrida pelo robô R3 no cenário C1.

(d) Rota percorrida pelo robô R4 no cenário C1.

(e) Rota percorrida pelo robô R5 no cenário C1.

(f) Rota percorrida pelo robô R5 no cenário C1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 15 – Rotas percorridas por cada um dos robôs no cenário C2.

(a) Rota percorrida pelo robô R1 no cenário C2.

(b) Rota percorrida pelo robô R2 no cenário C2.

(c) Rota percorrida pelo robô R3 no cenário C2.

(d) Rota percorrida pelo robô R4 no cenário C2.

(e) Rota percorrida pelo robô R5 no cenário C2.

(f) Rota percorrida pelo robô R5 no cenário C2.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 Estudo das Simulações

Deu-se início a essa etapa com a importação do modelo 3D do quadrirotor desenvolvido para o simulador Gazebo. O quadrirotor projetado se trata de um modelo bastante complexo, por conta disso utilizou-se um *plugin* instalado na ferramenta CAD, que é capaz de exportar o quadrirotor completo com todos seus parâmetros inerciais e de massa. Por meio desse *plugin*, foi possível determinar todos os *links*, partes móveis do quadrirotor, a fim de definir os graus de liberdade de cada *link*. Além dos 6 graus de liberdade do quadrirotor, para realizar o movimento de rotação das hélices no ambiente simulado é necessário adicionar um grau de liberdade para

cada motor.

Após o processo de configuração realizado por meio do *plugin* instalado no *software* CAD, foram gerados os arquivos necessários para serem executados dentro do ambiente do Gazebo. Para se criar um modelo é necessário: uma malha de triângulos 3D do objeto e um arquivo *XML* (*Extensible Markup Language*) com extensão *.SDF* (*Spatial Data File*). Esse arquivo descreve os objetos e o ambiente para simuladores de robôs, visualização e controle. Ele contém uma coleção dos *links*, articulações, modelos de colisão, modelo de visualização e *plugins*. Com esse arquivo é possível descrever precisamente todos aspectos do robô utilizado. Na Figura 16 é apresentado o quadrirotor desenvolvido já importado no ambiente simulado do Gazebo.

Figura 16 – Quadrirotor desenvolvido simulado no Gazebo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O Gazebo compreende somente três tipos de arquivos com as respectivas extensões *.STL*, *.OBJ*, *.DAE*, se for utilizado qualquer outra ferramenta CAD é necessário realizar conversões, para que o Gazebo possa executar o modelo 3D. O Gazebo disponibiliza um conjunto de formas simples, como: uma caixa, uma esfera e um cilindro. Se o modelo precisa ser mais complexo, pode ser encontrado inúmeros modelos 3D em diversos repositórios disponíveis na *internet*.

O cenário proposto para testes e validação do sistema foi configurado no Gazebo. Esse cenário corresponde a uma plantação de citros, como árvores justapostas em linhas espaçadas por ruas.

Para o plantio de citros a Embrapa sugere a distância lateral entre árvores na mesma linha

em torno de $4m$, a distância entre fileiras em torno de $6m$, totalizando 416 árvores por hectare ($10.000m^2$). Para a simulação assumimos um padrão de tamanho para cada árvore, onde sua altura não ultrapassa $7m$ e seu diâmetro máximo de $5m$. Outro detalhe que foi necessário ser inserido na simulação foi o acoplamento de uma plataforma para pouso dos robôs aéreos no robô terrestre de acordo com a Figura 17.

Figura 17 – Plataforma acoplada ao robô terrestre utilizada para decolagens e pousos dos robôs aéreos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nessa plataforma acoplada ao robô terrestre estão inseridos quatro marcadores com padrões específicos para uso do robô aéreo. Quando o robô aéreo volta para o seu respectivo robô terrestre (depósito), ele identifica o padrão em cima da plataforma por meio de uma câmera, se o padrão foi detectado significa que não existe nenhum outro robô aéreo pousado naquele padrão e assim está livre para pouso.

Durante o processo de configuração do ambiente de simulação houveram diversos obstáculos, alguns foram transpostos mas outros não puderam, como por exemplo a dificuldade de simular diversos robôs em um ambiente complexo utilizando o Gazebo. Na Figura 18 é possível visualizar a quantidade de memória necessária para simular apenas um talhão (416 árvores), quatro robôs aéreos e apenas um robô terrestre. Mesmo fazendo uso de um simples paralelepípedo como representação gráfica de uma árvore, ainda assim exigia muito da capacidade total de memória disponível na máquina utilizada. Outras tentativas foram feitas para tentar diminuir a quantidade de memória utilizada pela simulação, como a exclusão total de qualquer tipo de textura e a configuração da placa de vídeo para trabalhar na máximo desempenho possível, mas

nenhuma dessas práticas surtiram efeito.

Figura 18 – Processamento e memória exigidos para a simulação dos robôs em um ambiente 3D.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A máquina utilizada para essa avaliação é um notebook Avell G1511 V3, com processador Core I7-6700 HQ Skylake com 6MB de cache, 16GB de memória RAM DDR4 de 2133Mhz e placa de vídeo GeForce GTX 960M com 2GB DDR5 de memória de vídeo. Mesmo fazendo o uso dessa máquina com capacidade de processamento não foi possível utilizar o ambiente 3D para as simulações, sendo assim somente foram realizadas simulações em um ambiente 2D descritos na Seção 5.1.

5.3 Simulação do Controlador PD (*Proportional Derivative*) do quadrirotor desenvolvido

A simulação do controle do quadrirotor foi implementada em MATLAB[®], conforme ilustrado pelo diagrama da Figura 19. Primeiramente foi gerada uma trajetória desejada para o quadrirotor através de um polinômio do quinto grau, que irá traçar uma reta entre a posição original do quadrirotor e a posição final desejada do quadrirotor.

Os resultados descritos nessa seção estão reportados em Fraccaroli *et al.* (2016).

Figura 19 – Diagrama de blocos do sistema de controle do quadrirotor.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa trajetória é então comparada com a posição do quadrirotor ao longo do tempo. Um erro entre a trajetória desejada e a posição atual do quadrirotor é calculado. Esse erro é então utilizado para o cálculo do controlador PD, que fornece o impulso total e o torque total para o modelo do quadrirotor. E através de uma dupla integração, obtém-se o valor de posição e atitude do quadrirotor.

Para simulação foram utilizados os valores dos parâmetros baseados em (LUUKKONEN, 2011) e nos momentos de inércia do quadrirotor real (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores de ganho do controlador.

PARÂMETRO	VALOR
K_{zd}	2.5
$K_{\phi d}$	1.75
$K_{\theta d}$	1.75
$K_{\psi d}$	1.75
K_{zp}	1.5
$K_{\phi p}$	6
$K_{\theta p}$	6
$K_{\psi p}$	6

Fonte: Luukkonen (2011).

A interface para simulação do controle do quadrirotor (Figura 20), é uma estrutura feita no *Graphical User Interface Design Environment* (GUIDE), uma ferramenta do MATLAB®.

Figura 20 – Ambiente de Simulação e Controle do Quadrirotor - ASCQ

Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa estrutura apresenta os gráficos de posição do quadrirotor em duas e três dimensões, contém também um quadro nomeado *Actual Position* que apresenta as posições e ângulos do veículo num dado tempo t . Outro quadro fornece a posição, tempo de experimento e trajetória e ângulos desejados. Um dos quadros apresenta os botões *start* e *stop* que definem o início, parada e/ou fim do experimento. O botão *ginput* quando não selecionado, assume que a trajetória desejada do veículo é a que está na tela inicial $(x, y, z) = (-2, -2, 2.5)$. Caso ele seja selecionado, quando o botão *Waypoint* é acionado e o usuário pode selecionar um ponto no gráfico 2D e essa será a nova trajetória desejada. O botão *Plot* fornece os gráficos de cada posição e cada ângulo ao longo do tempo (x versus t , y versus t , z versus t , ϕ versus t , θ versus t e ψ versus t). Já o botão *Plot Output* gera os mesmos gráficos fora do ASCQ e o botão *Save* salva os mesmos.

No estado inicial o quadrirotor está estável (posição e ângulo iguais a zero), em seguida, ele cumpri uma trajetória que é dividida em três etapas de 15 segundos cada. Na primeira etapa, o quadrirotor se desloca apenas no eixo z , rumo ao ponto $(0, 0, 5)$. Na segunda etapa, o quadrirotor se desloca nas três direções, rumo a posição final desejada $(x, y, z) = (5, 5, 5)$. Na última etapa, o quadrirotor se desloca nas três direções, rumo a nova posição desejada $(x, y, z) = (-5, -5, 5)$.

As Figuras 21a, 21b e 21c mostram as posições lineares e as figuras 22a, 22b e 22c mostram as posições angulares resultantes da simulação.

Figura 21 – Posições lineares.

(a) Rolagem.

(b) Arfagem.

(c) Guinada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Posições angulares.

(a) Rolagem.

(b) Arfagem.

(c) Guinada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A simulação mostrou que a modelagem do quadrirotor foi satisfatória. Além disso, o controlador PD funcionou bem, porém, houve uma variação dos valores de x e y durante o processo de estabilização. Houveram também desvios nos valores dos ângulos de rolagem (ϕ), arfagem (θ) e guinada (ψ). O desvio no ângulo (ψ) é gerado para compensar a força de arrasto gerada pela aceleração do veículo.

