

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**RODRIGO MARCON SANCHES**

**Desenvolvimento de um sistema de planejamento de trajetória  
para veículos autônomos agrícolas**

**São Carlos  
2012**



**RODRIGO MARCON SANCHES**

**Desenvolvimento de um sistema de planejamento de trajetória  
para veículos autônomos agrícolas**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Dinâmica de Máquinas e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães

**São Carlos  
2012**

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA  
VERSÃO CORRIGIDA. A VERSÃO  
ORIGINAL ENCONTRA-SE  
DISPONÍVEL JUNTO AO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA DA EESC-SP.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S211d Sanches, Rodrigo Marcon  
Desenvolvimento de um sistema de planejamento de  
trajetória para veículos autônomos agrícolas. / Rodrigo  
Marcon Sanches ; orientador Daniel Varela Magalhães. --  
São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica  
de Máquinas e Sistemas)-- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Robótica móvel. 2. Planejamento de trajetória. 3.  
Veículos agrícolas autônomos. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO MARCON SANCHES**.

Título da dissertação: "Desenvolvimento de um sistema de planejamento de trajetória para veículos autônomos agrícolas".

Data da defesa: 18/10/2012

### Comissão Julgadora:

### Resultado:

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Marcelo Becker**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Roseli Aparecida Francelin Romero**  
(Instituto de Matemática e Computação/USP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:  
Prof. Associado **Marcelo Areias Trindade**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**



## **DEDICATÓRIA**

À minha esposa *Ligiane* e aos meus pais *Luiz Antonio* e *Maria Célia*, por serem fundamentais à minha vida.



## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me propiciado sabedoria, saúde e dedicação necessárias para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo Becker e ao Prof. Dr. Daniel Varela Magalhães, pela atenção e ajuda despendidas durante o processo de definição e orientação.

À Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Máquinas Agrícolas Jacto S/A e à FINEP, pelo apoio ao desenvolvimento deste projeto.

Ao colega Nelson Félix de Lima Júnior e ao colega de trabalho Marcelo Moreira Tiago, pela ajuda valorosa na análise dos dados de mapeamento, parte fundamental para realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho Edson Lúcio Domingues, Marcos Ikeguchi Ohira, Evandro Sérgio Marconato e Rodolfo Castanho Fernandes, pela colaboração no desenvolvimento e contribuição oportuna nas discussões referentes à análise dos dados e resultados deste trabalho.

À minha família, pela paciência, dedicação e incentivo nos momentos mais difíceis.



## RESUMO

SANCHES, R. M. **Desenvolvimento de um sistema de planejamento de trajetória para veículos autônomos agrícolas.** 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de navegação global para que veículos agrícolas autônomos possam executar missões em campos de cultivo através de um sistema de planejamento de trajetórias. Missões podem ser entendidas como sendo tarefas (p.ex.: de monitoramento, coleta de amostras, etc.) através de pequenas rotas que os veículos devem seguir ao longo de seus trabalhos diários, percorrendo a menor distância possível entre os pontos de origem e destino. O planejamento de trajetória foi dividido em etapas para facilitar o entendimento de cada uma delas. O mapeamento apresentado neste trabalho foi feito em regiões de cultivo de café nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Os pontos do mapa foram amostrados utilizando um módulo receptor de sinal GPS (*Global Positioning System*) ao longo dos caminhos onde é possível a passagem do veículo dentro da plantação. Uma etapa importante para o sucesso deste sistema é a etapa de pré-processamento dos dados. Nesta etapa são inseridas as relações entre os pontos do mapeamento da área. As missões foram pré-definidas de modo a testar o cálculo do caminho de custo mínimo que é realizado através do algoritmo de Dijkstra. A cada ponto da rota é fornecido o ângulo de direção com o qual o veículo deve estar em relação ao Norte geográfico. De acordo com a mudança pretendida do ângulo de direção é proposta uma suavização nesta mudança através da alteração do percurso para um arco de circunferência. Neste caso, o raio de giro é informado. A última etapa consiste em fornecer a velocidade máxima de deslocamento do veículo em função da mudança de direção e velocidade angular máxima do centro de massa do veículo. O sistema proposto neste trabalho foi capaz de determinar o caminho com a menor distância entre dois pontos do mapeamento (coordenadas geográficas) e o calcular da distância entre os pontos. Embora a fórmula utilizada para calcular a distância entre duas coordenadas geográficas considerar o formato da Terra como sendo uma esfera, isto não gerou erro significativo para a aplicação proposta. A suavização proposta possibilitou, em alguns pontos, o aumento da velocidade de deslocamento por fazer a mudança do ângulo de direção de forma menos abrupta.

**Palavras-chave:** Robótica móvel. Planejamento de trajetória. Veículos agrícolas autônomos.



## ABSTRACT

SANCHES, R. M. **Development of a path planning system for autonomous agricultural vehicles.** 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

The objective of this work is to develop a global navigation system for autonomous agricultural vehicles can perform missions in crop fields through a system of path planning. Missions can be understood as tasks (eg monitoring, sampling, etc.). Through small routes that vehicles must follow throughout their daily jobs, traveling the shortest possible distance between the points of origin and destination. The path planning was divided into steps to make it easy to understand each one. The mapping presented in this work was done in coffee-growing regions in the state of São Paulo and Minas Gerais. The map points have been sampled using a GPS receiver module along the path where it is possible to move the vehicle within the plantation. An important step for the success of this system is the data pre-processing step. In this step are inserted the relations between the points of the mapping. The missions are predefined in order to test if the calculation of the minimum cost path made by Dijkstra algorithm is correct. At each point of the route is given the vehicle heading angle (vehicle position towards the geographic North). According to the intended change of the heading angle is proposed a smoothing method to smooth this change by changing the route to an arc. In this case, the turning radius is reported. The last step is to provide the maximum speed of the vehicle due to the change of direction and maximum angular speed of the center of mass. The system proposed in this paper was able to determine the path with the shortest distance between two points of the mapping (geographic coordinates) and calculate the distance between these points. Although the formula used to calculate the distance between two geographical coordinates consider the shape of the Earth as a sphere, this did not generate significant errors for the proposed application. The proposed smoothing allowed, in some cases, to increase the vehicle speed by making the change of heading angle less abrupt.

**Keywords:** Mobile robotics. Path planning. Autonomous agricultural vehicles.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Falhas resultantes da aplicação de herbicida.....	30
Figura 2 - Vários trajetos de máquinas.....	30
Figura 3 - Ciclo da agricultura de precisão (INAMASU <i>et al.</i> , 2011).....	38
Figura 4 - Ciclo da agricultura de precisão (Adaptado de SUDDUTH, 1999).....	38
Figura 5 - Mapa de produtividade (LOUP ELECTRONICS, 2012).....	43
Figura 6 - Sensor de umidade para utilização em máquinas agrícolas (LOUP ELECTRONICS, 2012).....	44
Figura 7 - Sensor ótico para utilização em máquinas agrícolas (LOUP ELECTRONICS, 2012).....	45
Figura 8 - Controlador para criação de mapas de produtividade (AG LEADER, 2012).....	46
Figura 9 - Robô humanoide Asimo. ....	48
Figura 10 - Robô quadrúpede BigDog. ....	49
Figura 11 - Robôs autônomos para exploração de Marte.....	50
Figura 12 - Robô agrícola AgriBOT (TABILE, 2012). ....	50
Figura 13 - Inicialização do algoritmo.....	55
Figura 14 - Nó <i>a</i> visitado. ....	56
Figura 15 - Nó <i>d</i> visitado. ....	57
Figura 16 - Nó <i>e</i> visitado. ....	57
Figura 17 - Nó <i>b</i> visitado.....	58
Figura 18 - Nó <i>c</i> visitado. ....	59
Figura 19 - Caminho de custo mínimo de <i>a</i> até <i>c</i> . ....	59
Figura 20 - Robô agrícola AgriBOT (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).....	60
Figura 21 - Colhedora K3 MILLENNIUM.....	65
Figura 22 - Área mapeada. ....	66
Figura 23 - Relacionamento entre os pontos da área mapeada. ....	68
Figura 24 - Triângulo esférico. ....	69
Figura 25 - Arco de comprimento <i>a</i> .....	70
Figura 26 - Pontos de interesse P1, P2 e P3. ....	72
Figura 27 - Missão 1 - P1 → P2. ....	73
Figura 28 - Missão 2 – P2 → P3. ....	73
Figura 29 - Padronização do ângulo de direção. ....	74

Figura 30 - Ângulos de direção.....	75
Figura 31 - Condições de deslocamento do ICR (TABILE, 2012). .....	76
Figura 32 - Suavização de curvas. ....	77
Figura 33 - Exemplo de aplicação da suavização de curvas.....	77
Figura 34 - Condições insuficientes para a suavização de curvas.....	79
Figura 35 - Área mapeada na região de Pompéia, SP.....	81
Figura 36 - Caminhos percorridos para mapeamento na região de Pompéia, SP.....	82
Figura 37 - Caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Pompéia, SP.....	82
Figura 38 - Rota calculada para a missão 1 (linha azul) – P1 → P2.....	83
Figura 39 - Dados da missão 1 – P1 → P2.....	84
Figura 40 - Rota calculada para a missão 2 (linha azul) – P3 → P4.....	85
Figura 41 - Dados da missão 2 – P3 → P4.....	86
Figura 42 - Rota calculada para a missão 3 (linha azul) – P5 → P6.....	87
Figura 43 - Dados da missão 2 – P5 → P6.....	88
Figura 44 - Área mapeada na região de Garça, SP.....	88
Figura 45 - Caminhos percorridos para mapeamento na região de Garça, SP.....	89
Figura 46 - Detalhe dos caminhos percorridos para mapeamento na região de Garça, SP.....	89
Figura 47 - Caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Garça, SP.....	90
Figura 48 - Detalhe dos caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Garça, SP. ....	90
Figura 49 - Rota calculada para a missão 1 (linha azul) – P1 → P2.....	91
Figura 50 - Dados da missão 1 – P1 → P2.....	92
Figura 51 - Rota calculada para a missão 2 (linha azul) – P3 → P4.....	93
Figura 52 - Dados da missão 2 – P3 → P4.....	94
Figura 53 - Área mapeada na região de Varjão de Minas, MG.....	95
Figura 54 - Caminhos percorridos para mapeamento na região de Varjão de Minas, MG. (Fonte: Google Earth, 2012).....	95
Figura 55 - Detalhe dos caminhos percorridos para mapeamento na região de Varjão de Minas, MG. (Fonte: Google Earth, 2012).....	96
Figura 56 - Caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Varjão de Minas, MG.....	96

Figura 57 - Detalhe dos caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Varjão de Minas, MG. ....	97
Figura 58 - Rota calculada para a missão 1 (linha azul) – P1 → P2. ....	98
Figura 59 - Dados da missão 1 – P1 → P2. ....	98
Figura 60 - Rota calculada para a missão 2 (linha azul) – P3 → P4. ....	99
Figura 61 - Dados da missão 2 – P3 → P4. ....	100
Figura 62 - Rota calculada para a missão 3 (linha azul) – P5 → P6. ....	101
Figura 63 - Detalhe da rota calculada para a missão 3 (linha azul) – P5 → P6. ....	101
Figura 64 - Dados da missão 3 – P5 → P6. ....	102



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados calculados na etapa 1. ....	56
Tabela 2 - Dados calculados na etapa 2. ....	56
Tabela 3 - Dados calculados na etapa 3. ....	57
Tabela 4 - Dados calculados na etapa 4. ....	58
Tabela 5 - Dados calculados na etapa 5. ....	58
Tabela 6 - Dados calculados na etapa 6. ....	59
Tabela 7 - Exemplo de pontos da sentença RMC e pontos processados.....	67
Tabela 8 - Pontos de origem e destinos para o caso 1, missão 1.....	83
Tabela 9 - Pontos de origem e destinos para o caso 1, missão 2.....	85
Tabela 10 - Pontos de origem e destinos para o caso 1, missão 3.....	86
Tabela 11 - Pontos de origem e destinos para o caso 2, missão 1.....	91
Tabela 12 - Pontos de origem e destinos para o caso 2, missão 2.....	92
Tabela 13 - Pontos de origem e destinos para o caso 3, missão 1.....	97
Tabela 14 - Pontos de origem e destinos para o caso 3, missão 2.....	99
Tabela 15 - Pontos de origem e destinos para o caso 3, missão 3.....	101



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BFS - *Breadth-first search*

DFS - *Depth-first search*

DGPS - *Differential Global Positioning System*

FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

FINEP - *Financiadora de Estudos e Projetos*

GIS - *Geographic Information System*

GPS - *Global Positioning System*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NMEA - *National Marine Electronics Association*

RMC - *Recommended minimum specific GPS/Transit data*

SOLAW - *The State of the World's Land and Water*

UNFPA - *United Nations Population Fund*

VRT - *Variable Rate Technology*



## LISTA DE SÍMBOLOS

E - Leste (*East*)

N - Norte (*North*)

S - Sul (*South*)

W - Oeste (*West*)

d - distância entre pontos na superfície da esfera

r - raio da esfera

$\phi_A$  - latitude do ponto A

$\psi_A$  - longitude do ponto A

$P_A$  - ponto de interesse A

$\delta_A$  - ângulo de direção no ponto A

$\vec{v}$  - vetor definido por um par ordenado (x, y)

$\vec{N}$  - vetor na direção do norte geográfico

$\vec{v}_A \bullet \vec{v}_B$  - produto escalar entre os vetores  $\vec{v}_A$  e  $\vec{v}_B$

$\|\vec{v}\|$  - norma do vetor

$\vec{v}_A \times \vec{v}_B$  - produto vetorial entre os vetores  $\vec{v}_A$  e  $\vec{v}_B$

$\vec{z}$  - vetor perpendicular ao plano xy

$TR$  - raio de giro (*turning radius*)

$TR_A$  - raio de giro no ponto A

$ICR$  - centro instantâneo de rotação (*instantaneous center of rotation*)

$ICR_A$  - centro instantâneo de rotação no ponto A

$\beta$  - deslocamento angular do centro instantâneo de rotação

$\theta_{AB}$  - ângulo entre os vetores  $\vec{v}_A$  e  $\vec{v}_B$

$\alpha$  - ângulo central do arco de circunferência



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1. Motivação .....	25
1.1.1. Aumento da produção através do aumento da área cultivada .....	25
1.1.2. Aumento da produção através do uso eficiente das terras .....	26
1.1.3. Agricultura de precisão.....	27
1.1.4. Sistemas de navegação de veículos agrícolas .....	28
1.1.5. Robôs e agricultura.....	31
1.2. O foco desta dissertação.....	33
1.3. A divisão do trabalho.....	34
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>35</b>
2.1. Agricultura de precisão .....	35
2.1.1. Ferramentas da agricultura de precisão.....	39
2.2. Robôs móveis.....	46
2.2.1. Locomoção.....	47
2.2.2. Locomoção por pernas .....	48
2.2.3. Locomoção por rodas .....	49
2.2.4. Locomoção por esteiras .....	50
2.2.5. Localização e navegação.....	51
2.2.6. Planejamento de rota .....	52
2.2.7. Busca em grafos.....	52
2.2.7.1. Busca em largura .....	53
2.2.7.2. Busca em profundidade.....	54
2.2.7.3. Algoritmo de Dijkstra.....	54
<b>3. AgriBOT .....</b>	<b>60</b>
3.1. Plataforma robótica base.....	61
3.2. Módulos complementares.....	61
3.2.1. Localização e navegação.....	61
3.2.2. Visão computacional .....	62
3.2.3. Comunicação sem fio .....	62
3.2.4. Sensoriamento de parâmetros agrícolas.....	62
3.2.5. Braço robótico .....	63
3.2.6. Plataforma estabilizada .....	63
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO NAVEGADOR GLOBAL .....</b>	<b>64</b>
4.1. Etapa 1 - Mapeamento da área de interesse.....	64
4.2. Etapa 2 - Análise e processamento dos dados.....	67
4.3. Etapa 3 - Relacionamento entre os pontos do mapeamento.....	67
4.4. Etapa 4 - Definição das missões e cálculo do caminho de custo mínimo .....	72
4.5. Etapa 5 - Cálculo do ângulo de direção ou <i>heading</i> .....	74
4.6. Etapa 6 - Cálculo ponto a ponto do raio de giro.....	76
4.7. Etapa 7 - Cálculo da velocidade máxima de deslocamento .....	79
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
5.1. Caso 1 – Região de Pompéia, SP .....	81
5.1.1. Missão 1 - Pompéia .....	83

5.1.2. Missão 2 - Pompéia .....	84
5.1.3. Missão 3 - Pompéia .....	86
5.2. Caso 2 – Região de Garça, SP .....	88
5.2.1. Missão 1 - Garça .....	91
5.2.2. Missão 2 - Garça .....	92
5.3. Caso 3 – Região de Varjão de Minas, MG .....	94
5.3.1. Missão 1 – Varjão de Minas .....	97
5.3.2. Missão 2 – Varjão de Minas .....	99
5.3.3. Missão 3 – Varjão de Minas .....	100
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
<b>Apêndice A – Dados calculados.....</b>	<b>109</b>
A1. Caso 1 – missão 1 .....	109
A2. Caso 1 – missão 2 .....	109
A3. Caso 1 – missão 3 .....	110
A4. Caso 2 – missão 1 .....	111
A5. Caso 2 – missão 2 .....	111
A6. Caso 3 – missão 1 .....	112
A7. Caso 3 – missão 2 .....	112
A8. Caso 3 – missão 3 .....	112
<b>Apêndice B – Algoritmos desenvolvidos no MATLAB.....</b>	<b>114</b>
B1. Algoritmo para separação da sentença NMEA RMC e conversão de unidades dos dados contidos nos arquivos de mapeamento .....	114
B2. Algoritmo que implementa a fórmula de <i>Haversine</i> para calcular a distância entre duas coordenadas geográficas .....	115
B3. Algoritmo para adicionar relacionamento entre dois pontos .....	115
B4. Algoritmo para adicionar relacionamento a um conjunto de pontos consecutivos .....	115
B5. Algoritmo que implementa o algoritmo de Dijkstra para calcular o caminho ótimo entre dois pontos .....	115
B6. Algoritmo recupera a rota calculada pelo algoritmo de Dijkstra .....	117
B7. Algoritmo para calcular o ângulo entre dois vetores e indicar se o ângulo é positivo ou negativo .....	117
B8. Algoritmo para calcular o ângulo de direção, o raio de giro e a velocidade de deslocamento.....	118
B9. Algoritmo que agrupa todos os algoritmos e gera os gráficos do caso 1.....	120
B10. Algoritmo que agrupa todos os algoritmos e gera os gráficos do caso 2 .....	124
B11. Algoritmo que agrupa todos os algoritmos e gera os gráficos do caso 3 .....	126

## Capítulo 1

# 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

Em outubro de 2011, a população mundial atingiu 7 bilhões de habitantes e estima-se que cresça mais 1 bilhão em 13 anos, segundo levantamento da *United Nations Population Fund*. (UNFPA) (UNITED NATIONS POPULATIONS FUND., 2011). Isto cria um enorme desafio de como produzir alimento suficiente para alimentar toda esta população e de como educar e oferecer moradia a todos mantendo o planeta saudável.