Além disso, o quadrirotor foi testado na prática. Nos trabalhos [Montanari et al. \(2015a\)](#) e [Montanari et al. \(2015b\)](#) o quadrirotor foi utilizado para detecção e classificação de veículos terrestres, e em [Neves et al. \(2015\)](#) onde esse quadrirotor foi utilizado para

5.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto em alguns cenários. Os resultados demonstram que o algoritmo cumpre com o papel de alocar as tarefas aos robôs de forma otimizada. Além disso, percebe-se que a complexidade do problema resolvido aumenta, a medida que aumentam o número de robôs e de tarefas. Quanto maior o raio de comunicação, melhor é a otimização das tarefas alocadas. Também foi apresentado o ambiente simulado 3D configurado para iniciar os testes, mas por conta da quantidade exacerbada do uso da capacidade disponível da máquina, não foi possível aplicar o modelo proposto no ambiente 3D. Já os resultados da simulação do controle PD aplicado aos parâmetros reais do quadrirotor projetado, apresentado na Tabela 4, mostraram que o controlador PD é capaz de suavizar a estabilização do quadrirotor.

CONCLUSÃO

A literatura mostra que essa abordagem de solução de forma incremental é bem sucedida quando comparada a outras abordagens e principalmente quando aplicada a ambientes reais. Por esses motivos essa abordagem de solução foi utilizada no modelo proposto nessa tese. Nesta tese estudou-se o problema de alocação de tarefas para múltiplos robôs (MRTA) para o cumprimento de missões, como por exemplo, o monitoramento de plantas na agricultura de precisão. De acordo com a revisão de literatura realizada, esse problema pode ser modelado como um problema do caixeiro viajante com múltiplas viagens e múltiplos depósitos (MD-MTSP) e pode ser resolvido com mecanismos de mercado, como por exemplo, por um sistema de leilões.

Durante as pesquisas realizadas, percebeu-se que a localização dos depósitos pode ser uma decisão importante, pois em alguns problemas pode haver limitação da quantidade de robôs terrestres disponíveis. Atrelado a isso, está o fato de que os locais dos depósitos abertos podem ser pensados como ponto de parada para os robôs terrestres, que podem se mover no ambiente carregando os robôs aéreos. Nenhum trabalho na literatura aborda a abertura de depósitos atrelado ao MD-MTSP. Atrelado a isso, propôs-se uma resolução de um problema de cobertura de conjuntos para inicialmente decidir os depósitos que serão abertos e em seguida realizar a alocação de tarefas para os robôs através de um processo de leilão. Resultados mostraram que com um número mínimo de depósitos ainda é possível varrer todo o ambiente de forma otimizada. Acredita-se que é preciso ainda investigar de forma mais aprofundada os ganhos atrelados a abertura de menos depósitos. Acredita-se também que uma linha de pesquisa a ser seguida é a investigação da integração dos problemas de cobertura e do MD-MTSP.

A abordagem de solução proposta para o problema foi validada através de testes em um ambiente 2D. Iniciou-se o processo de configuração para montagem do ambiente simulado 3D para avaliação da abordagem proposta nesse ambiente. Durante essa etapa, observou-se o consumo exacerbado dos recursos disponíveis da máquina utilizada (memória). Por conta disso, tornou-se inviável validar o modelo proposto nesse ambiente 3D.

Outro objetivo dessa pesquisa era a criação de uma plataforma robótica aérea de baixo custo. A ideia era que essa plataforma pudesse num futuro ser replicada para validação do modelo proposto em um ambiente real, além de ser utilizada para outros fins. Desenvolveu-se o projeto mecânico e elétrico do quadrirotor, cujas peças foram prototipadas em uma impressora 3D, reduzindo assim o custo total de produção dessa plataforma. O quadrirotor foi testado e utilizado em diversas aplicações, mostrando-se robusto. Para esse quadrirotor propôs-se também um modelo de controle PD para estabilização inercial do mesmo.

Além das principais conclusões acima descritas, cabe salientar que o desenvolvimento dessa pesquisa caminhou que levaram a diversos outros subprojetos. Tais quais a construção de uma impressora 3D de baixo custo e a utilização do quadrirotor em aplicações reais multidisciplinares.

A seguir estão apresentadas as publicações geradas durante o desdobramento dessa pesquisa e de vários projetos correlacionados a mesma.

BATISTA, M. R.; JORGE, L. L. R.; CALVO, R.; FRACCAROLI, E. S.; DÓRIA, Y. M.; SILVA, M. O.; MONTANARI, R.; ROMERO, R. A. F. *A method to swarm robot escorting by using the probabilistic lloyd method*. In: **XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI**. [S.l.: s.n.], 2013. [Online] Disponível em: "<<http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/6102.pdf>>".

FRACCAROLI, E. S.; ROMERO, R. A. F. Alocação de tarefas para coordenação de robôs heterogêneos para agricultura de precisão. In: **Simpósio Nacional de Instrumentação Agrícola**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 61–64.

FRACCAROLI, E. S.; SILVA, M. O.; BATISTA, M. R.; MONTANARI, R.; ROMERO, R. A. F. Controlador fuzzy para impressora 3d de baixo custo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL. **Recentes Avanços em Sistemas Fuzzy**. [S.l.], 2014. p. 364–375. ISBN: 978-85-8215-064-1.

MONTANARI, R.; TOZADORE, D. C.; FRACCAROLI, E. S.; ROMERO, R. A. F. *Ground vehicle detection and classification by an unmanned aerial vehicle*. In: **2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 253–258.

MONTANARI, R.; TOZADORE, D. C.; FRACCAROLI, E. S.; ROMERO, R. A. F. *A visual attention approach for the tracking of vehicles through uav*. In: **Proceedings of XI Workshop de Visão Computacional**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 412–417.

NEVES, G. Z. F.; PEREIRA, D. N. B.; FRACCAROLI, E. S.; SANTOS, B. C.; SILVA, M.

S. D.; HORTA, I. T. L. G.; SANCHES, R. G.; GALLARDO, N. P.; ALVES, E. D. L.; PERUSSI, R.; OLIVEIRA, M. J.; VECCHIA, F. A. S.; FELICIO, R. A. Avaliação termo higrométrica de sub-altitude utilizando balão cativo e quadrotor: Um ensaio experimental. In: **XIV Simpósio do Curso de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental: Desafios e Perspectivas na Gestão de Crises Ambientais**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 1, p. 96–106.

FRACCAROLI, E. S.; INOUE, R. S.; FARIA, I. C. S.; ROMERO, R. A. F. Identificação dos parâmetros e simulação de um quadrotor contruído por meio de prototipação rápida. In: **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational And Applied Mathematics**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 4, n. 1, p. 685–691.

6.1 Trabalhos Futuros

A seguir são elencadas as principais possibilidades de trabalhos futuros identificadas durante o desenvolvimento dessa tese:

- Aplicar o modelo proposto em robôs reais, utilizando como plataforma base o quadrirotor projetado e desenvolvido. O intuito é validar a proposta em um ambiente real de uma plantação de citros.
- Investigar a integração dos problema de cobertura de conjuntos com o MD-MTSP.
- Implementar o sistema de controle de estabilidade no protótipo do quadrirotor construído e comparar com resultados obtidos pela simulação.
- Desenvolver uma estratégia *fuzzy* para otimizar os dados de entrada para o sistema de alocação de tarefas.
- Pesquisar uma abordagem de solução para uma situação em que os robôs terrestres se movem juntamente com os robôs aéreos. Ou seja, uma situação em que o robôs aéreos possa partir de uma localização e pousar em outra.

REFERÊNCIAS

- ABARNA, J.; SELVAKUMAR, A. A. Rose flower harvesting robot. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 10, n. 55, p. 4216–4220, 2015. Citado nas páginas 32 e 36.
- AHAMMED, S. R.; REDDY, P. S.; VENNISHMUTHU, V.; HUSHEIN, R.; GAYATHRI, P. Modeling and analysis of cost effective lemon harvesting robot. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 10, n. 4, p. 9697–9710, 2015. Citado na página 32.
- AL-YAFI, K.; LEE, H.; MANSOURI, A. Mtap-masim: A multi-agent simulator for the mobile task allocation problem. In: **Proceedings of the Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises, WETICE**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 25–27. Citado na página 45.
- ASTRAND, B.; BAERVELDT, A. J. A vision based row-following system for agricultural field machinery. **Mechatronics**, v. 15, n. 2, p. 251–269, 2005. Citado na página 32.
- BADRELDIN, M.; HUSSEIN, A.; KHAMIS, A. A comparative study between optimization and market-based approaches to multi-robot task allocation. **Advances in Artificial Intelligence**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, p. 11, 2013. ISSN 1687-7489. Citado nas páginas 49 e 50.
- BAHADORIAN, M.; EATON, R.; HESKETH, T.; SAVKOVIC, B. Robust time-varying model predictive control with application to mobile robot unmanned path tracking. **{IFAC} Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, p. 4849 – 4854, 2014. Citado na página 32.
- BAK, T.; JAKOBSEN, H. Agricultural robotic platform with four wheel steering for weed detection. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 2, p. 125–136, 2004. Citado na página 32.
- BAKKER, T.; ASSELT, K. van; BONTSEMA, J.; HENTEN, E. J. van. Robotic weeding of a maize field based on navigation data of the tractor that performed the seeding. **{IFAC} Proceedings Volumes**, v. 43, n. 26, p. 157–159, 2010. Citado na página 32.
- BAKKER, T.; ASSELT, K. van; BONTSEMA, J.; MÜLLER, J.; STRATEN, G. van. Autonomous navigation using a robot platform in a sugar beet field. **Biosystems Engineering**, v. 109, n. 4, p. 357 – 368, 2011. Citado na página 32.
- BALL, D.; UPCROFT, B.; WYETH, G.; CORKE, P.; ENGLISH, A.; ROSS, P.; PATTEN, T.; FITCH, R.; SUKKARIEH, S.; BATE, A. Vision-based obstacle detection and navigation for an agricultural robot. **Journal of Field Robotics**, v. 33, n. 8, p. 1107–1130, 2016. Citado na página 32.
- BARRIENTOS, A.; COLORADO, J.; CERRO, J. del; MARTINEZ, A.; ROSSI, C.; SANZ, D.; VALENTE, J. Aerial remote sensing in agriculture: A practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. **Journal of Field Robotics**, v. 28, n. 5, p. 667–689, 2011. Citado na página 24.

- BATALIN, M.; SUKHATME, G. Spreading out: a local approach to multi-robot coverage. **Distributed Autonomous Robotic Systems**, v. 5, p. 373–382, 2002. Citado na página 36.
- BATISTA, M. R.; JORGE, L. L. R.; CALVO, R.; FRACCAROLI, E. S.; ROMERO, R. A. F.; DÓRIA, Y. M.; SILVA, M. O.; MONTANARI, R.; ROMERO, R. A. F. A method to swarm robot escorting by using the probabilistic lloyd method. In: **XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI**. [S.l.: s.n.], 2013. [Online] Disponível em: "<<http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/6102.pdf>>". Citado na página 74.
- BAYAR, G.; BERGERMAN, M.; KOKU, A. B.; KONUKSEVEN, E. ilhan. Localization and control of an autonomous orchard vehicle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 115, p. 118 – 128, 2015. Citado na página 32.
- BECHAR, A. Robotics in horticultural field production. **Stewart Postharvest Review**, v. 6, n. 3, p. 1–11, 2010. Citado na página 30.
- BECHAR, A.; EDAN, Y. Human-robot collaboration for improved target recognition of agricultural robots. **Industrial Robot**, v. 50, n. 5, p. 432–436, 2003. Citado na página 30.
- BECHAR, A.; NOF, S.; WACH, J. A review and framework of laser-based collaboration support. **Annual Reviews in Control**, v. 39, p. 30–45, 2015. Citado na página 32.
- BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. **Biosystems Engineering**, v. 149, p. 94–111, 2016. ISSN 1537-5110. Citado nas páginas 32 e 33.
- BEKTAS, T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. **OMEGA - The International Journal of Management Science**, v. 34, p. 209–219, 2006. Citado nas páginas 26 e 43.
- BELL, T. Automatic tractor guidance using carrier-phase differential {GPS}. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, n. 1-2, p. 53–66, 2000. Citado nas páginas 31 e 32.
- BENGOCHEA-GUEVARA, J.; CONESA-MUÑOZ, J.; ANDÚJAR, D.; RIBEIRO, A. Merge fuzzy visual servoing and gps-based planning to obtain a proper navigation behavior for a small crop-inspection robot. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 3, 2016. Citado na página 32.
- BOCHTIS, D.; SØRENSEN, C.; VOUGIOUKAS, S. Path planning for in-field navigation-aiding of service units. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 80–90, 2010. Citado nas páginas 32 e 33.
- BOTELHO, S.; ALAMI, R. M+: a scheme for multi-robot cooperation through negotiated task allocation and achievement. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 1999. v. 2, p. 1234–1239. Citado nas páginas 26, 36, 48 e 60.
- BRAUN, H. On solving travelling salesman problems by genetic algorithms. In: SCHWEFEL, H.-P.; MÄNNER, R. (Ed.). **Parallel Problem Solving from Nature**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. p. 129–133. ISBN 978-3-540-70652-6. Citado na página 63.
- BROWN, G. New mechanical harvesters for the florida citrus juice industry. **HortTechnology**, v. 15, n. 1, p. 69–72, 2005. Citado na página 32.

BRUMITT, B. L.; STENTZ, A. Grammps: A generalized mission planner for multiple mobile robots in unstructured environments. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 2, p. 1564–1571. Citado nas páginas 35, 36 e 45.

BULLET. **Real-Time Physics Simulation: BULLET Physics Library**. [S.l.], 2016. [Online] Disponível em: "<<http://bulletphysics.org/wordpress/>>". Citado na página 52.

BURKS, T.; VILLEGAS, F.; HANNAN, M.; FLOOD, S.; SIVARAMAN, B.; SUBRAMANIAN, V.; SIKES, J. Engineering and horticultural aspects of robotic fruit harvesting: Opportunities and constraints. **HortTechnology**, v. 15, n. 1, p. 79–87, 2005. Citado na página 31.

CANNING, J.; EDWARDS, D.; ANDERSON, M. Development of a fuzzy logic controller for autonomous forest path navigation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 47, n. 1, p. 301–310, 2004. Citado na página 30.

CERES, R.; PONS, J.; JIMÉNEZ, A.; MARTÍN, J.; CALDERÓN, L. Design and implementation of an aided fruit-harvesting robot (agribot). **Industrial Robot: An International Journal**, v. 25, n. 5, p. 337–346, 1998. Citado nas páginas 29 e 32.

CHEIKHROUHOU, O.; KOUBAA, A.; BENNACEUR, H. Move and improve: a distributed multi-robot coordination approach for multiple depots multiple travelling salesmen problem. In: **2014 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 28–35. Citado na página 26.

CHEN, B.; TOJO, S.; WATANABE, K. Machine vision based guidance system for automatic rice transplanters. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 19, n. 1, p. 91–97, 2003. Citado na página 32.

_____. Machine vision for a micro weeding robot in a paddy field. **Biosystems Engineering**, v. 85, n. 4, p. 393 – 404, 2003. ISSN 1537-5110. Citado na página 32.

CHEN, H.; SUN, D.; YANG, J.; CHEN, J. Localization for multirobot formations in indoor environment. In: **IEEE/ASME Trans. Mechatron**. [S.l.: s.n.], 2010. v. 15, p. 561–574. Citado na página 25.

CHEN, Z.; ZHANG, C.; LI, N.; SUN, Z.; LI, W.; ZHANG, B. Study review and analysis of high performance intra-row weeding robot. **Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 31, n. 5, p. 1–8, 2015. Citado na página 32.

CHIU, Y.-C.; YANG, P.; CHEN, S. Development of the end-effector of a picking robot for greenhouse-grown tomatoes. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 29, n. 6, p. 1001–1009, 2013. Citado na página 32.

CHOI, H.-L.; BRUNET, L.; HOW, J. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 25, n. 4, p. 912–926, 2009. Citado nas páginas 45 e 46.

CHOI, K. H.; HAN, S. K.; HAN, S. H.; PARK, K.-H.; KIM, K.-S.; KIM, S. Morphology-based guidance line extraction for an autonomous weeding robot in paddy fields. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 113, p. 266–274, 2015. Citado nas páginas 31 e 32.

CHOUDHURY, T.; KAUR, A.; VERMA, U. Agricultural aid to seed cultivation: An agri-bot. In: **Proceeding - IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2016**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 993–998. Citado na página 32.

CHVATAL, V. A greedy heuristic for the set-covering problem. **Mathematics of Operations Research**, v. 4, n. 3, p. 233–235, 1979. Citado na página 26.

COLTIN, B.; VELOSO, M. Mobile robot task allocation in hybrid wireless sensor networks. In: **IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2010 - Conference Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2932–2937. Citado nas páginas 45 e 49.

CONESA-MUÑOZ, J.; SOTO, M. Gonzalez-de; SANTOS, P. González de; RIBEIRO, A. Distributed multi-level supervision to effectively monitor the operations of a fleet of autonomous vehicles in agricultural tasks. **Sensors**, v. 15, n. 3, p. 5402–5428, 2015. Citado nas páginas 31 e 32.

CONTE, A. F.; CRISTOFARO, A.; MARTINELLI, A. Multi-robot systems, trends and development. In: YASUDA, T. (Ed.). [S.l.]: InTec h Open, 2011. p. 1–1. Citado na página 25.

CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 2nd. ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. Citado na página 74.

CUI, R.; GUO, J.; GAO, B. Game theory-based negotiation for multiple robots task allocation. **Robotica**, v. 21, p. 923–934, 2013b. Citado na página 36.

DAHL, T.; MATARIĆ, M.; SUKHATME, G. Multi-robot task allocation through vacancy chain scheduling. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 57, n. 6-7, p. 674–687, 2009. Citado nas páginas 45 e 46.

DART. **Georgia Tech Graphics Lab and Humanoid Robotics Lab.: DART (Dynamic Animation and Robotics Toolkit)**. [S.l.], 2016. [Online] Disponível em: "<<http://dartsim.github.io/>>". Citado na página 52.

DAVIDSON, J.; SILWAL, A.; HOHIMER, C.; KARKEE, M.; MO, C.; ZHANG, Q. Proof-of-concept of a robotic apple harvester. In: **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 2016-November, p. 634–639. Citado na página 32.

DIAS, M.; STENTZ, A. Opportunistic optimization for market-based multirobot control. In: **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 3, p. 2714–2720. Citado nas páginas 49 e 50.