Tem-se que no cenário atual, as taxas de crescimento da população vêm diminuindo, assim como a mortalidade infantil. Logo, a população está vivendo mais e os serviços de saúde são mais eficientes, resultando no crescimento da população (UNITED NATIONS POPULATIONS FUND., 2011). Assim, até 2050, será preciso aumentar a produção global de alimentos em média 70% (podendo chegar a até 100% nos países em desenvolvimento) para alimentar a população crescente, tomando como base os índices de produção de 2009, sem degradar o planeta (FAO, 2011).

Algumas alternativas podem ser utilizadas para aumentar a produção mundial de alimentos, dentre elas está o aumento da área cultivada e o uso eficiente das terras. Cada uma das opções é discutida a seguir.

#### 1.1.1. Aumento da produção através do aumento da área cultivada

Aumentar a área destinada à agricultura e pecuária pode ser uma alternativa rápida para atingir níveis de produção superiores, embora não tenha sido esta a prática amplamente utilizada.

Nas últimas décadas, relativamente poucas terras novas foram adicionadas à área

destinada para a agricultura. Entre 1967 e 2007, a área de terra utilizada cresceu apenas 8% enquanto a produção agrícola mundial cresceu 115% (FAO, 2011). Enquanto uma parcela substancial de terra adicional poderia, em princípio, ser utilizada para a produção de alimentos, na prática, o que se vê é uma pressão muito grande para utilizá-la para outros fins. Por exemplo, a terra vai sendo perdida para a urbanização, desertificação, salinização e elevação do nível do mar. Outro motivo que reduz a terra disponível para a produção de alimentos é sua utilização para a produção de biocombustíveis, mesmo que o uso destes possa desempenhar um papel importante na mitigação da mudança climática.

Ainda sim, existem fortes razões ambientais para limitar qualquer expansão significativa de terras no futuro. Em particular, a conversão de áreas de floresta em terrenos agrícolas deve ser evitada uma vez que irá aumentar as emissões de gases de efeito estufa de forma muito significativa e acelerar a perda de biodiversidade (FAO, 2011).

### **1.1.2. Aumento da produção através do uso eficiente das terras**

Segundo relatório da *Food and Agriculture Organization (FAO), The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture* do ano de 2011, a maior contribuição para o aumento na produção provavelmente virá da intensificação da produção de terras já utilizadas para a agricultura. Isto exigirá uma ampla adoção de práticas sustentáveis de uso da terra e uso mais eficiente da irrigação. A área mundial cultivada aumentou 8% nos últimos 40 anos (FAO, 2011). Neste mesmo período, a área irrigada dobrou, representando a maior parte do aumento da área cultivada. Entretanto, a produção de alimentos cresceu entre 2,5 e 3 vezes graças ao aumento significativo no rendimento dos principais cultivos.

Tollefson (2010) cita que no Brasil o aumento da produtividade também ocorreu nas áreas de pastagem na região da Amazônia Legal<sup>1</sup>. Cita também que durante a década passada, as áreas de pastagem aumentaram 30%, mas o número de cabeças de gado

---

<sup>1</sup> Instituída pela Lei Nº 1806 em 1953, a região denominada Amazônia Legal abrange uma área de 5.217.423 km<sup>2</sup>, sendo constituída pelos estados do Amazonas, Pará, Acre, Roraima, Rondônia e Tocantins, em sua totalidade e parte dos estados do Maranhão e Mato Grosso (BRASIL, 1953).

aumentou 80%.

Ainda segundo Tollefson (2010), o Brasil precisaria quase que dobrar sua produção nas áreas de pastagem para suprir a demanda futura por alimentos até 2030 sem que seja feito desmatamento adicional. Estudos revelam que é possível tal aumento através da colocação do rebanho atual em metade da área de pastagem utilizada. Assim, seria possível liberar uma área suficiente para dobrar a produção nacional de grãos. Em adição a isso, o uso de variedades mais produtivas também pode ser uma saída para reduzir a pressão sobre as áreas de floresta.

*The Government Office for Science* (2011), através de seu sumário executivo, faz uma estimativa de que, com a aplicação de conhecimentos e tecnologias existentes, pode-se aumentar a produtividade média de duas a três vezes em muitas partes da África e em até duas vezes na Rússia.

### **1.1.3. Agricultura de precisão**

Pierce e Nowak (1999) definem agricultura de precisão como a aplicação de tecnologias e métodos para gerenciar a variabilidade espacial e temporal associada a todos os aspectos da produção agrícola com a finalidade de melhorar a eficiência das culturas e a qualidade ambiental.

De acordo com Vilde *et al.* (2010), a agricultura de precisão é um sistema agrícola de economia de recursos que permite a obtenção de rendimentos máximos e consumo mínimo de combustível, produtos químicos e outras despesas.

Tecnologias de agricultura de precisão estão sendo pesquisadas e implementadas em uma infinidade de culturas. A agricultura de precisão é bem sucedida em seu papel de aumentar a produção agrícola, minimizando o impacto ambiental. Com a utilização do *Global Positioning System* (GPS), a agricultura de precisão consegue reconhecer e quantificar a variabilidade espacial das áreas e gerenciar essa variabilidade através da aplicação de insumos em quantidades específicas, quando e onde eles são necessários. O GPS é usado para auxiliar a navegação dos veículos ou, ao menos, orientar o operador, sem que haja a preocupação com falhas ou excesso de aplicação e possibilita tanto a aplicação diurna

quanto noturna de fertilizantes e produtos químicos. Ele também fornece maior precisão em sistemas de medição de produtividade (KOCH e KHOSLA, 2003).

#### **1.1.4. Sistemas de navegação de veículos agrícolas**

Wilson (2000) mostra que dentro do conceito de agricultura de precisão, o ato de dirigir veículos agrícolas tem recebido a atenção de pesquisadores nos últimos 50 anos. Algumas são as motivações para se fazer um veículo autônomo ou parcialmente autônomo. A necessidade de aliviar o operador do manuseio contínuo do volante para fazer ajustes na direção enquanto o mantém em um nível de desempenho aceitável é talvez o motivo mais citado para justificar a necessidade de um sistema de direção.

Larsen *et al.* (1994) ressaltam que a localização precisa da máquina ( $\pm 2\text{cm}$ ), relativa a algum caminho ou posição pré-determinados, permitirá tratamento de pontos ou caminhos específicos num campo.

Heraud e Lange (2010) apontam que dirigir um veículo agrícola é uma tarefa extremamente exigente. O operador deve dirigir no caminho desejado, não passar sobre a plantação enquanto minimiza a sobreposição e falhas e ainda deve monitorar continuamente a operação do equipamento. O resultado é a fadiga e o baixo desempenho de direção, especialmente à noite e em condições de visibilidade baixa. Estes são alguns dos motivos para a utilização de direção automática. Ainda segundo Heraud e Lange (2010), ao longo da história, sempre existiram invenções para ajudar o motorista do veículo/implemento a espaçar suas linhas de plantação uniformemente.

De acordo com Callaghan *et al.* (1997), as limitações das tecnologias disponíveis até o início dos anos 2000 fizeram com que a maioria dos sistemas de direção fosse baseada no princípio de seguir guias eletrônicas cuidadosamente posicionadas no campo de trabalho. O custo, inflexibilidade e fragilidade destes sistemas fizeram com que eles nunca saíssem dos laboratórios de pesquisa. Avanços recentes da tecnologia fizeram com que o interesse de se automatizar veículos agrícolas ressurgisse. Existem agora:

- Sistemas de navegação independente com custos relativamente baixos (por exemplo, GPS);

- Componentes baratos e eficientes para processamento embarcado;
- Programas computacionais e ferramentas para gerenciamento de fazendas;
- Metodologias práticas de robótica e inteligência artificial.

Larsen *et al.* (1994) mostram que um modelo que pode utilizar informação de posicionamento GPS para direção combina muitos fatores para formar um pacote de controle. As posições digitais atuais, obtidas dos satélites do sistema, são comparadas com o caminho desejado para determinar um sinal de erro que deve ser utilizado para ajustes na direção. O modelo tem um número de partes ou módulos que inclui um módulo do trator, um módulo do implemento e um módulo do caminho. O módulo do trator descreve a geometria e tamanho do trator e a posição do engate do implemento ao trator. Este módulo fornece o ângulo de direção desejado para o trator à medida que ele se move ao longo de seu caminho. O módulo do implemento define a geometria do implemento e sua ligação com o trator. O módulo do caminho é usado para converter as posições digitais em uma série de raios de giro e vetores de direção. A interação destes três módulos fornece a resposta do implemento para as entradas de controle do trator.

De acordo com Heraud e Lange (2010), sistemas automáticos de direção de tratores começaram a surgir em 1997. O primeiro sistema foi vendido na Austrália por uma empresa chamada *Beeline*. Pouco depois, a empresa *Integrinautics and Trimble Navigation* também introduziu sistemas de direção automática. Hoje, sistemas de direção automática têm sido utilizados em tratores, pulverizadores auto-propelidos e implementos. Os principais componentes dos sistemas atuais baseados em GPS incluem:

- Receptor GPS;
- Interface para o usuário capaz de mostrar informações de erro de posicionamento no caminho e possibilitar a entrada de informações pelo usuário, como o espaçamento entre as linhas que o veículo irá percorrer e a localização da primeira linha-guia;
- Algoritmos capazes de planejar o caminho de acordo com os erros;
- Atuadores na direção do veículo e detector de atuação manual no volante;
- Sensores de atuação manual;
- Sensores de ângulo da direção (opcionais);
- Algoritmos de controle e controlador;

- Compensação de terreno (opcional);
- Outros sensores do veículo, como sensor de velocidade da roda, sensor de ré, etc.

Alguns erros de operação poderiam ser evitados com sistemas automáticos de navegação. Na Figura 1, observa-se falhas na aplicação de herbicida para preparação do terreno para plantio. Falhas assim são corrigidas com novas aplicações, aumentando os custos e a contaminação do ambiente.



Figura 1 - Falhas resultantes da aplicação de herbicida.  
(Fonte: [www.plantiodireto.com.br/?body=cont\\_int&id=915](http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=915))

A Figura 2 mostra vários rastros produzidos pela passagem de máquinas sem controle de tráfego, aumentando a quantidade de plantas danificadas e reduzindo a produtividade.



Figura 2 - Vários trajetos de máquinas.  
(Fonte: [www.plantiodireto.com.br/?body=cont\\_int&id=915](http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=915))

### 1.1.5. Robôs e agricultura

Segundo Day (2011), a evolução da mecanização agrícola ao longo do século XX foi dominada pelo aumento em tamanho e massa dos veículos, resultando na elevação do rendimento das máquinas. Entretanto, máquinas maiores e mais pesadas aumentam o risco de compactação do solo. Com o advento dos robôs, pode haver um nicho para pequenas unidades que operem de forma autônoma, realizando tarefas específicas no campo de forma a maximizar a precisão e minimização dos danos externos (como ilustrado na Figura 1 e Figura 2). Estas tarefas podem ser executadas 24 horas por dia sem que haja a necessidade de troca de operador, fornecendo uma abordagem rápida e controlada para os problemas encontrados, como ervas daninhas e doenças.

Segundo Tilman *et al.* (2002), a utilização mais eficiente de fertilizantes traria mais ganhos na produção, diminuindo o desperdício e contaminação do ambiente. Já Bongiovanni e Lowerberg-Deboer (2011) citam outro benefício da aplicação localizada de agrotóxicos que é a redução no desenvolvimento de resistência à pesticidas. Abramovay (2011), por sua vez, elenca fatores básicos que funcionam como limites à expansão da produção agropecuária e que atingem não só as nações pobres, mas o conjunto do planeta. Um deles é o custo dos insumos que compõem as formas convencionais de modernização agrícola. O custo da uréia triplicou desde 2003. Os preços mundiais dos fertilizantes aumentaram mais que os do petróleo desde o início de 2007. Os preços médios de fertilizantes fosfatados subiram de US\$ 250,00 em 2007 para US\$ 1.230,00 a tonelada entre janeiro de 2007 e julho de 2008. Os adubos à base de potássio subiram de US\$ 172,00 para US\$ 500,00 a tonelada no mesmo período e a tonelada dos nitrogenados foi de US\$ 277,00 a US\$ 450,15. Assim, aplicações localizadas a taxas variáveis reduziriam o “desperdício” de insumos e proporcionariam redução dos custos de produção.

Em contrapartida, nos dias atuais, robôs estão cada vez mais sendo empregados na agricultura para complementar ou até mesmo substituir o homem na execução de tarefas. As vantagens da utilização de robôs, segundo Comba *et al.* (2010), seriam melhorar a sustentabilidade e a segurança do trabalho em muitos setores agrícolas, assim como uma redução significativa dos custos de produção. A utilização de robôs para aplicação de produtos químicos evitaria o contato de humanos com os agrotóxicos, especialmente em

estufas, onde a aplicação é feita manualmente e ainda reduziria a quantidade de produtos utilizados se fosse feita somente nos locais onde houvesse necessidade, utilizando técnicas de agricultura de precisão.

De acordo com Blackmore e Griepentrog (2002), existem várias atividades de campo que podem ser executadas por robôs autônomos, gerando mais benefícios que as máquinas atuais. Ainda segundo Blackmore e Griepentrog (2002), várias plataformas autônomas podem estar disponíveis no futuro, sendo estas utilizadas para semeadura, controle de ervas daninhas, monitoramento de solo e cultura, aplicação de fertilizantes e agrotóxicos, adubação, irrigação e colheita.

Segundo Auernhammer (2001), os robôs agrícolas irão otimizar o uso das máquinas, levando à redução da quantidade de vezes necessária que a máquina deve ir a campo, reduzindo a sobreposição nas aplicações de fertilizante e defensivos.

Para que os custos com robôs sejam otimizados, Comba *et al.* (2010) sugerem que estes devem ser modulares e flexíveis em relação à configuração das dimensões e possam carregar ferramentas diferentes. Desta forma, um mesmo robô pode ser utilizado para realizar várias operações em diferentes culturas.

## 1.2. O foco desta dissertação

Este trabalho é parte integrante de um conjunto de trabalhos desenvolvidos por uma equipe multidisciplinar da Escola de Engenharia de São Carlos para a plataforma robótica AgriBOT e tem como objetivo apresentar um estudo sobre um sistema de navegação global para veículos autônomos agrícolas baseado em missões através do cálculo do caminho ótimo em regiões previamente mapeadas além de fornecer informações como ângulo de direção, raio de giro e velocidade máxima de deslocamento.

É esperado que este trabalho seja utilizado dentro do propósito da plataforma para realização de missões de coleta de amostras e dados dentro de campos cultivados.

Assim, este estudo pretende resolver o problema de cálculo do caminho ótimo para cada missão através da utilização do algoritmo de Dijkstra com o auxílio da fórmula de Haversine, usada para encontrar a distância entre duas coordenadas geográficas. Durante o percurso, o veículo deve desenvolver velocidade segura enquanto realiza a mudança de direção de deslocamento. Desta forma, é também objetivo deste estudo propor a redução, quando possível, de mudanças abruptas de direção através de arcos de circunferência, fornecidos como um valor de raio de giro a ser descrito pelo centro de massa do robô, utilizando o modelamento cinemático do veículo realizado em trabalho de outro membro da equipe. Ainda utilizando o modelamento feito, a velocidade de deslocamento é sugerida e limitada em função da velocidade angular máxima do centro de massa proposta no modelamento.

Para teste das considerações propostas devem ser utilizadas regiões de cultivo de café dos estados de São Paulo e Minas Gerais, mapeadas durante a colheita de café.

### 1.3. A divisão do trabalho

O **Capítulo 2** apresenta uma visão geral sobre agricultura de precisão, algumas técnicas e ferramentas nela empregadas. Ainda neste capítulo são apresentados robôs móveis, mecanismos de locomoção e alguns exemplos. Também são apresentados robôs autônomos e métodos para planejamento de rota.

No **Capítulo 3** é apresentado o robô autônomo agrícola AgriBOT, assim como faz uma descrição de suas principais características e sua utilização para fins agrícolas.

No **Capítulo 4** é descrita a metodologia utilizada para desenvolvimento do navegador global através das etapas. É mostrado como fazer o mapeamento, processamento dos dados, relacionamento dos pontos, definição das missões, emprego dos algoritmos de cálculo de distância entre coordenadas geográficas, cálculo de caminho de custo mínimo de Dijkstra, informação da direção do veículo, raio de giro e velocidade máxima de deslocamento.

No **Capítulo 5** são apresentados casos utilizados para teste da metodologia proposta no Capítulo 4 e a análise dos resultados, caso a caso.

No **Capítulo 6** são feitas as considerações e conclusões sobre o estudo e são propostos trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# 2. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir é apresentada uma breve história da evolução da agricultura de precisão e suas ferramentas, robôs autônomos e sua utilização na agricultura, métodos para planejamento de rota e navegação.

Como o foco deste trabalho não é desenvolver uma ferramenta nova de agricultura de precisão e sim mostrar a utilização de ferramenta existente, será feita uma revisão superficial do assunto.

Neste capítulo também é feito o esclarecimento das ideias apresentadas para o entendimento do trabalho.

### 2.1. Agricultura de precisão

Segundo Stafford (2000) e Sudduth (1999), os primeiros indícios de agricultura de precisão surgiram no início do século XX. Linsley e Bauer, pesquisadores da Universidade de Illinois, nos Estados Unidos da América, publicaram um trabalho em 1929 aconselhando agricultores da região a mapear variações na acidez do solo em suas propriedades e variar a aplicação de calcário de acordo com estas variações. Porém, não existiam ferramentas tecnológicas e tampouco havia conhecimento científico para utilizá-las de forma adequada.

Os estudos a respeito das variações das características do solo e de produtividade continuaram a ser feitos ao longo dos anos. Porém, a tecnologia que propiciou o desenvolvimento do conceito de agricultura de precisão foi, no final da década de 1970, o sistema de posicionamento global. Baseado em uma constelação de satélites colocados em órbita pelo Departamento de Defesa norte-americano, este sistema foi capaz de determinar a latitude, longitude, altitude e velocidade em qualquer lugar na superfície do planeta, 24 horas por dia, com precisão de poucos centímetros. A disponibilidade destas informações

para as máquinas no campo possibilitaria localizar o tratamento aplicado (STTAFORD, 2000).