DIAS, M. B. **Traderbots: A New Paradigm for Robust and Efficient Multirobot Coordination in Dynamic Environments**. Tese (Doutorado) — Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2004. AAI3126923. Citado nas páginas 36, 48, 49 e 50.

DIAS, M. B.; STENTZ, A. A free market architecture for distributed control of a multirobot system. In: **6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-6)**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 115–122. Citado nas páginas 48 e 49.

DIAS, M. B.; STENTZ, A. A comparative study between centralized, market-based, and behavioral multirobot coordination approaches. In: **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 3, p. 2279–2284. Citado na página 47.

- DIAS, M. B.; ZLOT, R.; KALRA, N.; STENTZ, A. Market-based multirobot coordination: A survey and analysis. **Proceedings of the IEEE**, v. 94, n. 7, p. 1257–1270, July 2006. Citado nas páginas 49 e 50.
- DIMEAS, F.; SAKO, D. V.; MOULIANITIS, V. C.; ASPRAGATHOS, N. A. Design and fuzzy control of a robotic gripper for efficient strawberry harvesting. **Robotica**, v. 33, n. 5, p. 1085–1098, 2015. Citado na página 32.
- DONG, F.; HEINEMANN, W.; KASPER, R. Development of a row guidance system for an autonomous robot for white asparagus harvesting. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 79, n. 2, p. 216–225, 2011. Citado na página 32.
- EDAN, Y.; MILES, G. Design of an agricultural robot for harvesting melons. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 36, n. 2, p. 593–603, 1993. Citado na página 32.
- EDAN, Y.; ROGOZIN, D.; FLASH, T.; MILES, G. E. Robotic melon harvesting. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 16, n. 6, p. 831–835, 2000. Citado na página 32.
- EIZICOVITS, D.; BERMAN, S. Efficient sensory-grounded grasp pose quality mapping for gripper design and online grasp planning. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 62, n. 8, p. 1208–1219, 2014. Citado na página 32.
- ELMOGY, A.; KHAMIS, A.; KARRAY, F. Market-based framework for mobile surveillance systems. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 7326 LNAI, p. 69–78, 2012. Citado na página 46.
- EMBRAPA. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 2014. [Online] Disponível em: "<<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1003690/1/Agriculturadeprecisao.pdf>>". Citado na página 23.
- _____. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. 2016. [Online] Disponível em: "<<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/citros/>>". Citado nas páginas 25 e 80.
- EMMI, L.; PAREDES-MADRID, L.; RIBEIRO, A.; PAJARES, G.; GONZALEZ-DE-SANTOS, P. Fleets of robots for precision agriculture: A simulation environment. **Industrial Robot**, v. 40, n. 1, p. 41–58, 2013. Citado na página 32.
- ESCOBAR, J.; LINFATI, R.; TOTH, P.; BALDOQUIN, M. A hybrid granular tabu search algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. **Journal of Heuristics**, v. 20, p. 483–509, 2014. Citado na página 35.
- EVERT, F. K. van; SAMSOM, J.; POLDER, G.; VIJN, M.; DOOREN, H.-J. van; LAMAKER, A.; HEIJDEN, G. W. A. M. van der; KEMPENAAR, C.; ZALM, T. van der; LOTZ, L. A. P. A robot to detect and control broad-leaved dock (*rumex obtusifolius* l.) in grassland. **J. Field Robot.**, v. 28, n. 2, p. 264–277, 2011. Citado na página 32.
- FAZLI, P.; DAVOODI, A.; MACKWORTH, A. Multi-robot repeated area coverage. **Autonomous robots**, v. 34, p. 251–276, 2013. Citado na página 36.
- FILHO, H. P. S.; BARBODA, F. F. L.; NASCIMENTO, A. S. d. **Greening a mais grave e destrutiva doença dos citros: nova ameaça à citricultura**. [S.l.], 2009. Citado na página 25.

- FOGLIA, M.; REINA, G. Agricultural robot for radicchio harvesting. **Journal of Field Robotics**, v. 23, n. 6-7, p. 363–377, 2006. Citado na página 32.
- FRACCAROLI, E. S.; INOUE, R. S.; FARIA, I. C. S.; ROMERO, R. A. F. Identificação dos parâmetros e simulação de um quadrotor contruído por meio de prototipação rápida. In: **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational And Applied Mathematics**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 4, n. 1, p. 685–691. Citado nas páginas 27, 74 e 87.
- FRACCAROLI, E. S.; ROMERO, R. A. F. Alocação de tarefas para coordenação de robôs heterogêneos para agricultura de precisão. In: **Simpósio Nacional de Instrumentação Agrícola**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 61–64. Citado na página 74.
- FRACCAROLI, E. S.; SILVA, M. O.; BATISTA, M. R.; MONTANARI, R.; ROMERO, R. A. F. Controlador fuzzy para impressora 3d de baixo custo. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL. **Recentes Avanços em Sistemas Fuzzy**. [S.l.], 2014. p. 364–375. ISBN: 978-85-8215-064-1. Citado na página 74.
- GALCERAN, E.; CARRERAS, M. A survey on coverage path planning for robotics. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 61, n. 12, p. 1258–1276, 2013. Citado na página 32.
- GAO, P.-A.; CAI, Z.-X.; YU, L.-L. Evolutionary computation approach to decentralized multi-robot task allocation. In: **5th International Conference on Natural Computation, ICNC 2009**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 5, p. 415–419. Citado na página 46.
- GARCÍA-PÉREZ, L.; GARCÍA-ALEGRE, M.; RIBEIRO, A.; GUINEA, D. An agent of behaviour architecture for unmanned control of a farming vehicle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 60, n. 1, p. 39–48, 2008. Citado na página 32.
- GERKEY, B.; MATARIĆ, M. Sold!: Auction methods for multirobot coordination. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 18, n. 5, p. 758–768, 2002. Citado nas páginas 47 e 48.
- GERKEY, B. P.; MATARIĆ, M. J. A framework for studying multi-robot task allocation. In: SCHULTZ, A. C.; PARKER, L. E.; SCHNEIDER, F. E. (Ed.). **Multi-Robot Systems: From Swarms to Intelligent Automata, Volume II**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2003. v. 2, p. 15–26. [Online] Disponível em: "<<https://www.willowgarage.com/sites/default/files/MRS2003-Frameworkforstudyingmulti-robottaskallocation.pdf>>". Citado na página 41.
- GERKEY, B. P.; MATARIĆ, M. J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. **The International Journal of Robotics Research**, v. 23, n. 9, p. 939–954, 2004. Citado nas páginas 26, 34, 41, 42 e 49.
- GHAFFARKHAH, A.; MOSTOFI, Y. Path planning for networked robotic surveillance. In: **IEEE Trans. Signal Process.** [S.l.: s.n.], 2012. v. 60, p. 3560–3575. Citado na página 25.
- GIMENEZ, J.; HERRERA, D.; TOSETTI, S.; CARELLI, R. Optimization methodology to fruit grove mapping in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 116, p. 88–100, 2015. Citado na página 32.
- GRIEPENTROG, H. W.; NØRREMARK, M.; NIELSEN, H.; BLACKMORE, B. S. Seed mapping of sugar beet. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 157–165, 2005. Citado na página 32.

- GUERRERO, J.; OLIVER, G. Multi-robot coalition formation in real-time scenarios. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 60, n. 10, p. 1295–1307, 2012. Citado na página 49.
- HAIBO, L.; SHULIANG, D.; ZUNMIN, L.; CHUIJIE, Y. Study and experiment on a wheat precision seeding robot. **Journal of Robotics**, v. 2015, 2015. Citado na página 32.
- HALACHMI, I.; ADAN, I.; WAL, J. V. D.; BEEK, P. V.; HEESTERBEEK, J. Designing the optimal robotic milking barn by applying a queuing network approach. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 2, p. 681–696, 2003. Citado na página 31.
- HAMEED, I.; COUR-HARBO, A. la; OSEN, O. Side-to-side 3d coverage path planning approach for agricultural robots to minimize skip/overlap areas between swaths. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 76, p. 36–45, 2016. Citado na página 32.
- HANNAN, M.; BURKS, T.; BULANON, D. A real-time machine vision algorithm for robotic citrus harvesting. In: **ASABE Annual International Meeting, Technical Papers**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 8, p. 11. Citado na página 32.
- HANSEN, B. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in jaren, norway. **Journal of Rural Studies**, v. 41, p. 109–117, 2015. Citado na página 31.
- HANSEN, K. D.; GARCIA-RUIZ, F.; KAZMI, W.; BISGAARD, M.; COUR-HARBO, A. la; RASMUSSEN, J.; ANDERSEN, H. J. An autonomous robotic system for mapping weeds in fields. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 10, p. 217–224, 2013. Citado na página 32.
- HARRELL, R.; ADSIT, P.; MUNILLA, R.; SLAUGHTER, D. Robotic picking of citrus. **Robotica**, v. 8, n. 4, p. 269–278, 1990. Citado na página 32.
- HAYASHI, S.; SHIGEMATSU, K.; YAMAMOTO, S.; KOBAYASHI, K.; KOHNO, Y.; KAMATA, J.; KURITA, M. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 2, p. 160–171, 2010. Citado na página 32.
- HENTEN, E. V.; BAC, C.; HEMMING, J.; EDAN, Y. Robotics in protected cultivation. In: **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 4, n. PART 1, p. 170–177. Citado na página 31.
- HIGUERA, J. C. G.; DUDEK, G. Fair subdivision of multi-robot tasks. In: **2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3014–3019. Citado nas páginas 45, 46 e 47.
- HIEMATH, S.; HEIJDEN, G. V. D.; EVERT, F. K. V.; STEIN, A. The role of textures to improve the detection accuracy of rumex obtusifolius in robotic systems. **Weed Research**, v. 52, n. 2, p. 430–440, 2012. Citado na página 32.
- HORLING, B.; LESSER, V. A survey of multi-agent organizational paradigms. **Knowledge Engineering Review**, v. 19, n. 4, p. 281–316, 2004. Citado nas páginas 45 e 46.
- HOU, Y.-F. The design and experiments of the intelligent shatang orange picking robot. **Gummi, Fasern, Kunststoffe**, v. 69, n. 13, p. 1128–1132, 2016. Citado na página 32.
- HU, J.; YAN, X.; MA, J.; QI, C.; FRANCIS, K.; MAO, H. Dimensional synthesis and kinematics simulation of a high-speed plug seedling transplanting robot. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 107, p. 64–72, 2014. Citado na página 32.