No início dos anos 1980, engenheiros agrícolas começaram a escrever sobre sistemas de controle capazes de responder às variações das condições do campo e aplicar diferentes quantidades de insumos (SUDDUTH, 1999). Nesta mesma época, vários trabalhos foram publicados mostrando que a ideia de agricultura de precisão estava se desenvolvendo. Foram criados conceitos de prescrição personalizada e sensores para mensurar propriedades do solo.

Rudolph<sup>2</sup> (1983 apud SUDDUTH, 1999) imaginava que, no futuro, um equipamento seria capaz de controlar as taxas de aplicação de insumos tendo como base a informação contida em mapas. Estes possuiriam as características do campo e seriam armazenados em um computador no próprio equipamento. Ainda em 1983, Matthews<sup>3</sup> (1983 apud STTAFORD, 2000) previa a necessidade de maior precisão no manejo das culturas e isto iria requerer a variação constante e contínua dos insumos para atender às necessidades do solo ou cultura de determinada região.

No ano de 1986, Earl W. Ortlip teve a patente de uma metodologia e um equipamento para aplicação de fertilizante concedida nos Estados Unidos da América. *United States Patent and Trademark Office* (1986) propôs um sistema composto por um veículo que dispunha de vários compartimentos, cada um para transportar um determinado tipo de fertilizante. Sistemas alimentadores possuíam medidores para indicar a quantidade de produto coletado dos compartimentos para ser aplicado. Um controlador eletrônico possuiria um mapa contendo as localizações dos diferentes tipos de solo no campo a ser fertilizado e este seria responsável por determinar a localização do veículo no campo, verificando sobre que tipo de solo ele estaria para fazer o correto ajuste nos alimentadores de fertilizante. O método proposto consistia em cruzar a informação de fotografias aéreas com amostras de solo feitas e inseri-las no controlador.

Fairchild<sup>4</sup> (1988 apud STAFFORD, 2000) foi quem provavelmente fez a primeira aplicação de insumos utilizando agricultura de precisão. O sistema utilizava a informação de fotografias aéreas e amostras de solo para gerar o mapa de aplicação de fertilizante. O

---

<sup>2</sup> RUDOLPH, W. W. Controlled application. *Agricultural Electronics – 1983 and Beyond*, St. Joseph, v. 1, p. 91-98, 1983.

<sup>3</sup> MATTHEWS, J. Some challenges for engineers in agriculture. *Journal of the Royal Agricultural Society of England*, v. 144, p. 146-158, 1983.

<sup>4</sup> FAIRCHILD, D. S. Soil information system for farming by kind of soil. *Proceedings...* St. Paul, p. 159-164, 1988.

posicionamento do veículo no campo foi feito por estimativa, uma vez que o sinal de GPS não estava suficientemente preciso para usuários civis.

Outras aplicações e maior esforço nas pesquisas foram postas em prática no início da década de 1990 quando o sinal GPS tornou-se mais estável. A constelação de satélites estava quase completa e os receptores para uso civil tornaram-se disponíveis (STAFFORD e AMBLER<sup>5</sup>, 1994 apud STAFFORD 2000).

Segundo Pires *et al.* (2004), os primeiros trabalhos sobre agricultura de precisão no Brasil foram realizados na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo, em 1997. O primeiro mapa da variabilidade de colheita do Brasil foi feito para a cultura de milho.

A agricultura de precisão teve um ciclo de duas décadas antes que fosse lançada mundialmente. Embora disponibilizada para os agricultores brasileiros no final da década de 1990, sua implantação não ocorreu de forma estruturada. Enquanto os países desenvolvedores da agricultura de precisão tiveram tempo para desenvolver os profissionais envolvidos nas áreas relacionadas com ela como informática, automação, sistemas de informação geográfica, agronomia e outras, no Brasil, os profissionais não tiveram o devido preparo. Assim, atividades de pesquisa estão sendo desenvolvidas para adequação da metodologia e acompanhamento das atividades desenvolvidas ao redor do mundo. Com isso, os profissionais envolvidos recebem treinamento sobre o tema (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2012).

Apesar de ter sido desenvolvida para culturas de grãos, a agricultura de precisão pode ser aplicada a outros tipos de cultura como algodão, cana-de-açúcar, frutíferas, café e outras (MOLIN, 2002).

Segundo Inamasu *et al.* (2011), a agricultura de precisão pode ser dividida em três etapas dentro de um ciclo:

- Leitura da variável a ser controlada e levantamento dos fatores que a influenciam;
- Análise do sistema para identificação dos parâmetros responsáveis por produzir o resultado;

---

<sup>5</sup> STAFFORD, J. V.; AMBLER, B. In-Field location using GPS for spatially variable Field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 11, p. 23-36, 1994.

- Controle da variável de interesse.

Este ciclo pode ser observado na Figura 3.

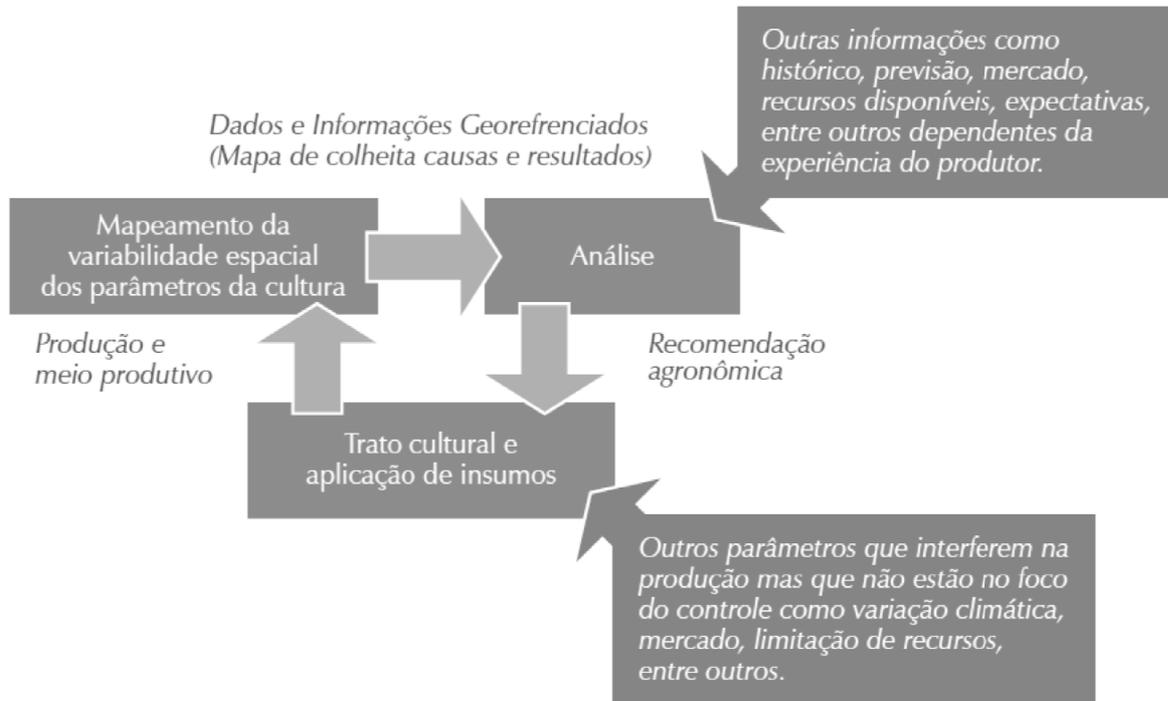


Figura 3 - Ciclo da agricultura de precisão (INAMASU *et al.*, 2011).

Sudduth (1999) e Dobermann *et al.* (2004) fazem uma aproximação muito similar, porém acrescentam uma etapa para avaliação da eficácia do sistema em relação à economia de insumos e aos impactos ambientais. Esta avaliação é parte do processo de coleta de dados para a próxima safra. A aproximação feita pode ser vista na Figura 4.

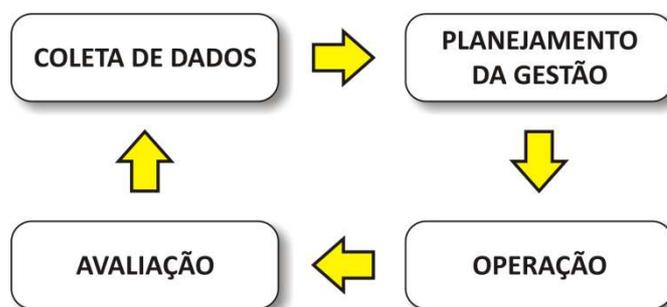


Figura 4 - Ciclo da agricultura de precisão (Adaptado de SUDDUTH, 1999).

As duas abordagens consideram que são necessárias iterações no processo para

possibilitar o refinamento do plano de manejo a cada safra.

Uma etapa importante dentro do ciclo da agricultura de precisão é a etapa de aquisição de dados através da leitura das variáveis de interesse. Para tanto, são utilizadas algumas ferramentas.

### **2.1.1. Ferramentas da agricultura de precisão**

A agricultura de precisão faz uso de várias ferramentas para levantamento das características da cultura e do solo para criação de mecanismos de controle da aplicação.

Pode-se citar algumas delas:

- GPS;
- *Geographic Information System* (GIS);
- Sensores para medição de diversas grandezas das culturas e do solo;
- Sensoriamento remoto e imagens aéreas;
- *Variable Rate Technology* (VRT);
- Monitores de colheita;
- Sistemas de guiagem automática de veículos agrícolas.

De acordo com Pires *et al.* (2004), a aplicação e a disponibilidade financeira do agricultor fazem com que estas ferramentas sejam utilizadas individualmente ou combinadas para gerar a quantidade de entradas necessárias para o sistema de controle. As ferramentas podem ser utilizadas para os mais variados fins. As mais comuns são: mapeamento dos solos e das culturas, criação de mapas de produtividade, aplicação em taxa variável, servir como guias para aplicações aérea e terrestre de defensivos e como suporte para tomada de decisão.

Adamchuk *et al.* (2004) e Sudduth (1999) citam que o receptor GPS, usado para localização e navegação de veículos agrícolas dentro do campo, tornou-se o sensor mais utilizado em agricultura de precisão. Além da capacidade de determinar as coordenadas geográficas, os receptores com maior precisão permitem a medição da elevação do terreno e os dados fornecidos podem ser utilizados para calcular parâmetros relevantes do terreno.

Segundo Nowatzki *et al.* (2004), a tecnologia GPS é utilizada para localizar e mapear regiões no campo onde existam infestações de ervas daninhas, doenças e pragas. Regiões onde foram retiradas amostras de solo podem ser gravadas para criação de mapas que indicam as variações de fertilidade. A gravação de marcos de interesse pode ser utilizada para referência futura. Estes conjuntos de informações são adicionados como camadas de mapas de programas de sistemas de informação geográfica, responsáveis por correlacionar as informações entre as camadas.

De acordo com Zhang *et al.* (2002), a variabilidade do campo pode ser gerida através de duas abordagens: a abordagem baseada em mapas e a baseada em sensores. Com as tecnologias disponíveis como GPS, sensoriamento remoto, monitoramento de colheita e amostragem de solo, a abordagem por mapas é mais fácil de ser implementada.

Para Auernhammer (2001), a abordagem por mapas tem como base dados históricos sobre a distribuição de rendimento de colheita e disponibilidade de nutrientes para as plantas no solo. Ambas as informações podem ser obtidas de maneira prática com precisão satisfatória.

Quando um receptor GPS é utilizado juntamente com um dispositivo que grava a posição de cada medição feita dentro de um padrão de grade de amostras, um mapa pode ser gerado e processado juntamente com outras informações. A esta abordagem dá-se o nome de método de aplicação baseada em mapa (ADAMCHUK *et al.*, 2004).

De acordo com Sudduth (1999), a utilização de mapas permite maior flexibilidade para manipulação e processamento dos dados e, atualmente, a maioria das aplicações à taxa variável utilizam mapas.

Morgan e Ess<sup>6</sup> (1997 apud SUDDUTH, 1999) apontam as vantagens e desvantagens da utilização de mapas para aplicação à taxa variável.

#### Vantagens:

- Não requer sensores de planta ou solo;
- A quantidade de produto a ser aplicada pode ser calculada antes da aplicação;
- O intervalo de tempo disponível entre a coleta de informação e a aplicação

---

<sup>6</sup> MORGAN, M. T.; ESS, D. R. **The precision-farming guide for agriculturists**. An agriculture primer. Moline: John Deere Publishing, 1997, 124p.

permite uma análise mais criteriosa dos dados, o que pode potencializar os resultados;

- O sistema pode “prever” as taxas a serem aplicadas em locais futuros para minimizar erro de atraso na mudança de dosagem.

Desvantagens:

- Necessitam de um sistema de posicionamento como, por exemplo, GPS;
- As informações coletadas e analisadas devem ser organizadas para criação de mapas;
- *Softwares* especializados e conhecimento do usuário neste tipo de *software* são necessários para a criação dos mapas;
- Erros de posicionamento durante as etapas de coleta e aplicação podem reduzir a precisão;
- A interpolação da dosagem entre pontos amostrados pode causar erros de dosagem nestes pontos;
- Não é muito adequada para controlar aplicações baseadas em características que variem rapidamente como, por exemplo, o nível de nitrato no solo.

Um exemplo de utilização de ferramentas de agricultura de precisão para criação de recomendação para aplicação em taxa variável de herbicida para controle de plantas invasoras é proposto no trabalho de Cruvinel e Karam (2010). O procedimento por eles proposto consiste na execução de uma sequência de passos. São eles: coleta da informação georreferenciada, separação da informação de interesse, criação do mapa de textura, extração das características geométricas da variedade de erva daninha, criação de mapas de plantas invasoras, união das informações e, finalmente, criação do mapa de recomendação para aplicação de herbicida (CRUVINEL e KARAM, 2010).

Morgan e Ess<sup>7</sup> (1997 apud ADAMCHUK *et al.*, 2004) afirmam que na abordagem baseada em sensores, sensores em tempo real embarcados no equipamento realizam a medição das propriedades desejadas, como propriedades específicas do solo ou plantas, e controlam um sistema de aplicação em taxa variável de acordo com estas informações sem

---

<sup>7</sup> Ver nota de rodapé 6.

que seja necessária a utilização de um receptor GPS.

Ainda segundo Morgan e Ess (1997 apud ADAMCHUK *et al.*, 2004), sensores em tempo real podem ser utilizados tanto no método baseado em mapa quanto no método de aplicação em tempo real.

Zhang *et al.* (2002) apontam que, enquanto agrônomos estão desempenhando o papel principal no desenvolvimento da agricultura de precisão, os engenheiros têm trabalhado prontamente para desenvolver as tecnologias necessárias para as aplicações da agricultura de precisão. As inovações estão voltadas para o desenvolvimento de sensores, controles e tecnologias de sensoriamento remoto. Os sistemas de sensoriamento devem ser robustos, de baixo custo e, preferencialmente, de tempo real.

Adamchuk *et al.* (2004) classificam os sensores de solo utilizados nas máquinas de acordo com o método de medição empregado:

- Elétricos e eletromagnéticos: medição da resistividade, condutividade, capacitância ou indutância afetados pela composição do solo;
- Óticos ou radiométricos: detecção do nível de energia absorvida ou refletida pelas partículas do solo através da utilização de ondas eletromagnéticas;
- Mecânicos: medição das forças resultantes de uma ferramenta colocada em contato com o solo;
- Acústicos: quantificação do som produzido por uma ferramenta em contato com o solo;
- Pneumáticos: avaliação da habilidade de injetar ar no solo;
- Eletroquímicos: utilização de membranas íon-seletivas que produzem uma resposta em tensão elétrica de acordo com a atividade de íons selecionados (H<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, etc.).

Sudduth *et al.* (2005) afirma que com a utilização de dados de condutividade elétrica aparente do solo pode-se estimar a salinidade do solo, a quantidade de argila, a composição da argila, a capacidade de troca de cátions, a porosidade do solo, sua distribuição e a umidade presente no mesmo.

Sudduth (1999) cita que a tecnologia de aplicação em taxa variável está disponível desde a década de 1980 e que a variação precisa das taxas de aplicação é fundamental para a agricultura de precisão.

Segundo Doerge (2000), várias são as possibilidades para utilização de aplicações em taxa variável, entre elas fertilizantes (nitrogênio, fósforo e potássio), calcário, gesso, sementes, variedades híbridas, inseticidas, herbicidas e água. Para cada uma delas há um conjunto de fatores que deve ser utilizado para desenvolver a estratégia de aplicação.

Outro exemplo de utilização de mapas é o sistema de monitoramento de colheita. Este mapa é usado para indicar onde intervenções podem ser feitas para uniformizar ou maximizar a produtividade.

Segundo Casady *et al.* (1998), o sistema de monitoramento de produtividade ou colheita grava simultaneamente dados de colheita, umidade dos grãos e dados de posição. Todas estas informações são essenciais para geração de mapas de produtividade.

Mapas de produtividade de milho e soja foram obtidos com sistemas de monitoramento de produtividade compostos por um sistema de posicionamento global e sensores para medição da velocidade do equipamento, da produtividade da cultura e a umidade dos grãos (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2012).

A Figura 5 mostra um mapa de produtividade no qual cada cor mostrada pela figura representa uma faixa de produtividade. As áreas em vermelho sinalizam maior produtividade que as áreas em verde.

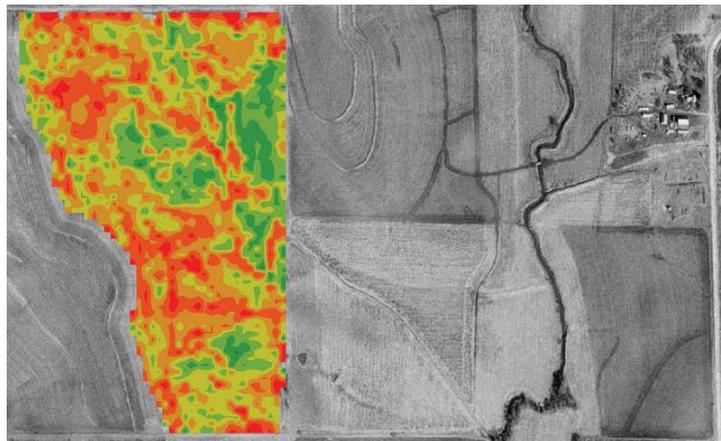


Figura 5 - Mapa de produtividade (LOUP ELECTRONICS, 2012).

Segundo Sudduth (1999), a variação da produtividade é um fator importante para tomada de decisão. A quantidade colhida é função de um conjunto de parâmetros variáveis de cultura e solo que se encontram presentes no campo como umidade do solo, nutrientes, infestação de insetos e ervas daninhas e muitos outros. Assim, o fato de relacionar

informações espaciais com características de solo e dados de colheita através de um sistema de informação geográfica pode permitir diagnosticar qual é o fator predominante para a produção e tornar-se fundamental para a tomada de decisão precisa para aumentar a produtividade.