- HUANG, Y.; LEE, F. Classification of phalaenopsis plantlet parts and identification of suitable grasping point for automatic transplanting using machine vision. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 24, n. 1, p. 89–99, 2008. Citado na página 32.
- IEEERAS. **Agricultural Robotics and Automation**. 2017. [Online] Disponível em: "<<http://www.fieldrobot.com/ieeeras/>>". Citado na página 24.
- IIDA, M.; SUGURI, M.; UCHIDA, R.; ISHIBASHI, M.; KURITA, H.; WON-JAE, C.; MASUDA, R.; OHDOI, K. Advanced harvesting system by using a combine robot. In: **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 1, n. PART 1. Citado na página 30.
- IP, Y. L.; RAD, A. B. Incorporation of feature tracking into simultaneous localization and map building via sonar data. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 39, n. 2, p. 149–172, 2004. Citado na página 32.
- KARGAR, B.; SHIRZADIFAR, A. Automatic weed detection system and smart herbicide sprayer robot for corn fields. In: **Automatic weed detection system and smart herbicide sprayer robot for corn fields**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 468–473. Citado na página 32.
- KHAMIS, A.; HUSSEIN, A.; ELMOGY, A. Multi-robot task allocation: A review of the state-of-the-art. **Studies in Computational Intelligence**, Springer Science + Business Media, v. 604, p. 31–51, 2015. ISSN 1860-9503. Citado na página 45.
- KHAMIS, A. M.; ELMOGY, A. M.; KARRAY, F. O. Complex task allocation in mobile surveillance systems. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 64, n. 1, p. 33–55, 2011. Citado nas páginas 34, 42, 46 e 49.
- KHOT, L.; TANG, L.; BLACKMORE, S.; NØRREMARK, M. Navigational context recognition for an autonomous robot in a simulated tree plantation. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 5, p. 1579–1588, 2006. Citado na página 32.
- KIM, G. H.; KIM, S. C.; HONG, Y. K.; HAN, K. S.; LEE, S. G. A robot platform for unmanned weeding in a paddy field using sensor fusion. In: **IEEE International Conference on Automation Science and Engineering**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 904–907. Citado na página 32.
- KIM, J.; LEE, J. Soil identification and control-parameter estimation for optimal driving of wheeled robots on rough terrain. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 370, p. 127–145, 2015. Citado na página 32.
- KIVELEVITCH, E.; COHEN, K.; KUMAR, M. A market-based solution to the multiple traveling salesmen problem. **Journal of intelligent robot system**, 2013. Citado nas páginas 36 e 60.
- KOENIG, N.; HOWARD, A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In: **2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 2149–2154. Citado na página 52.
- KOLBACH, R.; KERRISK, K.; GARCIA, S.; DHAND, N. Effects of bail activation sequence and feed availability on cow traffic and milk harvesting capacity in a robotic rotary dairy. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 4, p. 2137–2146, 2013. Citado na página 31.
- KONDO, N.; MONTA, M.; FUJIURA, T. Fruit harvesting robots in japan. **Advances in Space Research**, v. 18, n. 1, p. 181–184, 1996. Citado na página 32.

KONDO, N.; YATA, K.; IIDA, M.; SHIIGI, T.; MONTA, M.; KURITA, M.; OMORI, H. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 3, n. 1, p. 20–24, 2010. Citado na página 32.

KORSAH, G. A.; STENTZ, A.; DIAS, M. B. A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation. **The International Journal of Robotics Research**, v. 32, n. 12, p. 1495–1512, 2013. Citado nas páginas 34, 35, 41, 42, 43 e 60.

KOUBAA, A.; CHEIKHROUHO, O.; BENNACEUR, H.; SRITI, M.-F.; JAVED, Y.; AMMAR, A. Move and improve: a market-based mechanism for the multiple depot multiple travelling salesmen problem. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 85, n. 2, p. 307–330, 2017. Citado nas páginas 26, 36 e 60.

KOUBAA, A.; TRIGUI, S.; CHAARI, I. Indoor surveillance application using wireless robots and sensor networks: coordination and path planning. In: **Mobile Ad Hoc Robots and Wireless Robotic Systems: Design and Implementation: Design and Implementation**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 19–57. Citado na página 34.

KUBOTA, C.; MCCLURE, M.; KOKALIS-BURELLE, N.; BAUSHER, M.; ROSSKOPF, E. Vegetable grafting: History, use, and current technology status in north america. **HortScience**, v. 43, n. 6, p. 1664–1669, 2008. Citado na página 32.

KULKARNI, A.; TAI, K. Probability collectives: a multiagent approach for solving combinatorial optimization problems. **Applied Soft Computing**, v. 10, n. 3, p. 759–771, 2010. Citado na página 36.

KUTZ, L.; MILES, G.; HAMMER, P.; KRUTZ, G. Robotic transplanting of bedding plants. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 30, n. 3, p. 586–590, 1987. Citado na página 32.

LAGOUDAKIS, M.; MARKAKIS, E.; KEMPE, D.; KESKINOCAK, P.; KLEYWEGT, A.; KOENIG, S.; TOVEY, C.; MEYERSON, A.; JAIN, S. Auction-based multi-robot routing. In: **Robotics: Science and Systems**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 343–350. Citado nas páginas 36, 44 e 45.

LAMM, R.; SLAUGHTER, D.; GILES, D. Precision weed control system for cotton. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 45, n. 1, p. 231–238, 2002. Citado na página 32.

LAURSEN, M.; JØRGENSEN, R.; MIDTIBY, H.; JENSEN, K.; CHRISTIANSEN, M.; GISELSSON, T.; MORTENSEN, A.; JENSEN, P. Dicotyledonweed quantification algorithm for selective herbicide application in maize crops. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 11, 2016. Citado na página 32.

LEE, D.-H.; HAN, J.-H.; KIM, J.-H. A preference-based task allocation framework for multi-robot coordination. In: **2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBOTICS 2011**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 2925–2930. Citado na página 49.

LEMAIRE, T.; ALAMI, R.; LACROIX, S. A distributed tasks allocation scheme in multi-uav context. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2004, n. 4, p. 3622–3627. Citado na página 45.

- LEPEJ, P.; RAKUN, J. Simultaneous localisation and mapping in a complex field environment. **Simultaneous localisation and mapping in a complex field environment**, v. 150, p. 160–169, 2016. Citado na página 32.
- LERMAN, K.; JONES, C.; GALSTYAN, A.; MATARIĆ, M. J. Analysis of dynamic task allocation in multi-robot systems. **The International Journal of Robotics Research**, v. 25, n. 3, p. 225–241, 2006. Citado na página 41.
- LI, G.; GU, K.; ZHAO, M. Method and experiment on automatic orientation of slice sampling for corn seed. **Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2016. Citado na página 32.
- LI, N.; REMEIKAS, C.; XU, Y.; JAYASURIYA, S.; EHSANI, R. Task assignment and trajectory planning algorithm for a class of cooperative agricultural robots. **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME**, v. 137, n. 5, 2015. Citado na página 32.
- LI, Z.; LI, P.; YANG, H.; WANG, Y. Stability tests of two-finger tomato grasping for harvesting robots. **Biosystems Engineering**, v. 116, n. 2, p. 163–170, 2013. Citado na página 32.
- LIANGXI, H.; CHEN, B.; JIANG, Q.; ZHU, D.; YANG, M.; QIAO, Y. Detection method of navigation route of corn harvester based on image processing. **Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 32, n. 22, p. 43–49, 2016. Citado na página 32.
- LIN, H.; YI, C.; LIU, Z. Experimental study on quadruped wheel robot for wheat precision seeding. **Key Engineering Materials**, v. 693, p. 1651–1657, 2016. Citado na página 32.
- LIU, C.; KROLL, A. A centralized multi-robot task allocation for industrial plant inspection by using a* and genetic algorithms. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**, v. 7268 LNAI, n. PART 2, p. 466–474, 2012. Citado na página 45.
- LIU, L.; CHEN, H.; CHU, S.; MEI, T.; NIU, R.; WANG, J. The method of coordinate recognition for maize straws under canopy by monocular vision. In: **Proceedings - 2016 the 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2016**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 304–307. Citado na página 32.
- LOPE, J.; MARAVALL, D.; QUIÑONEZ, Y. Response threshold models and stochastic learning automata for self-coordination of heterogeneous multi-task distribution in multi-robot systems. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 61, n. 7, p. 714–720, 2013. Citado na página 45.
- LU, J.; SANG, N. Detecting citrus fruits and occlusion recovery under natural illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 121–130, 2015. Citado na página 32.
- LUO, L.; CHAKRABORTY, N.; SYCARA, K. Distributed algorithm design for multi-robot task assignment with deadlines for tasks. In: **2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3007–3013. Citado na página 45.
- LUUKKONEN, T. **Modeling and control of quadcopter**. [S.l.], 2011. [Online] Disponível em: "<http://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/eluul1_public.pdf>". Citado nas páginas 69, 73 e 88.