Ainda segundo Sudduth (1999), a medição da colheita fornece a realimentação necessária para ajustes nos processos de aplicação a taxa variável para aplicações futuras.

De acordo com AG Leader (2012), um dos benefícios de se utilizar monitores de colheita é que a tomada de decisão de armazenamento dos grãos colhidos é baseada nas leituras de umidade feitas durante a colheita.

A empresa Trimble oferece um sistema de monitoramento e mapeamento de produtividade e umidade precisos para evitar que sejam colhidas áreas onde os grãos apresentam grande teor de umidade, evitando problemas de armazenamento (TRIMBLE, 2012).

Os sensores utilizados para realizar o monitoramento variam entre os fabricantes. Os mais comumente utilizados são sensores de umidade, óticos e de impacto. A Figura 6 mostra o sensor de umidade comercializado pela empresa Loup Electronics.



Figura 6 - Sensor de umidade para utilização em máquinas agrícolas (LOUP ELECTRONICS, 2012).

Segundo Loup Electronics (2012), a utilização de sensores óticos tem duas vantagens:

- A umidade presente nos grãos não influencia o sensor, sendo necessária somente uma calibração para que o sistema esteja pronto para uso. Sensores de impacto requerem calibrações utilizando grãos secos e grãos com algum teor de umidade;
- A calibração do sensor ótico depende de uma pequena quantidade de grãos colhidos. O usuário informa o volume colhido (através de unidades de volume de

grãos secos) e o sistema corrige a quantidade já colhida e se ajusta para as próximas.

A Figura 7 mostra o sensor ótico comercializado pela empresa Loup Electronics.



Figura 7 - Sensor ótico para utilização em máquinas agrícolas (LOUP ELECTRONICS, 2012).

O monitoramento através de sensores óticos consiste na contagem dos grãos que cruzam o feixe ótico em determinado espaço de tempo. Sensores de impacto relacionam a taxa de colisão dos grãos com a quantidade de grãos colhidos.

Um problema presente nas colheitadeiras é que o processo de colheita é demorado, fazendo com que exista um grande atraso entre a entrada do grão na máquina e sua passagem pelos sensores de monitoramento da colheita. Devido a este atraso, os monitores de produtividade sofrem a suavização de variações abruptas na colheita e a média colhida é atrasada. Os *softwares* utilizados para a geração de mapas de produtividade fazem a correção do atraso inerente ao processo de forma aceitável e os mapas produzidos conseguem indicar onde estão as variações de produtividade. Para o modelo de colheitadeira utilizado no trabalho, o tempo de atraso era de, aproximadamente, 15 segundos (CASADY *et al.*, 1998).

A Figura 8 mostra um controlador utilizado para geração de mapas de produtividade.



Figura 8 - Controlador para criação de mapas de produtividade (AG LEADER, 2012).

Outra ferramenta que é muito utilizada dentro da agricultura de precisão são os sistemas de guiagem de veículos agrícolas.

Goddard (1997) afirma que um sistema de guiagem automática pode posicionar um veículo em movimento com erro menor que 30 cm usando um sistema GPS diferencial (DGPS) de alta precisão e este sistema substitui os equipamentos convencionais de marcação para pulverizadores ou plantadeiras.

Callaghan *et al.* (1997) descrevem a utilização de sistemas de controle automático da direção de veículos agrícolas para serem usados na agricultura de precisão.

Os sistemas de guiagem serão abordados na etapa seguinte, inseridos no contexto de instrumentos para localização e locomoção de robôs.

## 2.2. Robôs móveis

A seguir é feita uma breve revisão a respeito da robótica móvel, em especial robôs terrestres, os mecanismos utilizados para locomoção, técnicas e instrumentos usados para localização e navegação.

Embora a robótica móvel<sup>8</sup> seja uma área muito abrangente, englobando robôs terrestres, aéreos e aquáticos, descrevê-la na sua integridade não faz parte do escopo deste trabalho, uma vez que este se destina a uma aplicação para robôs autônomos terrestres.

<sup>8</sup> Para mais informações e esclarecimentos mais detalhados, consultar **Introduction to Autonomous Mobile Robots** (SIEGWART et al., 2011).

### 2.2.1. Locomoção

Segundo Siegwart *et al.* (2011), um robô móvel necessita de mecanismos de locomoção que possibilitem sua locomoção sem barreiras através do ambiente. Para tanto, existe uma grande variedade de maneiras de locomoção como andar, correr, saltar, deslizar, patinar, nadar, voar e rolar. Embora a maioria destes mecanismos tenha tido como inspiração sistemas naturais, há uma exceção: a roda motorizada é uma invenção humana que alcança eficiência extremamente alta em superfícies planas. Este mecanismo não é completamente alheio aos sistemas biológicos, uma vez que o caminhar de seres bípedes pode ser aproximado pela rolagem de um polígono. À medida que o tamanho dos passos diminui, o polígono aproxima-se de um círculo ou roda.

Ainda segundo Siegwart *et al.* (2011), os sistemas biológicos têm sucesso em se movimentar através de uma grande variedade de terrenos mas existe um grande problema em tentar copiá-los: a complexidade mecânica. A capacidade de armazenamento de energia e os sistemas de ativação muscular e hidráulico utilizados pelos animais alcançam torque, tempo de resposta e conversão de energia de forma tão eficiente que ultrapassam em muito os sistemas similares fabricados pelo homem.

Devido a estas limitações, robôs móveis geralmente, ou se locomovem utilizando mecanismos com rodas ou pernas articuladas. Em geral, a movimentação utilizando pernas requer um maior número de graus de liberdade e maior complexidade mecânica que a movimentação com rodas. Entretanto, a eficiência do movimento com rodas depende diretamente das características do terreno, particularmente quão plana e dura é a superfície enquanto a eficiência do movimento por pernas depende da massa da perna e do corpo, ambos os quais o robô deve distribuir entre vários pontos de apoio durante a marcha. Como os sistemas de locomoção na natureza devem operar em terrenos acidentados e não estruturados, é compreensível o fato de que a natureza favoreça o movimento utilizando pernas. Da mesma forma, os ambientes humanos frequentemente são constituídos por superfícies planas e estruturadas, tanto internas quanto externas e, por isso, a maioria dos robôs industriais utiliza alguma forma de movimentação com rodas. Recentemente, para ambientes externos mais naturais, têm-se utilizado sistemas híbridos de locomoção utilizando pernas e rodas.

A seguir serão apresentadas as maneiras de locomoção utilizadas pelos robôs.

### 2.2.2. Locomoção por pernas

Siegwart *et al.* (2011) afirmam que a locomoção por pernas é caracterizada por uma série de pontos de contato entre o robô e o solo. As principais vantagens incluem adaptabilidade e manobrabilidade em terrenos acidentados. Como somente um conjunto de pontos de contato é necessário, a qualidade do terreno entre estes pontos não importa, contanto que o robô possa manter distância adequada do solo. Além disso, um robô com pernas é capaz de atravessar um buraco com dimensão de, no máximo, o alcance de suas pernas. Outra vantagem é que a locomoção utilizando pernas permite manipular objetos com destreza. As desvantagens deste sistema estão relacionadas com a potência e complexidade, uma vez que, em alguns casos, a perna deve ser capaz de sustentar todo o peso do robô e que, para que o robô tenha um nível alto de manobrabilidade, as pernas devem ter vários graus de liberdade.

Exemplos de robôs utilizando pernas podem ser vistos na Figura 9 e Figura 10.



Figura 9 - Robô humanoide Asimo.

(Fonte: [world.honda.com/news/2011/c1111108All-new-ASIMO/index.html](http://world.honda.com/news/2011/c1111108All-new-ASIMO/index.html))



Figura 10 - Robô quadrúpede BigDog.  
(Fonte: [www.bostondynamics.com/robot\\_bigdog.html](http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html))

### 2.2.3. Locomoção por rodas

A roda tem sido o mecanismo de locomoção mais utilizado em robótica móvel e nos veículos feitos pelo homem. Possui eficiência muito boa e implementação mecânica relativamente simples (SIEGWART *et al.*, 2011).

Segundo Bräunl (2006), os robôs móveis mais simples são os robôs com rodas. O mecanismo consiste de uma ou mais rodas motrizes, rodas passivas ou rodízios e rodas direcionais. A grande maioria dos projetos exige dois motores: um para condução e outro para direção.

De acordo com Siegwart *et al.* (2011), embora robôs com rodas não tenham problemas de equilíbrio pois, na maioria dos casos, são projetados para ficar com todas as rodas em contato com o solo, estes apresentam problemas relacionados à tração, estabilidade, manobrabilidade e controle.

Ao contrário dos automóveis, que são projetados para um ambiente altamente padronizado (malha viária), robôs móveis são projetados para aplicações em diversas situações. Uma desvantagem dos robôs com rodas é que estes precisam de uma rua ou superfície plana para locomoção (BRÄUNL, 2006).

A Figura 11 e a Figura 12 mostram robôs que utilizam rodas para locomoção.

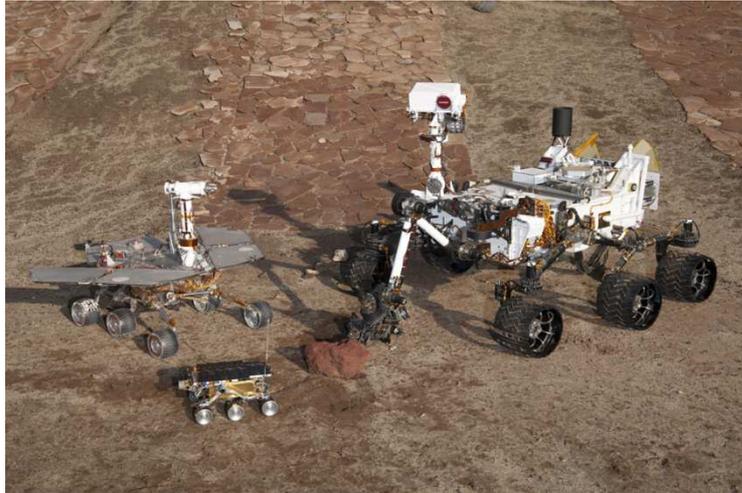


Figura 11 - Robôs autônomos para exploração de Marte.  
(Fonte: [www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA15277](http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA15277))



Figura 12 - Robô agrícola AgriBOT (TABILE, 2012).

#### 2.2.4. Locomoção por esteiras

Segundo Bräunl (2006) e Siegwart *et al.* (2011), robôs com esteiras são mais flexíveis e podem se locomover por terrenos acidentados e soltos com maior capacidade de manobra que robôs com rodas. Porém, não podem navegar de forma tão precisa quanto um robô com rodas pois têm uma grande área de contato com o solo, o que torna difícil alterar sua orientação.

### 2.2.5. Localização e navegação

De acordo com Bräunl (2006), localização e navegação são as duas tarefas mais importantes para robôs móveis e estão intimamente ligadas. O robô precisa saber onde está e deve ser capaz de elaborar um plano de como chegar ao seu objetivo. Problemas de falta de exatidão na posição inicial de uma trajetória prevista podem acarretar problemas para alcançar o ponto de destino.

Segundo Siegwart *et al.* (2011), a navegação é uma das competências mais desafiadoras requeridas de um robô móvel. O sucesso na navegação implica sucessos na percepção do ambiente através da leitura dos sensores, na localização no ambiente, na cognição para saber qual decisão deve ser tomada e no controle da locomoção para alcançar a trajetória desejada. A localização recebeu grande atenção dos pesquisadores na década passada e, como resultado, avanços significantes têm sido alcançados nesta área. Ainda segundo Siegwart *et al.* (2011), a colocação de um receptor GPS no robô faz com que muitos problemas referentes à localização sejam resolvidos. Porém, devido à baixa potência do sinal transmitido pelos satélites da rede de posicionamento global, os receptores perdem a recepção do sinal em locais fechados (ambientes internos) ou em locais com grandes obstáculos (árvores, construções, etc.), sendo seu uso justificado em robôs que operem em ambientes externos com boa visibilidade do céu. Outra limitação é taxa de atualização das informações transmitidas pelo receptor GPS utilizado neste trabalho, limitada em até 5Hz, que requer a integração com outros sensores para utilização em veículos que se movam rápido. Desta forma, outras formas de localização devem ser utilizadas para que o robô consiga se localizar no ambiente. Bräunl (2006) indica que este é um problema não trivial na ausência de sensores globais.

Bräunl (2006), também afirma que o problema de localização pode ser resolvido usando um sistema de posicionamento global. Para ambientes externos, este sistema poderia ser um receptor GPS. Em ambiente interno, uma rede de sensores com infravermelho, sonar, laser, balizas ou radiobalizas poderia ser empregada.

O foco deste trabalho consiste no desenvolvimento de aplicações para o robô agrícola AgriBOT que irá operar no campo, ao ar livre. Neste caso, a abordagem de sensores e métodos utilizados para localização em ambientes internos não será feita para não tornar

o trabalho demasiadamente longo.

Siegwart *et al.* (2011) e Bräunl (2006) afirmam que, em muitos casos, como perda de sinal GPS ou entre o intervalo de tempo de recepção de uma nova transmissão, o robô deve utilizar os *encoders* de suas rodas e sensores de direção, ou ambos, para estimar sua posição e orientação de tempos em tempos. Quando a estimativa é feita somente com os *encoders* das rodas, o método de estimativa recebe o nome de odometria. Com a adição de sensores de direção (por exemplo, giroscópio) para a estimativa, o método é então denominado *dead reckoning*. Um requisito deste método é que a posição e orientação inicial devem ser conhecidas. Devido aos erros destes sensores, o erro de posição do robô acumula-se ao longo do tempo, sendo necessária a correção da posição por outro mecanismo de localização (SIEGWART *et al.*, 2011).

### **2.2.6. Planejamento de rota**

Segundo Siegwart *et al.* (2011), o primeiro passo de um sistema de planejamento de rota é transformar um modelo de ambiente contínuo em um mapa discreto de acordo com o algoritmo de planejamento de rota escolhido.

### **2.2.7. Busca em grafos**

Siegwart *et al.* (2011) afirmam que, embora as técnicas utilizadas na realização de buscas em grafos façam parte da área matemática, muitas inovações foram feitas pela comunidade envolvida com robótica nos últimos anos. A necessidade de algoritmos em tempo real para mapas evolutivos e grafos que variam ao longo do tempo motivou os esforços para o desenvolvimento de melhores soluções na área.

Ainda de acordo com Siegwart *et al.* (2011), a maioria dos métodos de busca possuem duas etapas:

- Construção do grafo: definição dos vértices e conexão destes através de arestas;

- Busca no grafo: cálculo da solução ótima.

O desafio na construção do grafo consiste em montar um conjunto de vértices e arestas que permita ao robô ir a qualquer lugar na região livre de obstáculos e limitar o tamanho total do grafo.

Siegwart *et al.* (2011) citam exemplos de métodos utilizados na construção de grafos. Nos grafos de visibilidade, os caminhos ficam o mais próximo possível dos obstáculos e os caminhos ótimos resultantes são também os de caminho mínimo. Para o diagrama de Voronoy, os caminhos ficam o mais longe possível dos obstáculos, resultando em caminhos que distanciam-se da solução ótima em relação ao comprimento total do caminho. Métodos denominados de decomposição em células, de uma maneira geral, consistem em separar as áreas ocupadas das áreas livres. O grafo é formado através de conexão específica entre as células.

A seguir serão descritos os métodos de busca em largura, busca em profundidade e algoritmo de Dijkstra, ambos com características similares em relação à maneira como é executada a busca no grafo.

### **2.2.7.1. Busca em largura**

Este algoritmo de busca em largura ou *breadth-first search* (BFS) começa com um nó inicial e todos seus nós adjacentes. Então, para cada um destes nós, o algoritmo explora todos os nós adjacentes a continua até alcançar o nó de destino. Neste algoritmo os nós são expandidos de acordo com a proximidade ao nó inicial, onde proximidade pode ser entendida com o menor número de transições de ramos. O algoritmo para quando encontra o nó de destino. Geralmente, o caminho encontrado é o caminho que contém o menor número de nós entre o nó inicial e o nó de destino. Porém, este caminho só será o caminho de custo mínimo se a distância entre os nós for constante (SIEGWART *et al.*, 2011).

### 2.2.7.2. Busca em profundidade

O princípio de funcionamento do algoritmo de busca em profundidade ou *depth-first search* (DFS) é expandir cada nó até o nível mais profundo do grafo, ou seja, até que o nó não tenha mais sucessores. À medida que os nós são expandidos, o ramo ao qual eles pertencem é removido do grafo e o algoritmo retorna a busca ao próximo nó adjacente do nó inicial até o nível mais profundo. O algoritmo continua até não existirem mais nós. Este algoritmo é mais simples que o algoritmo de busca em largura em relação à complexidade de espaço, uma vez que este necessita de menos espaço em memória (SIEGWART *et al.*, 2011).

### 2.2.7.3. Algoritmo de Dijkstra

Desenvolvido pelo matemático Edsger Wybe Dijkstra em 1959, o algoritmo consiste em encontrar não somente o caminho de custo mínimo entre um ponto de origem e um ponto de destino mas todos os caminhos de custo mínimo entre qualquer ponto de origem e o ponto de destino, garantindo a solução ótima (SIEGWART *et al.*, 2011).

Dijkstra (1959) propõe uma estrutura de dados constituída por nós e entre estes há pelo menos um ramo interligando-os. A interligação (ramo) recebe um valor não negativo denominado custo. Outra imposição é que entre dois nós deve haver pelo menos um ramo.

O algoritmo faz uma estimativa inicial para o custo mínimo e ajusta esta estimativa sucessivamente. Partindo do nó de início, cada nó pertencente ao grafo é visitado, sendo que um nó é considerado visitado quando o caminho de custo mínimo do nó de início até este já tiver sido calculado. Para cada nova estimativa, o nó precedente, ou seja, o nó anterior àquele cujo valor de estimativa foi alterado, é armazenado. Quando todos os nós tiverem sido visitados, os valores de custo obtidos serão os custos mínimos dos caminhos que partem do nó de início até os demais nós do grafo. A sequência de nós que compõe cada caminho é obtida através dos nós precedentes.

Desta forma, o algoritmo de Dijkstra pode ser entendido através da sequência de

passos a seguir:

- **Passo 1:** Defina o nó de início e atribua zero à estimativa de custo mínimo dele. Para os demais nós atribua infinito;
- **Passo 2:** Inicialize os precedentes dos nós com qualquer valor;
- **Passo 3:** Enquanto houver nó não visitado:
  - seja  $j$  um nó não visitado cuja estimativa de custo seja a menor entre os nós não visitados;
  - atribua a condição de visitado ao nó  $j$ ;
  - para todo nó  $k$  não visitado que seja sucessor de  $j$  faça:
    - adicione a estimativa do nó  $j$  com o custo do ramo que une  $j$  a  $k$ ;
    - caso o resultado seja menor que a estimativa de custo anterior, considere este valor como sendo a nova estimativa de custo de  $j$  e assumo  $j$  como precedente do nó  $k$ .