MAO, H.; HAN, L.; HU, J.; KUMI, F. Development of a pincette-type pick-up device for automatic transplanting of greenhouse seedlings. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 30, n. 4, p. 547–556, 2014. Citado na página 32.

MEHTA, S.; BURKS, T. Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 102, p. 146–158, 2014. Citado na página 32.

MEHTA, S.; MACKUNIS, W.; BURKS, T. Robust visual servo control in the presence of fruit motion for robotic citrus harvesting. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 362–375, 2016. Citado na página 32.

MISES, R. v. Mechanik der festen körper im plastisch- deformablen zustand. **Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse**, v. 1913, p. 582–592, 1913. Citado nas páginas 124, 125 e 126.

MONTA, M.; KONDO, N.; TING, K. End-effectors for tomato harvesting robot. **Artificial Intelligence Review**, v. 12, n. 1, p. 11–25, 1998. Citado na página 32.

MONTANARI, R.; TOZADORE, D. C.; FRACCAROLI, E. S.; ROMERO, R. A. F. Ground vehicle detection and classification by an unmanned aerial vehicle. In: **2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 3rd Brazilian Symposium on Robotics (LARS-SBR)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 253–258. Citado nas páginas 27, 74 e 92.

_____. A visual attention approach for the tracking of vehicles through uav. In: **Proceedings of XI Workshop de Visão Computacional**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 412–417. Citado nas páginas 27, 74 e 92.

MORIMOTO, E.; SUGURI, M.; UMEDA, M. Vision-based navigation system for autonomous transportation vehicle. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 3, p. 239–254, 2005. Citado na página 32.

MOUSAZADEH, H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. **Journal of Terramechanics**, v. 50, n. 3, p. 211–232, 2013. Citado na página 32.

MUSCATO, G.; PRESTIFILIPPO, M.; ABBATE, N.; RIZZUTO, I. A prototype of an orange picking robot: past history, the new robot and experimental results. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 32, n. 2, p. 128–138, 2005. Citado na página 32.

NAGASAKA, Y.; KITAGAWA, H.; MIZUSHIMA, A.; NOGUCHI, N.; SAITO, H.; KOBAYASHI, K. Unmanned rice-transplanting operation using a gps-guided rice transplanter with long mat-type hydroponic seedlings. **Agriculture Engineering International: The CIGR Ejournal**, v. 9, 2007. Citado na página 32.

NAGASAKA, Y.; TANIWAKI, K.; OTANI, R.; SHIGETA, K. Automated rice transplanting operation using gps and fog sensors. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 35, n. 1, p. 25–29, 2001. Citado na página 32.

NAGASAKA, Y.; UMEDA, N.; KANETAI, Y.; TANIWAKI, K.; SASAKI, Y. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 43, n. 3, p. 223–234, 2004. Citado na página 30.

NAIK, N.; SHETE, V.; DANVE, S. Precision agriculture robot for seeding function. In: **Proceedings of the International Conference on Inventive Computation Technologies, ICICT 2016**. [S.l.: s.n.], 2017. v. 2. Citado na página 32.

NEVES, G. Z. F.; PEREIRA, D. N. B.; FRACCAROLI, E. S.; SANTOS, B. C.; SILVA, M. S. D.; HORTA, I. T. L. G.; SANCHES, R. G.; GALLARDO, N. P.; ALVES, E. D. L.; PERUSSI, R.; OLIVEIRA, M. J.; VECCHIA, F. A. S.; FELICIO, R. A. Avaliação termo higrométrica de sub-altitude utilizando balão cativo e quadrotor: Um ensaio experimental. In: **XIV Simpósio do Curso de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental: Desafios e Perspectivas na Gestão de Crises Ambientais**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 1, p. 96–106. Citado nas páginas 27, 74 e 92.

NOF, S. Y. **Springer Handbook of Automation**. 1st. ed. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2009. Citado na página 29.

NOGUCHI, N.; WILL, J.; REID, J.; ZHANG, Q. Development of a master-slave robot system for farm operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 1–19, 2004. Citado na página 30.

OGAWA, Y.; KONDO, N.; MONTA, M.; SHIBUSAWA, S. Field and service robotics: Recent advances in reserch and applications. In: YUTA, S.; ASAMA, H.; PRASSLER, E.; TSUBOUCHI, T.; THRUN, S. (Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. p. 539–548. Citado na página 32.

OGRE3D. **Object-Oriented Graphics Rendering Engine**. [S.l.], 2016. [Online] Disponível em: "<<http://www.ogre3d.org>>". Citado na página 52.

ONU. **Organização das Nações Unidas**. 2016. [Online] Disponível em: "<<https://nacoesunidas.org/fao-como-alimentar-a-crescente-populacao-global/>>". Citado na página 23.

OOSTER, A. van 't; BONTSEMA, J.; HENTEN, E. J. van; HEMMING, S. Sensitivity analysis of a stochastic discrete event simulation model of harvest operations in a static rose cultivation system. **Biosystems Engineering**, v. 116, n. 4, p. 457–469, 2013. Citado na página 32.

OZTURK, B.; KIRCI, M.; GUNES, E. Detection of green and orange color fruits in outdoor conditions for robotic applications. In: **2016 5th International Conference on Agro-Geoinformatics, Agro-Geoinformatics 2016**. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 32.

PATTEN, T.; FITCH, R.; SUKKARIEH, S. Multi-robot coverage planning with resource constraints for horticulture applications. **Acta Horticulturae**, v. 1130, p. 655–661, 2016. Citado na página 32.

PEREZ-RUIZ, M.; SLAUGHTER, D. C.; FATHALLAH, F. A.; GLIEVER, C. J.; MILLER, B. J. Co-robotic intra-row weed control system. **Biosystems Engineering**, v. 126, p. 45–55, 2014. Citado na página 32.

PIPPIN, C.; CHRISTENSEN, H.; WEISS, L. Performance based task assignment in multi-robot patrolling. In: **Proceedings of the 28th annual ACM symposium on applied computing**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 70–76. Citado na página 34.

PLAYER/STAGE. **The Player Project**. [S.l.], 2016. [Online] Disponível em: "<<http://playerstage.sourceforge.net/>>". Citado na página 52.

PURI, V.; NAYYAR, A.; RAJA, L. Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. **Journal of Statistics and Management Systems**, v. 20, n. 4, p. 507–518, 2017. Citado na página 24.

QIAO, J.; SASAO, A.; SHIBUSAWA, S.; KONDO, N.; MORIMOTO, E. Mapping yield and quality using the mobile fruit grading robot. **Biosystems Engineering**, v. 90, n. 2, p. 135–142, 2005. Citado na página 32.

QUIGLEY, M.; CONLEY, K.; GERKEY, B.; FAUST, J.; FOOTE, T. B.; LEIBS, J.; WHEELER, R.; NG, A. Y. Ros: an open-source robot operating system. In: **ICRA Workshop on Open Source Software**. [S.l.: s.n.], 2009. [Online] Disponível em: "<<http://www.willowgarage.com/sites/default/files/icraoss09-ROS.pdf>>". Citado na página 51.

RATH, T.; KAWOLLEK, M. Robotic harvesting of gerbera jamesonii based on detection and three-dimensional modeling of cut flower pedicels. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 66, n. 1, p. 85–92, 2009. Citado na página 32.

REDBOND, M. Robots - the future of agriculture. **International Pest Control**, v. 5, n. 6, p. 314–317, 2015. Citado na página 23.

ROBOTICS, E. **Acutronic Robotics**. 2017. [Online] Disponível em: "<<https://erlerobotics.com/>>". Citado nas páginas 55 e 56.

RUANGURAI, P.; EKPANYAPONG, M.; PRUETONG, C.; WATEWAI, T. Automated three-wheel rice seeding robot operating in dry paddy fields. **Maejo International Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 403–412, 2015. Citado na página 32.

RUBIN, S. H.; BOUABANA-TEBIBEL, T.; HOADJLI, Y.; GHALEM, Z. Reusing the np-hard traveling-salesman problem to demonstrate that $p \neq np$ (invited paper). In: **2016 IEEE 17th International Conference on Information Reuse and Integration (IRI)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 574–581. Citado na página 44.

RUCKELSHAUSEN, A.; KLOSE, R.; LINZ, A.; MARQUERING, J.; THIEL, M.; TÖLKE, S. Autonomous robots for weed control [autonome roboter zur unkrautbekaämpfung]. **Journal of Plant Diseases and Protection, Supplement**, n. 20, p. 173–180, 2006. Citado na página 32.

RYU, K.; KIM, G.; HAN, J. Ae—automation and emerging technologies. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 2, p. 141–146, 2001. Citado na página 32.