A sequência de figuras a seguir ilustra o funcionamento do algoritmo para um grafo com cinco nós.

Na etapa 1, mostrada pela Figura 13, foram tomadas as seguintes ações:

- o nó de início  $a$  recebeu o valor de custo igual a zero;
- os demais nós receberam infinito.

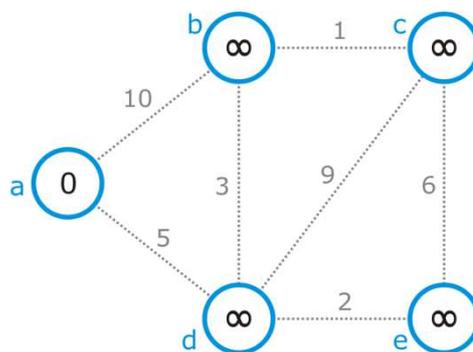


Figura 13 - Inicialização do algoritmo.

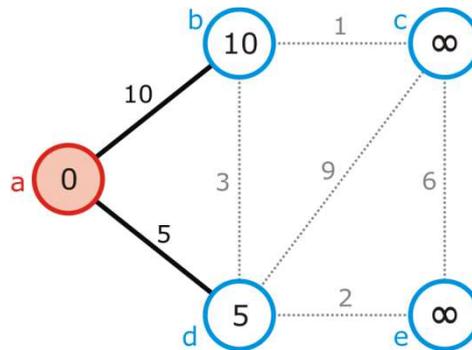
Os dados calculados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados calculados na etapa 1.

Nó	Custo	Precedente
<i>a</i>	0	-
<i>b</i>	$\infty$	-
<i>c</i>	$\infty$	-
<i>d</i>	$\infty$	-
<i>e</i>	$\infty$	-

Na etapa 2, mostrada pela Figura 14, foram tomadas as seguintes ações:

- o nó *a* foi selecionado;
- foi atribuída a condição de visitado para este nó;
- as estimativas de custo foram recalculadas para os nós *b* e *d*.

Figura 14 - Nó *a* visitado.

Os dados calculados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados calculados na etapa 2.

Nó	Custo	Precedente
<i>a</i>	0	<i>a</i>
<i>b</i>	10	<i>a</i>
<i>c</i>	$\infty$	-
<i>d</i>	5	<i>a</i>
<i>e</i>	$\infty$	-

Na etapa 3, mostrada pela Figura 15, foram tomadas as seguintes ações:

- o nó *d* foi selecionado;
- foi atribuída a condição de visitado para este nó;
- as estimativas de custo foram recalculadas para os nós *b*, *c* e *e*.

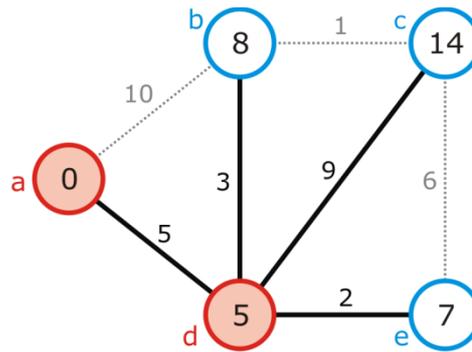


Figura 15 - Nó *d* visitado.

Os dados calculados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados calculados na etapa 3.

Nó	Custo	Precedente
<i>a</i>	0	<i>a</i>
<i>b</i>	8	<i>d</i>
<i>c</i>	14	<i>d</i>
<i>d</i>	5	<i>a</i>
<i>e</i>	7	<i>d</i>

Na etapa 4, mostrada pela Figura 16, foram tomadas as seguintes ações:

- o nó *e* foi selecionado;
- foi atribuída a condição de visitado para este nó;
- a estimativa de custo foi recalculada para o nó *c*.

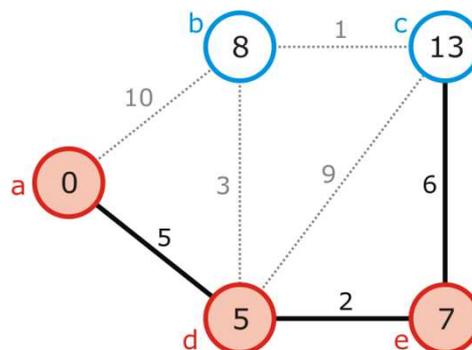


Figura 16 - Nó *e* visitado.

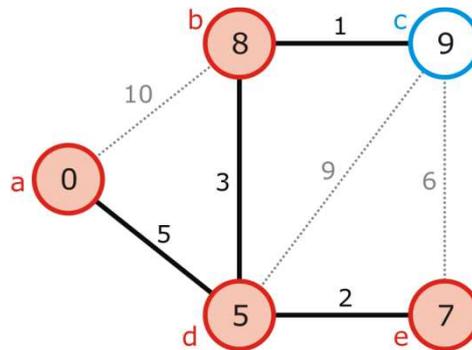
Os dados calculados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados calculados na etapa 4.

Nó	Custo	Precedente
<i>a</i>	0	<i>a</i>
<i>b</i>	8	<i>d</i>
<i>c</i>	13	<i>e</i>
<i>d</i>	5	<i>a</i>
<i>e</i>	7	<i>d</i>

Na etapa 5, mostrada pela Figura 17, foram tomadas as seguintes ações:

- o nó *b* foi selecionado;
- foi atribuída a condição de visitado para este nó;
- a estimativa de custo foi recalculada para o nó *c*.

Figura 17 - Nó *b* visitado.

Os dados calculados são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados calculados na etapa 5.

Nó	Custo	Precedente
<i>a</i>	0	<i>a</i>
<i>b</i>	8	<i>d</i>
<i>c</i>	9	<i>b</i>
<i>d</i>	5	<i>a</i>
<i>e</i>	7	<i>d</i>

Na etapa 6, mostrada pela Figura 18, foram tomadas as seguintes ações:

- o nó *c* foi selecionado;
- foi atribuída a condição de visitado para este nó.

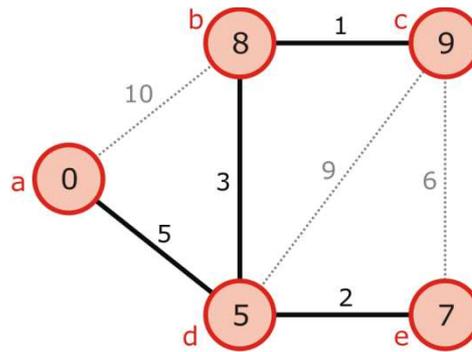


Figura 18 - Nó *c* visitado.

Os dados calculados são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados calculados na etapa 6.

Nó	Custo	Precedente
<i>a</i>	0	<i>a</i>
<i>b</i>	8	<i>d</i>
<i>c</i>	9	<i>b</i>
<i>d</i>	5	<i>a</i>
<i>e</i>	7	<i>d</i>

Assim, considerando o caminho de custo mínimo que parte do nó *a* até o nó *c* com custo de nove unidades, a sequência de nós que constitui o caminho pode ser obtida através da análise da Tabela 6. O nó precedente ao nó de destino *c* é o nó *b*. De maneira análoga, o nó antecessor do nó *b* é o nó *d*. Finalmente, o nó precedente do nó *d* é o nó inicial *a*. A sequência de nós para o caminho proposto pode ser vista na Figura 19.

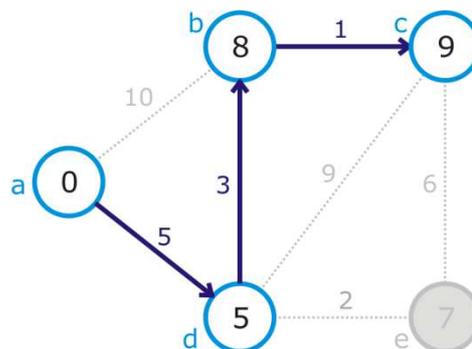


Figura 19 - Caminho de custo mínimo de *a* até *c*.

## Capítulo 3

### 3. AgriBOT

Neste capítulo é apresentado o robô agrícola AgriBOT, veículo com o qual serão desenvolvidas atividades na área de robótica móvel para aplicações na agricultura. São também apresentadas as partes constituintes desta plataforma e a função de cada uma.

O AgriBOT, mostrado na Figura 20, é um veículo autônomo que deverá locomover-se a um campo agrícola, realizar um determinado número de tarefas para o qual foi programado, visando aquisição de dados e pesquisas relacionadas ao sensoriamento remoto e retornar à sua base (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).



Figura 20 - Robô agrícola AgriBOT (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

O projeto do veículo foi desenvolvido através da parceria entre a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP) e a empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A, sendo financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

Ainda segundo Portal de Robótica Agrícola (2012), a plataforma robótica é composta por dois subsistemas:

- Plataforma robótica base;
- Módulos complementares.

### 3.1. Plataforma robótica base

Construída pela empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A, a plataforma base é constituída por uma estrutura contendo sistemas mecânicos e eletrônicos. Trata-se de um veículo com quatro rodas, autopropelido por motor diesel e sistema de transmissão hidrostático, com sistema de esterçamento nas quatro rodas e suspensão pneumática independente. O esterçamento utilizado no veículo permite deslocamento omnidirecional (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

### 3.2. Módulos complementares

Segundo o Portal de Robótica Agrícola (2012), os módulos complementares são subsistemas que devem realizar tarefas específicas, possibilitando o uso do veículo para diversos fins. Os módulos são:

- Localização e navegação;
- Visão computacional;
- Comunicação sem fio;
- Sensoriamento de parâmetros agrícolas;
- Braço robótico;
- Plataforma estabilizada

#### 3.2.1. Localização e navegação

O objetivo deste trabalho está inserido neste módulo e, juntamente com outros trabalhos desenvolvidos pelo grupo multidisciplinar responsável pelo projeto, deve promover a localização e permitir a navegação do veículo. Para tanto, deve utilizar sistemas de GPS, sensores inerciais, sensores de varredura a *laser* e, através do processamento dos

dados dos sensores por softwares desenvolvidos pelo grupo, determinar a localização do veículo em seu local de trabalho. Assim, este módulo deve empregar um navegador global (baseado em um mapa topológico georreferenciado da área de trabalho) e um navegador local para, de acordo com a localização do veículo, determinar a trajetória ótima para percorrer a rota pré-estabelecida (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

### **3.2.2. Visão computacional**

Sistema de aquisição e análise de imagens para utilização em conjunto com os sistemas de navegação, sensoriamento de parâmetros agrícolas e comunicação sem fio (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

### **3.2.3. Comunicação sem fio**

Responsável pela troca de dados entre a plataforma robótica e a estação de operação, fornece mobilidade à plataforma (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

### **3.2.4. Sensoriamento de parâmetros agrícolas**

Emprega sensores capazes de mensurar as grandezas agrícolas de interesse a fim de reduzir o trabalho antes feito por mão de obra humana e aumentar a confiabilidade das informações, fazendo-as de forma automática (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

Este trabalho visa posicionar a plataforma no ponto definido ou através do caminho definido pelas missões para realização do sensoriamento.

### **3.2.5. Braço robótico**

Segundo o Portal de Robótica Agrícola (2012), este módulo é constituído por um braço articulado capaz de realizar intervenções e coletar de amostras necessárias ao módulo de sensoriamento.

### **3.2.6. Plataforma estabilizada**

Estrutura estabilizada para acoplamento dos módulos de visão, sensoriamento e braço articulado. Tem como objetivo garantir estabilidade a estes módulos para que possam realizar suas funções sem que as perturbações da plataforma robótica prejudiquem seu funcionamento (PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA, 2012).

## Capítulo 4

# 4. DESENVOLVIMENTO DO NAVEGADOR GLOBAL

Dentre os módulos complementares apresentados no capítulo anterior, este trabalho está inserido no item 3.2.1, Localização e navegação, e sua contribuição para este módulo através da elaboração de um navegador global baseado em mapas georreferenciados.

O desenvolvimento do navegador foi dividido em etapas para facilitar a implementação e o entendimento. A ordem das etapas seguiu a seguinte sequência:

1. Mapeamento da área de interesse;
2. Análise e processamento dos dados;
3. Relacionamento entre os pontos do mapeamento;
4. Definição das missões e cálculo do caminho de custo mínimo;
5. Cálculo do ângulo de direção ou *heading*;
6. Cálculo ponto a ponto do raio de giro;
7. Cálculo da velocidade máxima de deslocamento.

### 4.1. Etapa 1 - Mapeamento da área de interesse

Para desenvolvimento do algoritmo de navegação foram utilizados dados obtidos através de mapeamento realizado durante a colheita de café por uma máquina colhedora de café modelo *K3 MILLENNIUM*, fabricada pela empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A. A colhedora K3 é mostrada na Figura 21.

O mapeamento realizado por tais máquinas é armazenado em um módulo coletor de dados desenvolvido para salvar informações de colheita ou pulverização de máquinas agrícolas referenciadas à posição geográfica para posterior processamento e visualização em *softwares* de monitoramento GIS. O hardware do módulo é responsável pela recepção das informações e processamento dos dados. A este módulo estão conectados um receptor de

sinal GPS modelo 18 PC, da *Garmin International*, e um dispositivo de armazenamento em massa (por exemplo, *pen drive*) onde são armazenadas as informações recebidas, tais como sentença *Recommended minimum specific GPS/Transit data* (RMC), protocolo NMEA padrão 0183, e dados de pulverização (área pulverizada, volume pulverizado, dose aplicada, velocidade da máquina) ou colheita (área colhida, quantidade colhida, velocidade da máquina). Para fornecer maior autonomia ao sistema, as informações são compactadas através de um *software* proprietário e então armazenadas no dispositivo de armazenamento.



Figura 21 - Colhedora K3 MILLENNIUM.  
(Fonte: [www.jacto.com.br/pt/produto/detalhes/11/K3-MILLENNIUM](http://www.jacto.com.br/pt/produto/detalhes/11/K3-MILLENNIUM))

De acordo com o manual do receptor, a sentença RMC corresponde a um conjunto de informações mínimas de GPS e trânsito. O formato da sentença pode ser observado a seguir (GARMIN, 2012).

```
$GPRMC,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,<10>,<11>,<12>*hh<CR><LF>
```

Onde,

- <1> Hora;
- <2> Estado, A = ativo, V = não válido;
- <3> Latitude;
- <4> Hemisfério, Norte (N) ou Sul (S);
- <5> Longitude;
- <6> Hemisfério, Leste (E) ou Oeste (W);

- <7> Velocidade sobre o solo;
- <8> Direção sobre o solo;
- <9> Data;
- <10> Variação magnética;
- <11> Direção da variação magnética;
- <12> Indicador de modo;
- \*hh *Checksum*;
- <CR> *Carriage return*;
- <LF> *Line feed*

Durante o mapeamento da região, as informações referentes à máquina como área colhida, quantidade colhida e velocidade da máquina foram desprezadas, sendo somente utilizadas as informações de longitude e latitude.

A Figura 22 mostra uma área mapeada. Os pontos correspondem às coordenadas geográficas de cada posição.

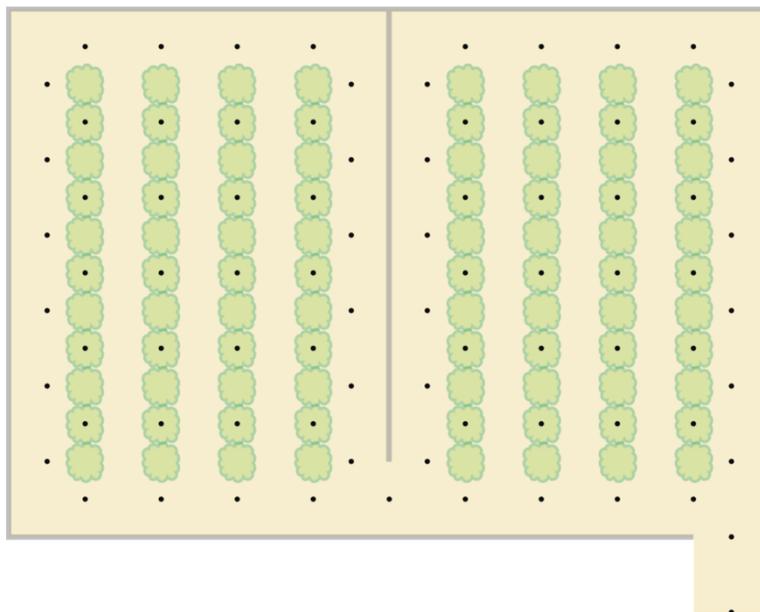


Figura 22 - Área mapeada.

Como a velocidade média utilizada durante a colheita para o modelo de máquina mostrada na Figura 21 varia entre 0,8 km/h a 1,2 km/h, uma grande quantidade de dados é gerada. Com o intuito de reduzir a quantidade de dados para geração dos mapas utilizados

neste trabalho, foram selecionadas amostras com distância entre cinco a dez metros.

## 4.2. Etapa 2 - Análise e processamento dos dados

A etapa de análise e processamento dos dados consiste em separar as informações relevantes da sentença RMC e adequar os dados para a etapa seguinte.

De acordo com o manual do receptor, as unidades dos dados de longitude e latitude fornecidas na sentença RMC e armazenados no dispositivo encontram-se em graus, minutos e frações de minuto (GARMIN, 2012). Os parâmetros dos algoritmos utilizados na etapa seguinte necessitam de coordenadas expressas em graus. Desta forma, os dados foram convertidos e foram atribuídos sinais negativos para coordenadas de longitude a oeste do meridiano de Greenwich (longitude 0°) e coordenadas de latitude ao sul da linha do Equador (latitude 0°).

A Tabela 7 mostra um exemplo de conjunto de pontos obtidos através do mapeamento e os mesmos após processamento.

Tabela 7 - Exemplo de pontos da sentença RMC e pontos processados

Pontos retirados da sentença RMC				Pontos processados	
Latitude		Longitude		Latitude	Longitude
18°14.366800'	Sul	45°58.089400'	Oeste	-18.239447°	-45.968157°
18°14.365200'	Sul	45°58.090100'	Oeste	-18.239420°	-45.968168°
18°14.363600'	Sul	45°58.090800'	Oeste	-18.239393°	-45.968180°
18°14.358000'	Sul	45°58.093600'	Oeste	-18.239300°	-45.968227°

## 4.3. Etapa 3 - Relacionamento entre os pontos do mapeamento

O procedimento utilizado para atribuir o relacionamento entre os pontos do mapeamento segue as premissas:

- Pontos internos a um caminho são considerados acessíveis entre si;
- Pontos externos de dois caminhos consecutivos são considerados acessíveis entre

si desde que não exista restrição física no terreno;

- Pontos entre dois caminhos são inacessíveis desde que não se aplique a regra anterior.

Os pontos foram interligados e todos os caminhos possíveis são mostrados nas figuras a seguir. A Figura 23 mostra a inclusão de relacionamento entre os pontos da região mapeada. Para entendimento do conceito de relacionamento, pontos acessíveis diretamente entre si são ligados por uma linha (linha preta).

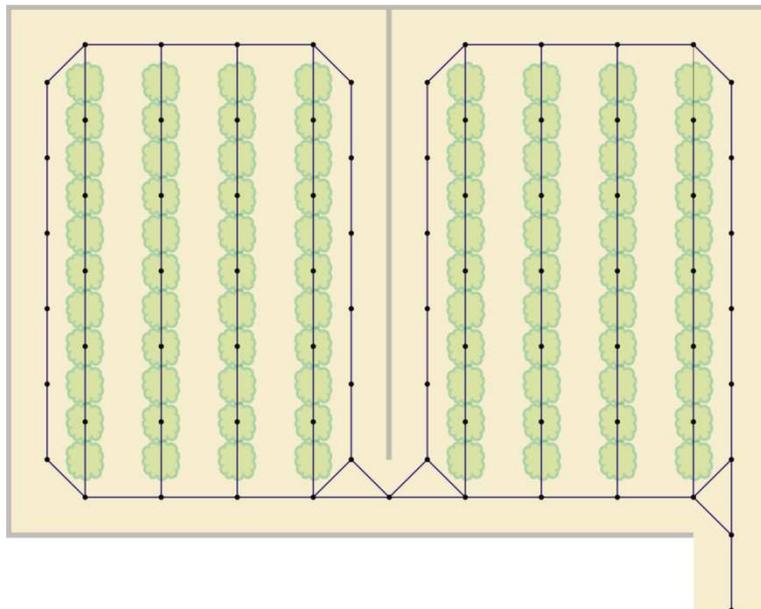


Figura 23 - Relacionamento entre os pontos da área mapeada.

Observa-se na Figura 23 que há uma restrição entre o conjunto de pontos do lado esquerdo e o conjunto do lado direito, simulado como sendo uma cerca. Pode-se verificar que o relacionamento entre os lados só ocorre na parte inferior.

Na prática, o relacionamento consiste em inserir a distância entre pontos que se relacionam e inserir um valor muito grande para pontos que não se relacionam na matriz utilizada no algoritmo de Dijkstra. Uma implicação existente nesta etapa é determinar a distância entre duas coordenadas geográficas.

Devido ao formato da Terra, o cálculo da distância exata entre dois pontos em sua superfície não é simples pois se deve levar em consideração o relevo do terreno. Aproximações podem ser feitas para estimar a distância entre os pontos. Segundo Hijmans

*et al.* (2010), uma aproximação simples e com precisão aceitável que pode ser utilizada para o cálculo da distância é considerar o formato de Terra como sendo uma esfera e utilizar a equação de haversine, proposta por R. W. Sinnott em 1984. Outra solução para o problema seria utilizar a equação de Vincenty, que produz resultados mais precisos por adotar o formato da Terra descrito pelo esferóide WGS84 (mais próximo do real) mas aumenta a complexidade de implementação. Devido à maior complexidade de implementação da equação de Vincenty, optou-se pela utilização daquela equação.

A equação de haversine utiliza a função *hav* para calcular a distância entre dois pontos na superfície de uma esfera (SINNOTT, 1984).

Considerando uma esfera de raio unitário, um triângulo esférico na superfície da esfera formado pelos pontos **u**, **v** e **w** é definido por grandes círculos, ou seja, círculos que dividem a esfera em dois hemisférios, conforme mostrado na Figura 24.

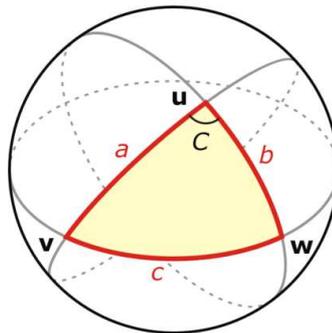


Figura 24 - Triângulo esférico.

Se o comprimento dos três lados são  $a$  (de **u** até **v**),  $b$  (de **u** até **w**) e  $c$  (de **v** até **w**), e o ângulo no lado oposto de  $c$  é  $C$ , a Lei dos haversines estabelece que:

$$\text{hav}(\sin(c)) = \text{hav}(\sin(a - b)) + \sin(a)\sin(b)\text{hav}(\sin(C)) \quad (1)$$

Como a esfera mostrada na Figura 24 possui raio unitário, os comprimentos  $a$ ,  $b$  e  $c$  são iguais, em radianos, aos ângulos formados pelos pontos nas extremidades dos arcos e o centro da esfera, como pode ser visto na Figura 25. Esta mostra o plano formado pelo grande círculo que forma o lado de comprimento  $a$  do triângulo esférico.

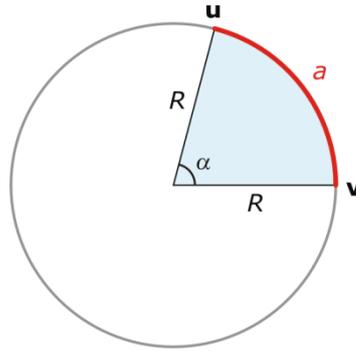


Figura 25 - Arco de comprimento  $a$ .

A prova pode ser obtida utilizando a equação de arco de circunferência

$$a = \alpha R \quad (2)$$

Considerando  $R=1$ , então

$$a = \alpha \quad (3)$$

Para se obter a equação de haversine, algumas considerações devem ser feitas:

- $\mathbf{u}$  é considerado o ponto correspondente o polo norte da Terra (latitude  $90^\circ$ ),
- $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{w}$  são dois pontos cuja distância  $d$  será determinada,
- $C$  é a diferença de longitude que separa  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{w}$ ,
- $c$  é o comprimento  $d/R$  desejado,
- $R$  é o raio da Terra.

Desta forma, pode-se reescrever a Lei dos haversines mostrada na equação (1) da seguinte maneira:

$$\text{hav}\left(\frac{d}{R}\right) = \text{hav}(\phi_2 - \phi_1) + \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi_2\right) \text{hav}(\psi_2 - \psi_1) \quad (4)$$

Como

$$\text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \cos(\phi) \quad (5)$$

Então,

$$\text{hav}\left(\frac{d}{R}\right) = \text{hav}(\phi_2 - \phi_1) + \cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\text{hav}(\psi_2 - \psi_1) \quad (6)$$

A função *hav* é dada por:

$$\text{hav}(\varphi) = \text{sen}^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (7)$$

Renomeando

$$h = \text{hav}\left(\frac{d}{R}\right) \quad (8)$$

Obtém-se então que

$$d = R \text{hav}^{-1}(h) = 2R \text{arcsen}\sqrt{h} \quad (9)$$

Então, substituindo as equações (7), (8) e (9) na equação (6) obtém-se a equação de haversine, mostrada na equação (10),

$$d = 2R \text{arcsen}\sqrt{\text{sen}^2\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) + \cos(\phi_1)\cos(\phi_2)\text{sen}^2\left(\frac{\psi_2 - \psi_1}{2}\right)} \quad (10)$$

Onde,

$d$  é a distância entre dois pontos na superfície da esfera, em quilômetros,

$R$  é o raio da esfera, em quilômetros,

$\phi_1, \phi_2$  correspondem às latitudes do ponto 1 e do ponto 2, em graus,

$\psi_1, \psi_2$  correspondem às longitudes do ponto 1 e do ponto 2, em graus.

#### 4.4. Etapa 4 - Definição das missões e cálculo do caminho de custo mínimo

As missões consistem em sair de uma determinada posição e chegar até a posição de interesse percorrendo a menor distância possível. O objetivo do ponto de interesse é simular um ponto dentro de uma cultura onde deve ser feita a análise do solo ou a análise de uma planta para posterior tratamento. A Figura 26 mostra pontos de interesse dentro da área mapeada. Os pontos de interesse devem ser pontos pertencentes ao conjunto de pontos do mapeamento.

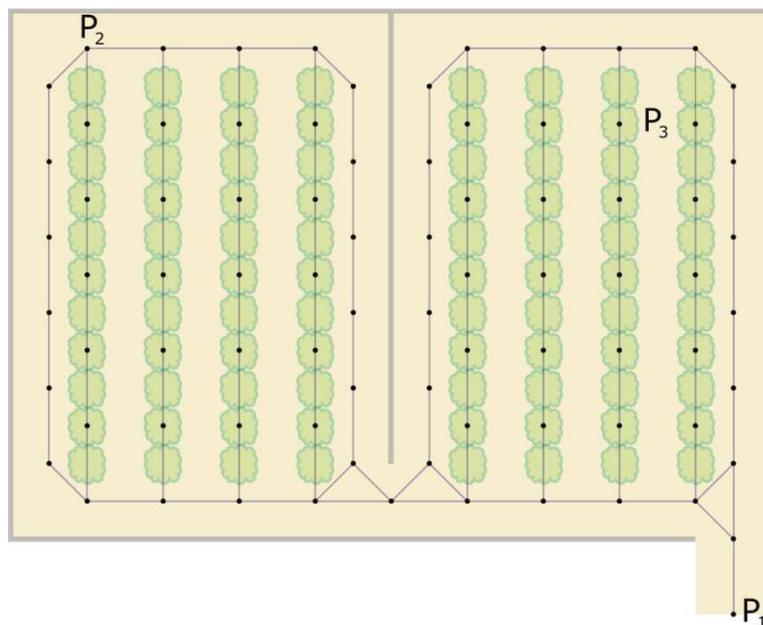


Figura 26 - Pontos de interesse P1, P2 e P3.

A partir dos pontos de interesse são definidas missões. Como citado anteriormente, o objetivo de cada missão é chegar até o ponto de interesse. Para calculá-la utilizou-se o algoritmo de Dijkstra, desenvolvido por Edsger Wybe Dijkstra em 1959. Dijkstra (1959) propõe uma estrutura de dados constituída por nós e entre estes há pelo menos um ramo interligando-os. A interligação recebe um valor não negativo denominado custo. Assim, através de sucessivas iterações, o algoritmo encontra o caminho de custo mínimo e os nós pertencentes a este caminho podem ser recuperados. Assim, os nós aos quais o algoritmo se refere são os pontos amostrados (coordenadas geográficas) e custos são as distâncias entre duas coordenadas, calculadas na etapa anterior.

A Figura 27 mostra a missão 1 que consiste em sair do ponto  $P_1$  e chegar ao ponto  $P_2$  através do caminho ótimo, representado pela linha em vermelho.

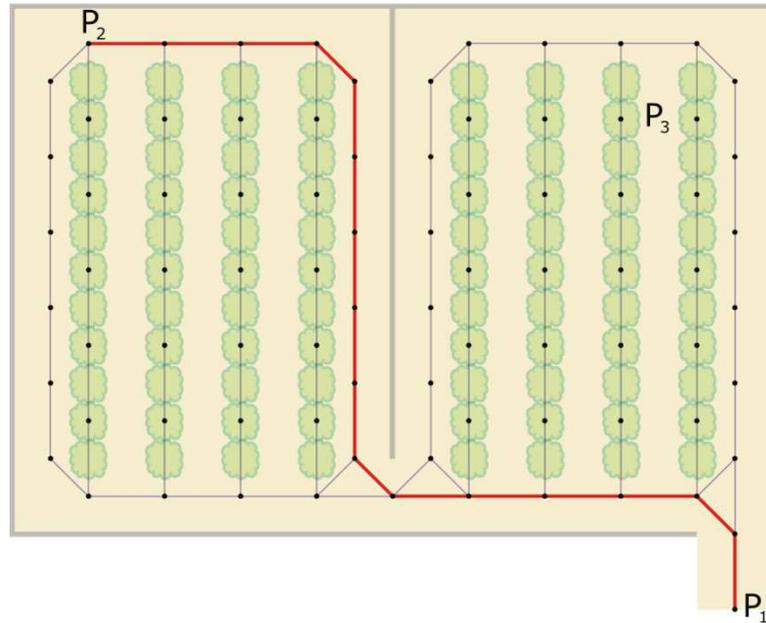


Figura 27 - Missão 1 -  $P_1 \rightarrow P_2$ .

A Figura 28 mostra a missão 2 que consiste em sair do ponto  $P_2$  e chegar ao ponto  $P_3$  através do caminho ótimo, representado pela linha em vermelho.

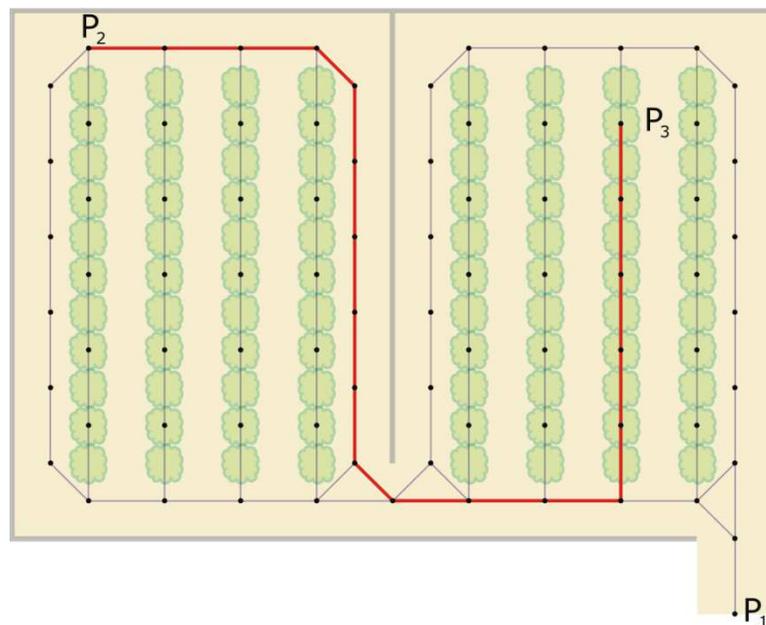


Figura 28 - Missão 2 -  $P_2 \rightarrow P_3$ .

#### 4.5. Etapa 5 - Cálculo do ângulo de direção ou *heading*

O ângulo de direção ou *heading* é então calculado para fornecer a informação de orientação ao veículo. Como referência, adotou-se o ângulo zero de direção como sendo o eixo correspondente ao Norte geográfico ou verdadeiro, convenção esta utilizada por um grande número de sistemas de navegação para o cálculo do ângulo de direção. A padronização de sinais em relação ao zero pode ser vista na Figura 29.

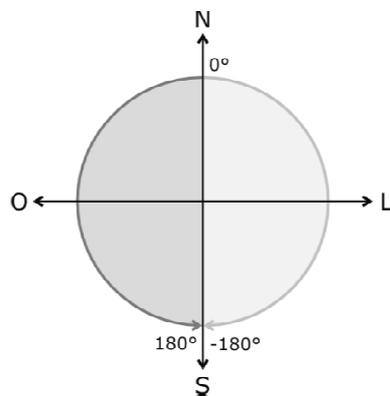


Figura 29 - Padronização do ângulo de direção.

Pode-se observar na Figura 29 que foi adotada a seguinte notação:

- Se o ângulo de direção possuir resultante à direita do eixo do Norte verdadeiro recebe sinal negativo;
- Caso contrário, positivo.

Um exemplo de ângulos de direção pode ser observado na Figura 30, onde verifica-se que:

- $\delta_1, \delta_2$  são positivos pois estão localizados à esquerda do vetor  $\vec{N}$ , o qual é paralelo ao eixo do Norte geográfico e aponta para ele;
- $\delta_3$  é negativo pois está localizado à direita do vetor  $\vec{N}$ , o qual é paralelo ao eixo do Norte geográfico e aponta para ele.

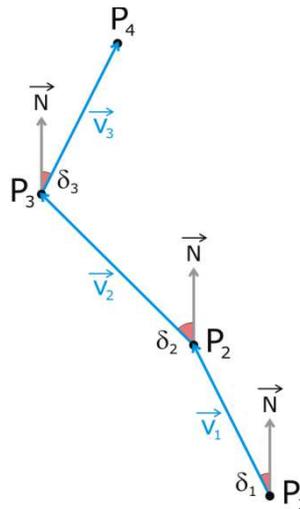


Figura 30 - Ângulos de direção.

De maneira geral, o ângulo de direção  $\delta_N$  pode ser obtido através da equação (11):

$$\delta_N = \arccos \frac{(\vec{v}_N \cdot \vec{N})}{\|\vec{v}_N\| \|\vec{N}\|} \quad (11)$$

Onde,

$\delta_N$  é o n-ésimo ângulo formado entre  $\vec{v}_N$  e  $\vec{N}$ ,

$\vec{v}_N$  é o n-ésimo vetor determinado pelos pontos  $P_{N+1}$  e  $P_N$ ,

$\vec{N}$  é o vetor cuja direção é paralela ao eixo e o sentido indica o Norte verdadeiro,

$\vec{v}_N \cdot \vec{N}$  representa o produto escalar entre os vetores,

$\|\vec{v}_N\|, \|\vec{N}\|$  correspondem à norma dos vetores.

A posição em relação ao lado do eixo pode ser calculada através da equação (12):

$$\vec{v}_N \times \vec{N} \quad (12)$$

Onde,

$\vec{v}_N \times \vec{N}$  representa o produto vetorial entre os vetores.

Assim, se o resultado do produto vetorial dado pela equação (12) apresentar

componente na direção  $-\vec{z}$ , o vetor  $\vec{v}_N$  está localizado à esquerda do eixo e, portanto, é positivo. Caso contrário, negativo.

#### 4.6. Etapa 6 - Cálculo ponto a ponto do raio de giro

O propósito do cálculo do raio de giro em cada ponto do mapeamento é suavizar mudanças bruscas no ângulo de direção. Para o cálculo do raio de giro foram feitas as seguintes considerações:

- Esterçamento nas quatro rodas do AgriBOT,
- O centro instantâneo de rotação (ICR) foi fixado para permanecer sobre a linha longitudinal que passa pelo centro de massa do veículo através da adoção do deslocamento angular do ICR nulo ( $\beta = 0$ ).

A Figura 31 mostra as condições possíveis do deslocamento angular do ICR.