SABANCI, K.; AYDIN, C. Smart robotic weed control system for sugar beet. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 19, n. 1, p. 73–83, 2017. Citado na página 32.

SANKARAN, S.; MAJA, J. M.; BUCHANON, S.; EHSANI, R. Huanglongbing (citrus greening) detection using visible, near infrared and thermal imaging techniques. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 2117–2130, 2013. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/2/2117>>. Citado na página 25.

SANTOS, P. Gonzalez-de; RIBEIRO, A.; FERNANDEZ-QUINTANILLA, C.; LOPEZ-GRANADOS, F.; BRANDSTOETTER, M.; TOMIC, S.; PEDRAZZI, S.; PERUZZI, A.; PAJARES, G.; KAPLANIS, G.; PEREZ-RUIZ, M.; VALERO, C.; CERRO, J. D.; VIERI, M.; RABATEL, G.; DEBILDE, B. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. **Precision Agriculture**, p. 1–41, 2016. Citado na página 32.

- SAQUI, D.; SAITO, J. H.; CAMPOS, J. R.; JORGE, L. A. d. C. Approach based on fuzzy c-means for band selection in hyperspectral images. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 10, p. 795–801, 2016. Citado na página 24.
- SARIEL, S.; ERDOGAN, N.; BALCH, T. An integrated approach to solving the real-world multiple traveling robot problem. In: **5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering**. [S.l.: s.n.], 2007. [Online] Disponível em: "<http://web.itu.edu.tr/~sariel/publications/ELECO_Sariel_2007.pdf>". Citado nas páginas 26, 36 e 60.
- SARIN, S.; SHERALI, H.; BHOOTRA, A. New tighter polynomial length formulations for the asymmetric traveling salesman problem with and without precedence constraints. **Operations Research Letters**, v. 33, n. 1, p. 62–70, 2005. Citado na página 42.
- SCARFE, A.; FLEMMER, R.; BAKKER, H.; FLEMMER, C. Development of an autonomous kiwifruit picking robot. In: **ICARA 2009 - Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 380–384. Citado na página 32.
- SCHOR, N.; BECHAR, A.; IGNAT, T.; DOMBROVSKY, A.; ELAD, Y.; BERMAN, S. Robotic disease detection in greenhouses: Combined detection of powdery mildew and tomato spotted wilt virus. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 1, n. 1, p. 354–360, 2016. Citado na página 33.
- SE, S.; LOWE, D. G.; LITTLE, J. J. Vision-based global localization and mapping for mobile robots. **IEEE Transactions on Robotics**, v. 24, n. 3, p. 364–375, 2005. Citado na página 32.
- SEGUI-GASCO, P.; SHIN, H.-S.; TSOURDOS, A.; SEGUI, V. Decentralised submodular multi-robot task allocation. In: **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2829–2834. Citado na página 46.
- SHEHORY, O.; KRAUS, S. Methods for task allocation via agent coalition formation. **Artificial Intelligence**, v. 101, n. 1-2, p. 165–200, 1998. Citado na página 26.
- SHUELLER, J. K. **CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Information Technology**. [S.l.]: Automation and Control, 2006. VI. Pp. 184-195, Chap. 4. Citado nas páginas 29 e 31.
- SIMBODY. **Multibody Physics API**. [S.l.], 2016. [Online] Disponível em: "<<https://simtk.org/home/simbody/>>". Citado na página 52.
- SIVARAMAN, B.; BURKS, T. Geometric performance indices for analysis and synthesis of manipulators for robotic harvesting. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 5, p. 1589–1597, 2006. Citado na página 31.
- SLAUGHTER, D.; GILES, D.; DOWNEY, D. Autonomous robotic weed control systems: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 63–78, 2008. Citado na página 32.
- SMITH, R. Correction to the contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. **IEEE Transactions on Computers**, C-30, n. 5, p. 372, 1981. Citado na página 48.
- SMITH, R. L. **Open Dynamics Engine**. [S.l.], 2016. [Online] Disponível em: "<<http://www.ode.org/>>". Citado na página 52.

SOTO, M. Gonzalez-de; EMMI, L.; BENAVIDES, C.; GARCIA, I.; SANTOS, P. Gonzalez-de. Reducing air pollution with hybrid-powered robotic tractors for precision agriculture. **Biosystems Engineering**, v. 143, p. 79–94, 2016. Citado na página 29.

SOTO, M. Gonzalez-de; EMMI, L.; GARCIA, I.; SANTOS, P. Gonzalez-de. Reducing fuel consumption in weed and pest control using robotic tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 114, p. 96–113, 2015. Citado na página 29.

SOUSA, R. V. de; TABILE, R. A.; INAMASU, R. Y.; PORT, A. J. A row crop following behavior based on primitive fuzzy behaviors for navigation system of agricultural robots. **{IFAC} Proceedings Volumes**, v. 46, n. 18, p. 91–96, 2013. Citado na página 32.

STEINFELD, A. Interface lessons for fully and semi-autonomous mobile robots. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2004, n. 3, p. 2752–2757. Citado na página 30.

STRATEN, G. V. Field robot event, wageningen, 5–6 june 2003. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 42, n. 1, p. 51–58, 2004. Citado na página 31.

SUBIĆ, J.; JOVANOVIĆ, M.; DESPOTOVIĆ, Z.; JELOCNIK, M. Possibilities of applying robotic systems and smart sensor networks in integrated agricultural apple production. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 540, p. 269–281, 2017. Citado na página 32.

TAKAYA, K.; ASAI, T.; KROUMOV, V.; SMARANDACHE, F. Simulation environment for mobile robots testing using ros and gazebo. In: **2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 96–101. Citado na página 53.

TAMAKI, K.; NAGASAKA, Y.; KOBAYASHI, K. A rice transplanting robot contributing to credible food safety system. In: **Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 78–79. Citado na página 32.

TAMAKI, K.; NAGASAKA, Y.; NISHIWAKI, K.; SAITO, M.; KIKUCHI, Y.; MOTOBAYASHI, K. A robot system for paddy field farming in japan. **{IFAC} Proceedings Volumes**, v. 46, n. 18, p. 143–147, 2013. Citado na página 32.

TANG, F.; PARKER, L. E. A complete methodology for generating multi-robot task solutions using asymptre-d and market-based task allocation. In: **Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 3351–3358. Citado na página 41.

TANG, S.; ZHAO, D.; JIA, W.; CHEN, Y.; JI, W.; RUAN, C. Feature extraction and recognition based on machine vision application in lotus picking robot. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, 2016. Citado na página 32.

TANIGAKI, K.; FUJIURA, T.; AKASE, A.; IMAGAWA, J. Cherry-harvesting robot. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, n. 1, p. 65–72, 2008. Citado na página 32.

TERVO, K.; KOIVO, H. N. Adaptation of the human-machine interface to the human skill and dynamic characteristics. **{IFAC} Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, p. 3539–3544, 2014. Citado na página 32.

- THUILOT, B.; CARIOU, C.; MARTINET, P.; BERDUCAT, M. Automatic guidance of a farm tractor relying on a single cp-dgps. **Autonomous Robots**, v. 13, n. 1, p. 53–71, 2002. Citado nas páginas 31 e 32.
- TILLETT, N.; HAGUE, T.; GRUNDY, A.; DEDOUSIS, A. Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 2, p. 171–178, 2008. Citado na página 32.
- TORRES-SOSPEDRA, J.; NEBOT, P. Two-stage procedure based on smoothed ensembles of neural networks applied to weed detection in orange groves. **Biosystems Engineering**, v. 123, p. 40–55, 2014. Citado na página 32.
- TREMBLAY, N.; BOUROUBI, M.; PANNETON, B.; GUILLAUME, S.; VIGNEAULT, P.; BÉLEC, C. Development and validation of fuzzy logic inference to determine optimum rates of n for corn on the basis of field and crop features. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 621–635, 2010. Citado na página 29.
- TREMBLAY, N.; BOUROUBI, Y.; BÉLEC, C.; MULLEN, R.; KITCHEN, N.; THOMASON, W.; EBELHAR, S.; MENGEL, D.; RAUN, W.; FRANCIS, D.; VORIES, E.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Corn response to nitrogen is influenced by soil texture and weather. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 6, p. 1658–1671, 2012. Citado na página 29.
- TREMBLAY, N.; FALLON, E.; ZIADI, N. Sensing of crop nitrogen status: Opportunities, tools, limitations, and supporting information requirements. **HortTechnology**, v. 21, n. 3, p. 274–281, 2011. Citado na página 29.
- TRIGUI, S.; CHEIKHROUHO, O.; KOUBAA, A.; BAROUDI, U.; YOUSSEF, H. Fl-mtsp: a fuzzy logic approach to solve the multi-objective multiple traveling salesman problem for multi-robot systems. **Soft Computing**, v. 21, n. 24, p. 7351–7362, 2017. Citado na página 26.
- TRIGUI, S.; KOUBAA, A.; JAMAA, M. B.; CHAARI, I.; AL-SHALFAN, K. Coordination in a multi-robot surveillance application using wireless sensor networks. In: **16th IEEE mediterranean electrotechnical conference (MELECON)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 989–992. Citado na página 34.
- TROYER, T.; PITLA, S.; NUTTER, E. Inter-row robot navigation using 1d ranging sensors. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 16, p. 463–468, 2016. Citado na página 32.
- UNDERWOOD, J. P.; JAGBRANT, G.; NIETO, J. I.; SUKKARIEH, S. Lidar-based tree recognition and platform localization in orchards. **J. Field Robot.**, v. 32, n. 8, p. 1056–1074, 2015. Citado na página 32.
- VIDAL, T.; CRAINIC, T.; GENDREAU, M.; LAHRICHI, N.; REI, W. A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems. **Operations Research**, v. 60, p. 611–624, 2012. Citado na página 35.
- VIGURIA, A.; MAZA, I.; OLLERO, A. Set: An algorithm for distributed multirobot task allocation with dynamic negotiation based on task subsets. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 3339–3344. Citado na página 45.
- _____. S+t: An algorithm for distributed multirobot task allocation based on services for improving robot cooperation. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 3163–3168. Citado na página 45.