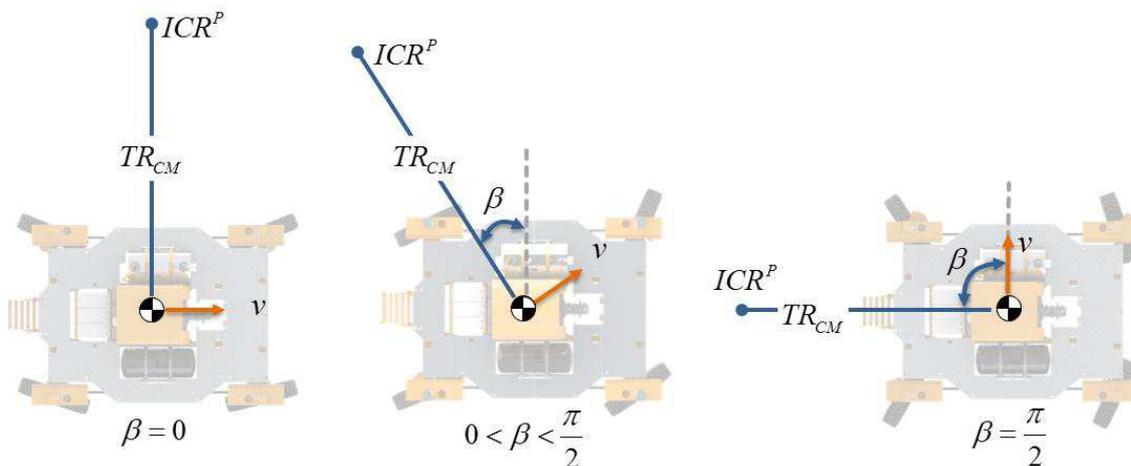


Figura 31 - Condições de deslocamento do ICR (TABILE, 2012).

O principal motivo para a suavização das curvas é permitir a continuidade do movimento do veículo em determinadas situações onde, sem tal artifício, seria necessário que o veículo reduzisse muito a velocidade para mudar de ângulo de direção. O veículo deve deixar o ponto descrevendo a trajetória da circunferência da qual o ponto de saída é tangente e chegar ao próximo ponto sem que sejam necessárias grandes correções no

ângulo de direção, uma vez que este também pode ser considerado tangente à circunferência, com as devidas tolerâncias.

A Figura 32 mostra o trajeto determinado para a missão 2 com a suavização de algumas curvas.

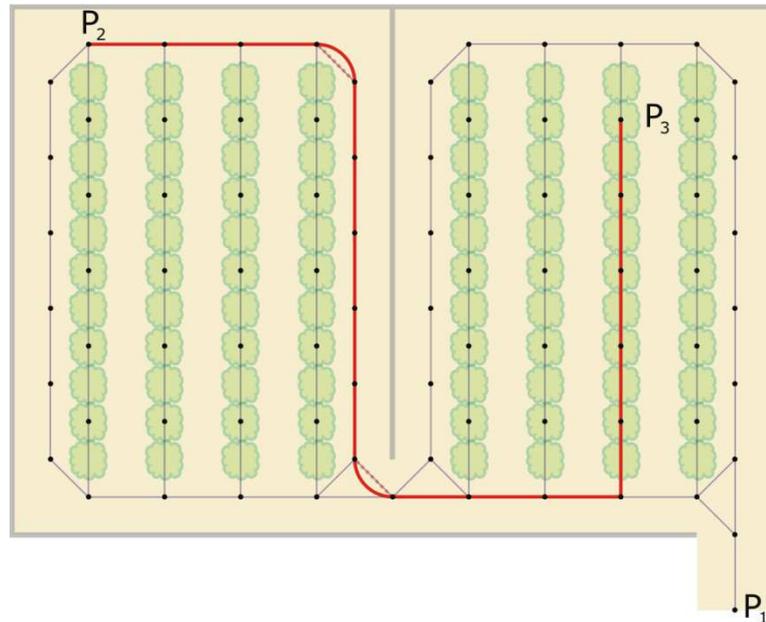


Figura 32 - Suavização de curvas.

A suavização pode ser vista com mais detalhes na Figura 33.

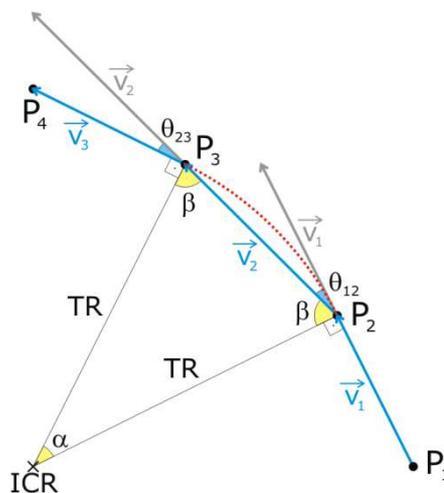


Figura 33 - Exemplo de aplicação da suavização de curvas.

Na Figura 33 pode-se verificar que, atendidas as condições necessárias, a mudança do ângulo de direção no ponto  $P_2$  pode ser tornada mais suave através de um arco de

circunferência entre  $P_2$  e  $P_3$ , com raio de giro  $TR$ .

Condições necessárias:

- $5^\circ \leq \theta_{12}, \theta_{23} \leq 95^\circ$ ,
- $|\theta_{12} - \theta_{23}| \leq 10^\circ$ ,
- $\theta_{12}, \theta_{23}$  devem possuir o mesmo sinal.

A condição  $|\theta_{12} - \theta_{23}| \leq 10^\circ$  foi imposta para não possibilitar grandes variações entre os ângulos de saída de um ponto e chegada ao próximo, fato que requereria correções adicionais no ângulo de direção, contrariando a ideia de suavização deste ângulo.

Obedecendo-se as condições propostas, pode-se determinar o valor de raio de giro  $TR$  da Figura 33 através da equação (13), correspondente a um rearranjo da equação de corda de circunferência:

$$TR = \frac{\|\vec{v}_2\|}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (13)$$

É fácil provar que

$$\alpha = 180 - 2\beta = \theta_{12} + \theta_{23} \quad (14)$$

Reescrevendo a equação (13),

$$TR = \frac{\|\vec{v}_2\|}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{12} + \theta_{23}}{2}\right)} \quad (15)$$

A equação (15) pode ser reescrita para ser utilizada em qualquer ponto do trajeto definido para a missão:

$$TR_N = \frac{\|\vec{v}_N\|}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_{N-1,N} + \theta_{N,N+1}}{2}\right)} \quad (16)$$

Onde,

$TR_N$  é o n-ésimo raio de giro,

$\vec{v}_N$  é o n-ésimo vetor determinado pelos pontos  $P_{N+1}$  e  $P_N$ ,

$\theta_{N-1,N}, \theta_{N,N+1}$  correspondem aos ângulos entres os vetores  $\vec{v}_{N-1}$ ,  $\vec{v}_N$  e  $\vec{v}_{N+1}$ .

A Figura 34 exemplifica um caso em que as condições necessárias para o cálculo do raio de giro não foram atendidas.

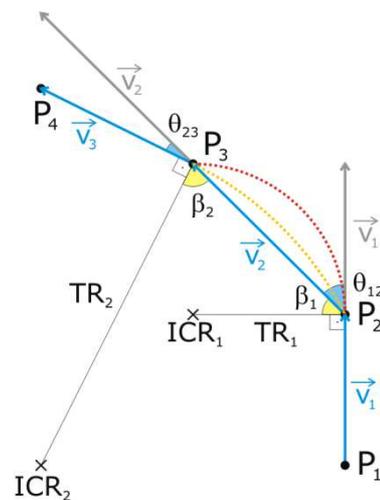


Figura 34 - Condições insuficientes para a suavização de curvas.

Pode-se notar que a condição  $|\theta_{12} - \theta_{23}| \leq 10^\circ$  não foi atendida. Desta forma, o ponto de saída do veículo é tangente a uma circunferência de raio  $TR_1$  mas o próximo ponto não é tangente a esta circunferência, sendo tangente a uma circunferência de raio  $TR_2$ . Desta forma, a tentativa de suavização de curva ocasionou uma alteração no ângulo de direção maior do que a condição original.

#### 4.7. Etapa 7 - Cálculo da velocidade máxima de deslocamento

A velocidade escalar máxima de deslocamento foi calculada em função dos valores de ângulo de direção e raio de giro. Trata-se apenas de uma sugestão de velocidade para ser utilizada pelo navegador local. As condições para limitação de velocidade foram baseadas no

modelamento do AgriBOT feito por Rubens André Tabile. Tabile (2012) impôs a limitação de que a velocidade angular máxima permitida para o veículo deve ser de  $0,314 \text{ rad/s}$  por questão de segurança, evitando o tombamento do veículo.

Desta forma, a velocidade foi calculada de acordo com:

- Se  $TR_N = 0$  e  $\Delta\alpha_N \leq 15^\circ \Rightarrow v_{\max N} = 1,66 \text{ m/s}$
- Se  $TR_N = 0$  e  $15^\circ < \Delta\alpha_N \leq 45^\circ \Rightarrow v_{\max N} = 0,56 \text{ m/s}$
- Se  $TR_N = 0$  e  $\Delta\alpha_N > 45^\circ \Rightarrow v_{\max N} = 0,28 \text{ m/s}$
- Se  $TR_N > 0$  e  $0,314TR_N \geq 3,33 \Rightarrow v_{\max N} = 3,33 \text{ m/s}$
- Se  $TR_N > 0$  e  $0,314TR_N < 3,33 \Rightarrow v_{\max N} = 0,314TR_N \text{ m/s}$
- Se  $0,56 \leq v_{\max N} < 1,66$  e  $v_{\max N-1} > 0,56 \Rightarrow v_{\max N-1} = 0,83 \text{ m/s}$
- Se  $v_{\max N} < 0,56$  e  $v_{\max N-1} > 0,56 \Rightarrow v_{\max N-1} = 0,56 \text{ m/s}$

Onde,

$\Delta\alpha_N$  é a variação na posição n-ésima do ângulo de direção,

$v_{\max N}, v_{\max N-1}$  correspondem à velocidade na posição n-ésima e anterior, respectivamente.

As limitações impostas no cálculo da velocidade foram feitas para garantir a locomoção do veículo de acordo com o raio de giro calculado. Para os casos onde o raio de giro é nulo, a limitação foi feita em função da variação do ângulo de direção. Nos casos de raio de giro não nulo, levou-se em consideração a velocidade angular do veículo. Outra imposição feita para a velocidade foi não permitir redução abrupta da mesma, limitando a velocidade do ponto anterior se a velocidade calculada para o ponto atual for baixa.

Com a conclusão desta etapa, um arquivo contendo todos os valores calculados para cada missão é gerado a fim de auxiliar o navegador local do veículo. Os algoritmos utilizados foram implementados utilizando o *software* MATLAB 2010 e encontram-se no Apêndice B.

## Capítulo 5

### 5. RESULTADOS

O método de desenvolvimento do navegador global foi testado utilizando três casos:

- Caso 1 – Região de Pompéia, SP;
- Caso 2 – Região de Garça, SP;
- Caso 3 – Região de Varjão de Minas, MG.

Os casos correspondem a regiões de cultivo de café e foram mapeados utilizando a colhedora K3. Para cada caso foram seguidas as etapas descritas na seção anterior e os resultados serão apresentados caso a caso.

#### 5.1. Caso 1 – Região de Pompéia, SP

A região onde foi feito o mapeamento pode ser vista na Figura 35.



Figura 35 - Área mapeada na região de Pompéia, SP.  
(Fonte: Google Earth, 2012)

Os caminhos percorridos para realizar o mapeamento são mostrados através das linhas vermelhas na Figura 36.



Figura 36 - Caminhos percorridos para mapeamento na região de Pompéia, SP.  
(Fonte: Google Earth, 2012)

O conjunto de pontos foi processado, o relacionamento entre os pontos foi feito e foram adicionados os pontos de interesse. Estas informações são mostradas na Figura 37.

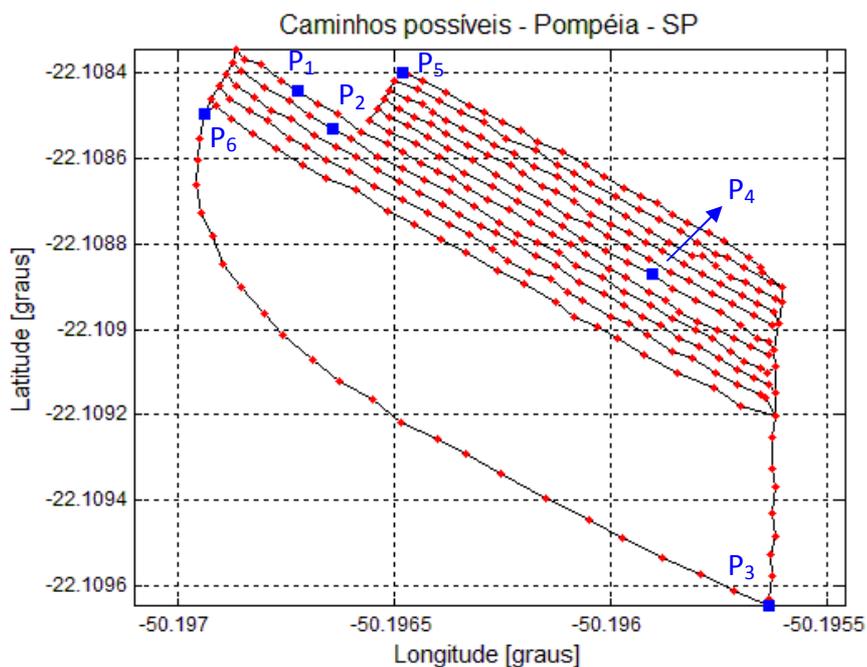


Figura 37 - Caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Pompéia, SP.

Foram então definidas três missões para teste.

### 5.1.1. Missão 1 - Pompéia

A missão 1 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_1$  e atingir o ponto de destino  $P_2$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Pontos de origem e destinos para o caso 1, missão 1

Ponto de origem - $P_1$		Ponto de destino - $P_2$	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-050.196724	-22.108442	-050.196641	-22.108532

A rota calculada para a missão 1 pode ser visualizada na Figura 38.

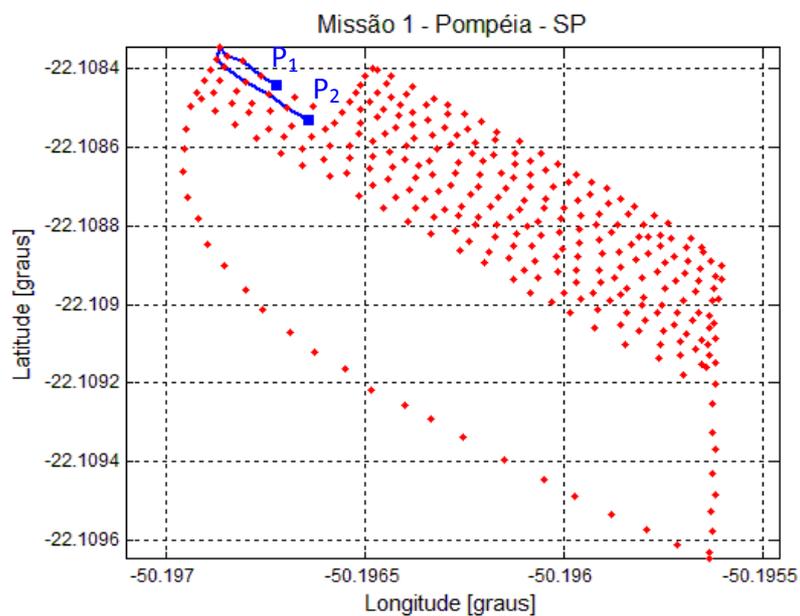


Figura 38 - Rota calculada para a missão 1 (linha azul) –  $P_1 \rightarrow P_2$ .

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 1 foram plotados conforme mostrado na Figura 39. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

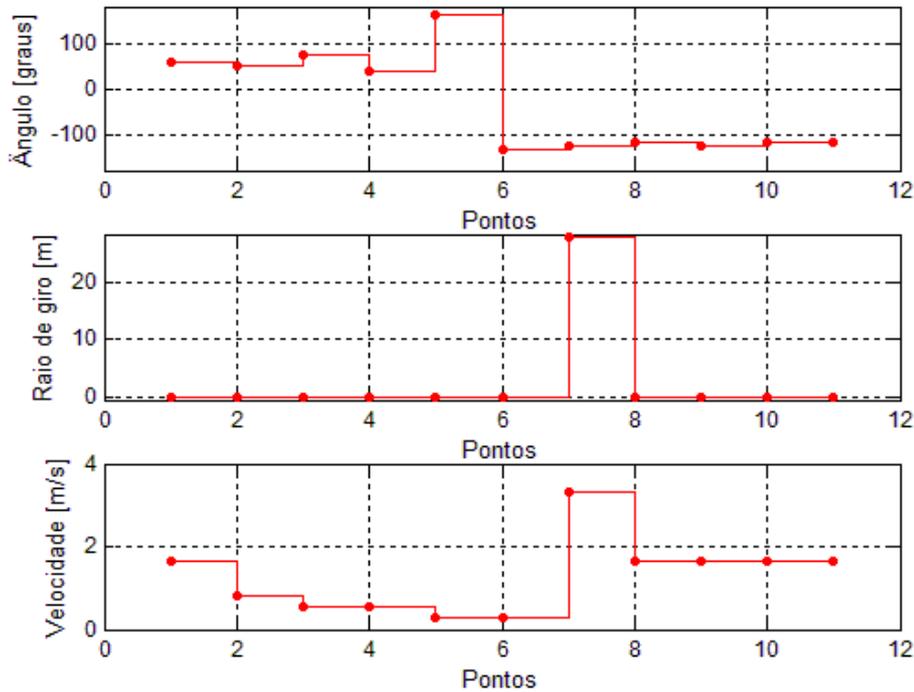


Figura 39 - Dados da missão 1 – P1 → P2.

Observando-se a Figura 39, pode-se verificar que os valores são atribuídos em um ponto e são alterados somente no próximo ponto. Ao observar o ponto 7, pode-se notar que há uma redução no ângulo de direção em relação ao ângulo anterior, indicando que o veículo deverá girar no sentido anti-horário. O valor de raio de giro neste ponto deve ser utilizado para ajustar o ângulo de esterçamento das rodas para que o veículo descreva a circunferência cujo raio foi calculado.

### 5.1.2. Missão 2 - Pompéia

A missão 2 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_3$  e atingir o ponto de destino  $P_4$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Pontos de origem e destinos para o caso 1, missão 2

Ponto de origem - P <sub>3</sub>		Ponto de destino - P <sub>4</sub>	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-050.195635	-22.109644	-050.195902	-22.108871

A rota calculada para a missão 2 pode ser visualizada na Figura 40.