WANG, C.; TANG, Y.; ZOU, X.; SITU, W.; FENG, W. A robust fruit image segmentation algorithm against varying illumination for vision system of fruit harvesting robot. **Optik**, v. 131, p. 626–631, 2017. Citado na página 32.

WANG, Y.; TIAN, D.; LI, Y. An improved simulated annealing algorithm for travelling salesman problem. **International Journal of Online Engineering**, v. 9, n. 4, p. 28–32, 2013. Citado na página 63.

WIKIROS. **Wiki.ROS.Org**. 2016. [Online] Disponível em: "<<http://wiki.ros.org/Robots>>". Citado nas páginas 51, 52 e 57.

WILSON, J. Guidance of agricultural vehicles — a historical perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, n. 1-2, p. 3–9, 2000. Citado nas páginas 31 e 32.

XIA, C.; WANG, L.; CHUNG, B.-K.; LEE, J.-M. In situ 3d segmentation of individual plant leaves using a rgb-d camera for agricultural automation. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 8, p. 20463–20479, 2015. Citado na página 30.

XIANG, R.; JIANG, H.; YING, Y. Recognition of clustered tomatoes based on binocular stereo vision. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 106, p. 75–90, 2014. Citado na página 31.

XU, Z.; WEN, Q. Approximation hardness of min-max tree covers. **Operations Research Letters**, v. 38, n. 3, p. 169–173, 2010. Citado na página 42.

YAN, Z.; JOUANDEAU, N.; CHERIF, A. A. A survey and analysis of multi-robot coordination. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, InTech, v. 10, n. 12, p. 399, 2013. ISSN 1729-8806. Citado na página 48.

YOON, B.; KIM, S. Design of paddy weeding robot. In: **44th International Symposium on Robotics**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–2. Citado na página 32.

YOU, K.; BURKS, T. Development of a robotic fruit picking end effector and an adaptable controller. In: **2016 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, ASABE 2016**. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 32.

ZERMAS, D.; TENG, D.; STANITSAS, P.; BAZAKOS, M.; KAISER, D.; MORELLAS, V.; MULLA, D.; PAPANIKOLOPOULOS, N. Automation solutions for the evaluation of plant health in corn fields. In: **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 2015-December, p. 6521–6527. Citado na página 32.

ZHANG, C.; NOGUCHI, N.; YANG, L. Leader–follower system using two robot tractors to improve work efficiency. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 269–281, 2016. Citado na página 32.

ZHANG, Q. Opportunity of robotics in specialty crop production. In: **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 1, n. PART 1. Citado na página 29.

ZHANG, Z.; NOGUCHI, N.; ISHII, K.; YANG, L.; ZHANG, C. Development of a robot combine harvester for wheat and paddy harvesting. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 4, p. 45–48, 2013. Citado nas páginas 30 e 32.

ZHAO, D.; JIDONG, L.; WEI, J.; YING, Z.; YU, C. Design and control of an apple harvesting robot. **Biosystems Engineering**, v. 110, p. 112–122, 2011. Citado na página 32.

ZHAO, S.; ZHANG, Z. A new recognition of crop row based on its structural parameter model. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 16, p. 431–438, 2016. Citado na página [32](#).

ZHAO, Y.; GONG, L.; HUANG, Y.; LIU, C. Robust tomato recognition for robotic harvesting using feature images fusion. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 2, p. 173, 2016. Citado na página [31](#).

ZHENG, X.; JAIN, S.; KOENIG, S.; KEMPE, D. Multirobot forest coverage. In: **2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 3852–3857. Citado na página [36](#).

ZLOT, R.; STENTZ, A.; DIAS, M.; THAYER, S. Multi-robot exploration controlled by a market economy. In: **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 3, p. 3016–3023. Citado na página [50](#).

ZLOT, R. M. **An Auction-Based Approach to Complex Task Allocation for Multirobot Teams**. Tese (Doutorado) — Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, December 2006. Citado nas páginas [49](#) e [50](#).

ZU, L.-N.; TIAN, Y.-T.; MEI, H. Distributed autonomous cooperation system for the large-scale cooperation task of multiple mobile robots. **Jiqiren/Robot**, v. 28, n. 5, p. 470–477, 2006. Citado na página [49](#).

PROJETO DO QUADRIROTOR

O Apêndice A contém todas as informações necessárias sobre o projeto e desenvolvimento do quadrirotor (Figura 23).

Para esse projeto foi adquirido um controlador de voo (NAZA-M V2), que dispõe de uma plataforma leve de controle multi-eixo com uma IMU, de um módulo independente de controle de comunicação, de um módulo de georeferenciamento (GPS + bússola) e um módulo de LED.

O conjunto de propulsão é composto por: uma bateria LiPo 3S com capacidade de armazenamento de $4200mAh$; quatro módulos responsáveis pelo controle eletrônico de velocidade (ESC), cada um com a corrente máxima de operação de 30A; quatro motores *brushless* de 750kv de potência; duas hélices 10x4 que giram no sentido horário e duas hélices 10x4 que giram no sentido anti-horário.

O chassi do quadrirotor possui quatro tubos quadrados em alumínio com parede de 0.5mm (hastes) e o restante são peças prototipadas. Dentre as peças impressas o chassi é a peça principal onde as quatro hastes são fixadas. O suporte do motor foi desenhado para ser vestido na haste, propiciando assim nenhuma folga e melhor fixação. O protetor de hélice foi desenhado para ser inserido sem folga dentro da haste e aparafusado. O trem de pouso foi desenhado para deixar um vão livre entre o chão e o corpo do quadrirotor. A caixa de proteção da eletrônica foi desenhada para encapsular o módulo NAZA V2 deixando seus conectores livres para conexão dos cabos de alimentação elétrica e cabos de dados. O suporte da câmera foi desenvolvido para fixar a câmera ao corpo do quadrirotor.

Figura 23 – Modelo 3D e vista explodida do quadrirotor.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.1 Projeto das Peças Estruturais

As peças estruturais foram projetadas com auxílio de uma ferramenta CAD, com isso foi possível realizar diversos testes e montagens, ao total foram quatro versões até chegar na versão atual. As primeiras versões tinham defeitos com relação a peso, centro de massa e fratura das peças impressas, principalmente o trem de pouso.

Em seguida são apresentados os desenhos técnicos 2D das peças projetadas. Cada desenho técnico contém: descrição do tipo de plástico; peso total da peça (considerando a peça maciça); vista isométrica da peça renderizada; vista isométrica das linhas ocultas; vista isométrica, lateral, superior e inferior e as cotas em *mm*.

Figura 24 – Desenho técnico com as cotas do protetor de hélice do quadrirotor.

Figura 25 – Desenho técnico com as cotas do trem de pouso do quadrirotor.

Figura 27 – Desenho técnico com as cotas do chassi principal do quadrirotor.

Figura 28 – Desenho técnico com as cotas da caixa de proteção dos componentes eletrônicos.

Figura 29 – Desenho técnico com as cotas do suporte da câmera GoPro.

Na Figura 30 é apresentada a única peça estrutural do quadrirotor prototipada na impressora 3D.

Figura 30 – Desenho técnico com as cotas da haste quadrada de alumínio.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A.2 Análise Estática

Foram realizados estudos com o auxílio de um *software* CAD, que utiliza o critério de [Mises \(1913\)](#) para identificar a tensão máxima como a resposta da carga aplicada. O fator de segurança é exibido um valor mínimo, resultante da divisão da tensão de ruptura do material analisado pela tensão máxima de Von Mises. Cada material possui uma tensão de ruptura tabelada, o polímero utilizado é o ABS, que possui tensão máxima de ruptura de 40 MPa. Dentre as propriedades que o ABS possui, as principais são: fluidez, resistência térmica e resistência ao impacto.

Nas peças desenhadas foram aplicados pontos de fixação e forças lineares simulando as condições reais de uso da peça. Segue os resultados das análises realizadas pelo *software* CAD.

Figura 31 – Análise estática do protetor de hélice.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 32 – Análise estática do trem de pouso.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – Análise estática do suporte do motor.

(a) Análise de Mises (1913).

(b) Escala de movimentação da peça de acordo com a direção da força aplicada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Análise estática do chassi principal.

(a) Análise de Mises (1913).

(b) Escala de movimentação da peça de acordo com a direção da força aplicada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 35 – Análise estática da caixa de proteção dos componentes eletrônicos.

(a) Análise de Mises (1913).

(b) Escala de movimentação da peça de acordo com a direção da força aplicada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

(a) Análise de Mises (1913).

(b) Escala de movimentação da peça de acordo com a direção da força aplicada.

Fonte: Elaborada pelo autor.