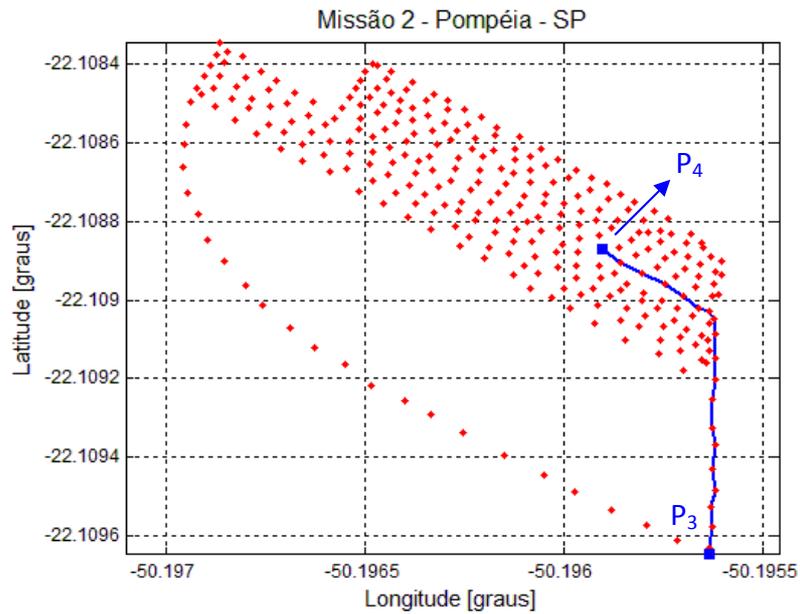


Figura 40 - Rota calculada para a missão 2 (linha azul) – P<sub>3</sub> → P<sub>4</sub>.

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 2 foram plotados conforme mostrado na Figura 41. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

Observando-se a Figura 40, pode-se verificar que foram feitas duas suavizações do ângulo de direção. Pode-se observar também que estas alterações no percurso original possibilitaram o deslocamento com velocidade alta.

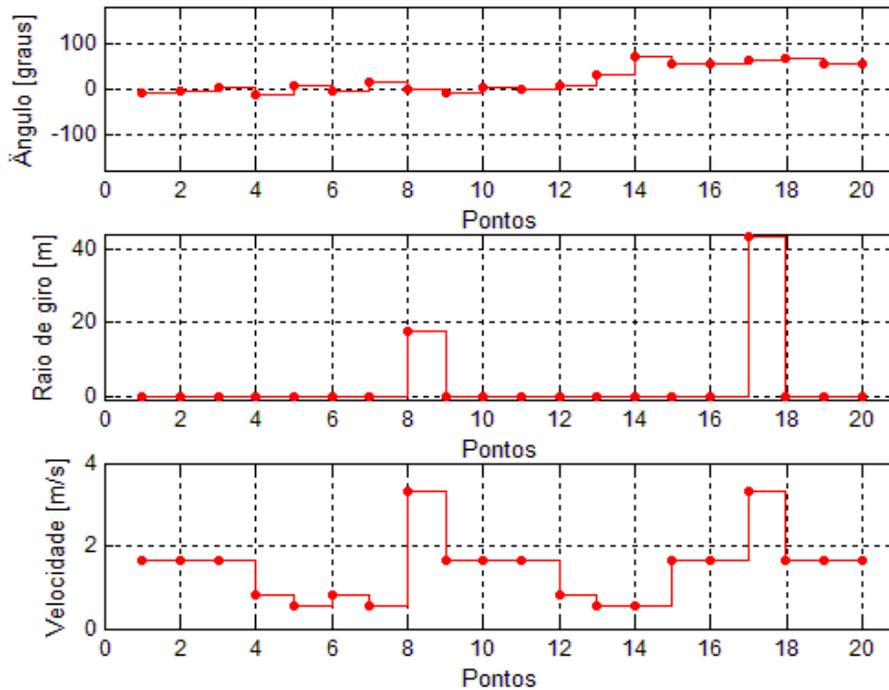


Figura 41 - Dados da missão 2 – P3 → P4.

### 5.1.3. Missão 3 - Pompéia

A missão 3 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_5$  e atingir o ponto de destino  $P_6$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Pontos de origem e destinos para o caso 1, missão 3

Ponto de origem - $P_5$		Ponto de destino - $P_6$	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-050.196480	-22.108399	-050.196940	-22.108498

A rota calculada para a missão 3 pode ser visualizada na Figura 42.



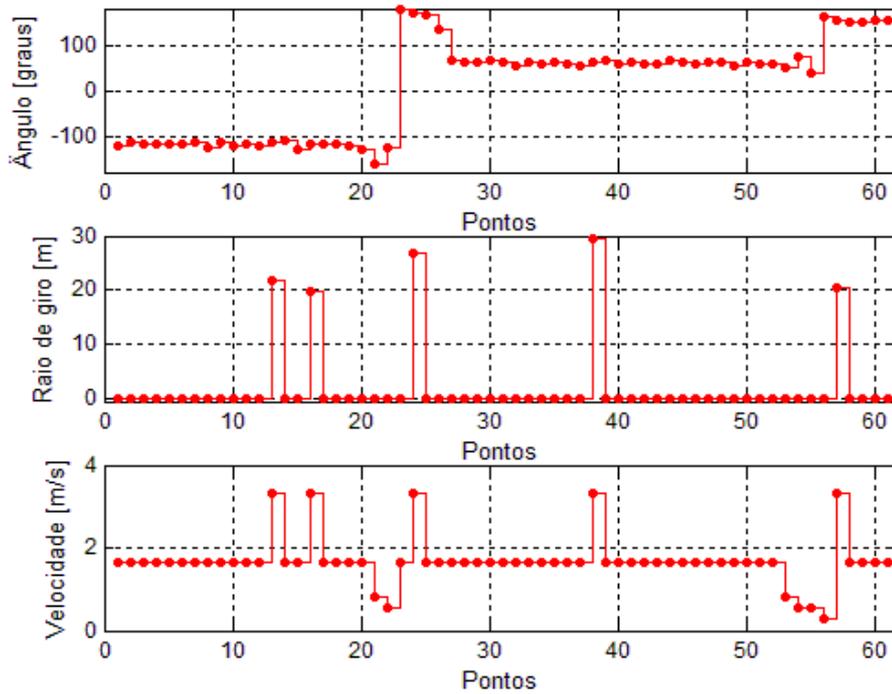


Figura 43 - Dados da missão 2 – P5 → P6.

## 5.2. Caso 2 – Região de Garça, SP

A região onde foi feito o mapeamento pode ser vista na Figura 44.



Figura 44 - Área mapeada na região de Garça, SP.  
(Fonte: Google Earth, 2012)

Os caminhos percorridos para realizar o mapeamento são mostrados através das linhas vermelhas na Figura 45 e Figura 46, em detalhe.



Figura 45 - Caminhos percorridos para mapeamento na região de Garça, SP.  
(Fonte: Google Earth, 2012)



Figura 46 - Detalhe dos caminhos percorridos para mapeamento na região de Garça, SP.  
(Fonte: Google Earth, 2012)

O conjunto de pontos foi processado, o relacionamento entre os pontos foi feito e foram adicionados os pontos de interesse. Estas informações são mostradas na Figura 47 e Figura 48, em detalhe.

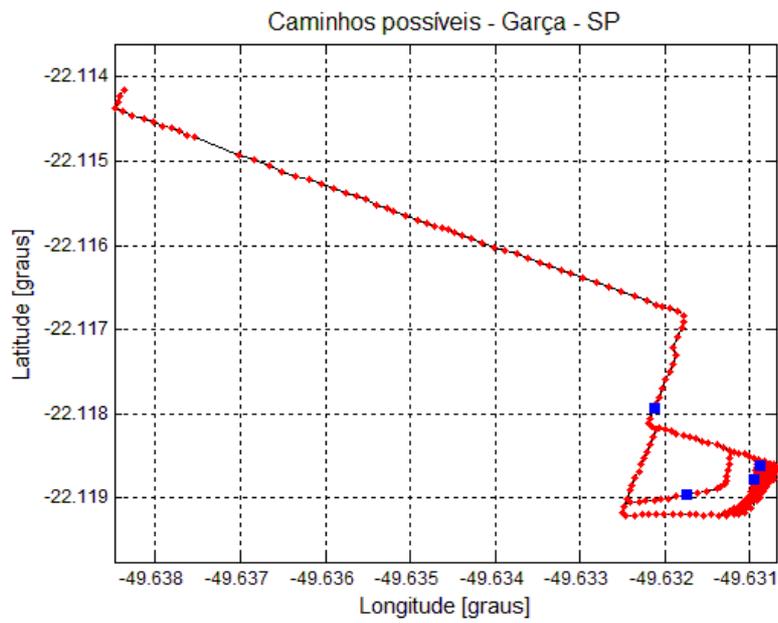


Figura 47 - Caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Garça, SP.

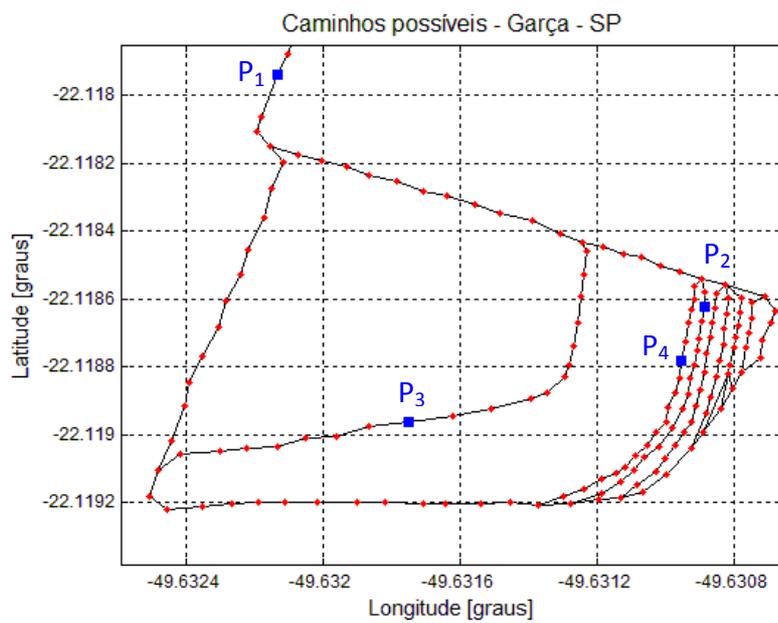


Figura 48 - Detalhe dos caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Garça, SP.

Foram então definidas duas missões para teste.

### 5.2.1. Missão 1 - Garça

A missão 1 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_1$  e atingir o ponto de destino  $P_2$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Pontos de origem e destinos para o caso 2, missão 1

Ponto de origem - $P_1$		Ponto de destino - $P_2$	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-049.632130	-22.117937	-049.630886	-22.118621

A rota calculada para a missão 1 pode ser visualizada na Figura 49.

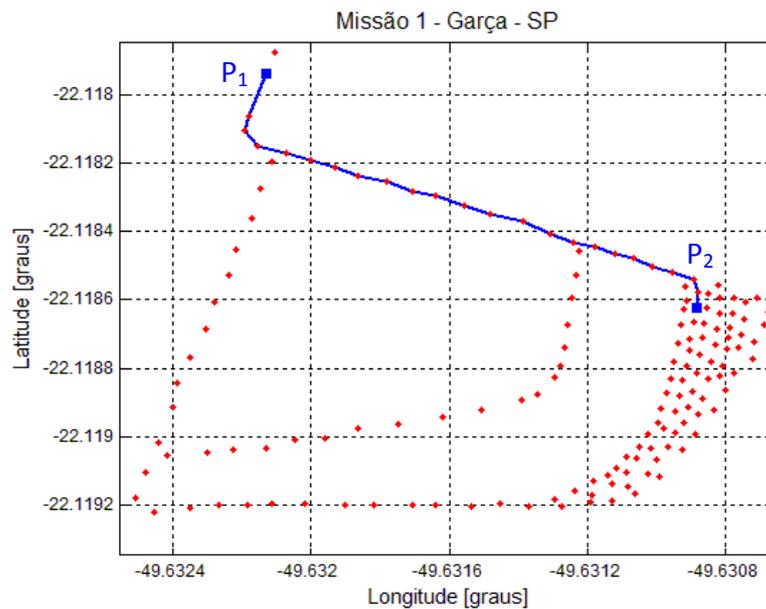


Figura 49 - Rota calculada para a missão 1 (linha azul) –  $P_1 \rightarrow P_2$ .

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 1 foram plotados conforme mostrado na Figura 50. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

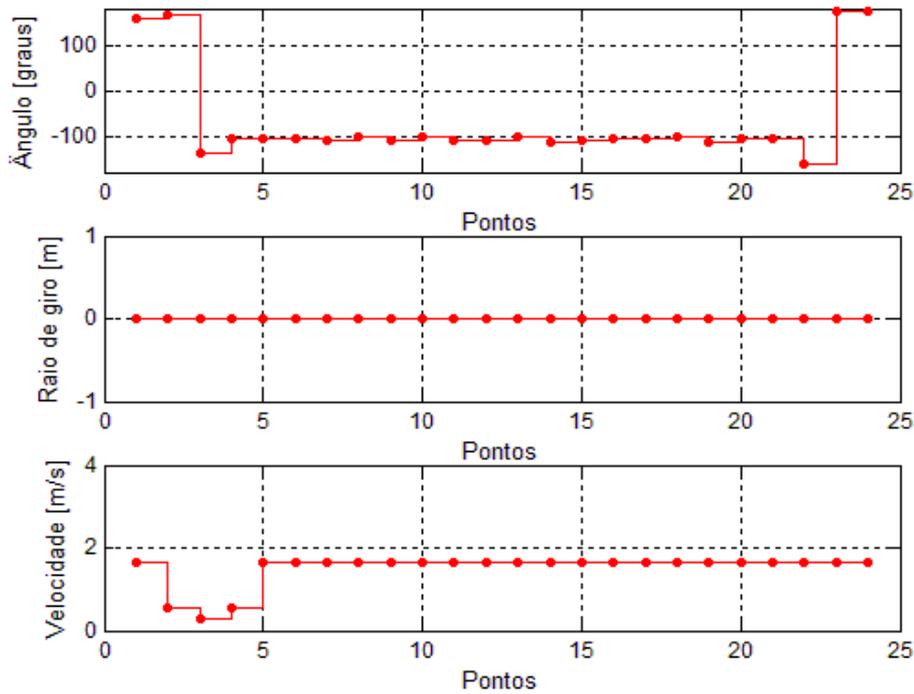


Figura 50 - Dados da missão 1 – P1 → P2.

Observando-se a Figura 50, pode-se verificar que não foram atendidas as condições para suavização do ângulo de direção, fato confirmado pelos valores de raio de giro iguais a zero. Desta forma, a velocidade de deslocamento teve que ser reduzida para o valor mínimo no ponto 3 devido a grande variação no ângulo de direção.

### 5.2.2. Missão 2 - Garça

A missão 2 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_3$  e atingir o ponto de destino  $P_4$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Pontos de origem e destinos para o caso 2, missão 2

Ponto de origem - $P_3$		Ponto de destino - $P_4$	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-049.631750	-22.118964	-049.630951	-22.118781

A rota calculada para a missão 2 pode ser visualizada na Figura 51.

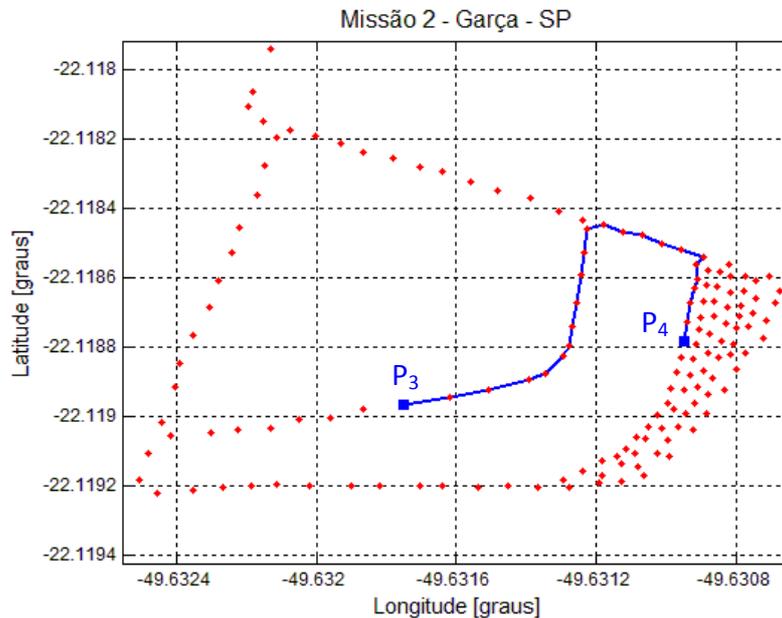


Figura 51 - Rota calculada para a missão 2 (linha azul) – P3 → P4.

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 2 foram plotados conforme mostrado na Figura 52. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

Ao contrário das missões anteriores onde o fato de existir raio de giro maior que zero possibilitava aumento da velocidade, ao observar o ponto 5 da Figura 52, verifica-se que houve redução da velocidade. Isto se deve ao fato de que a velocidade calculada para o ponto seguinte ser baixa. Então, para facilitar o posicionamento no ponto seguinte, a velocidade do ponto 5 foi reduzida.

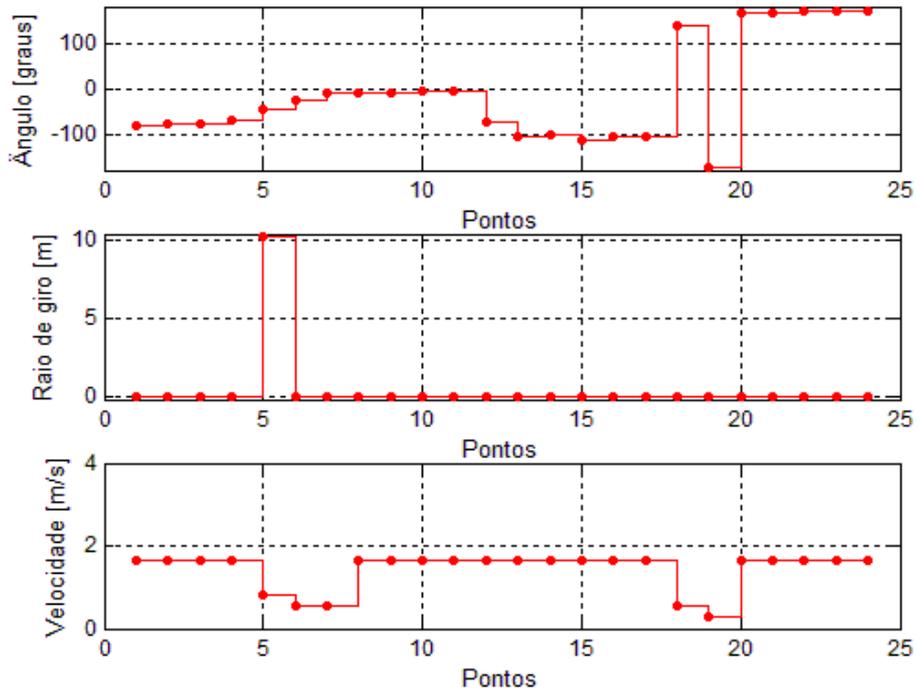


Figura 52 - Dados da missão 2 – P3 → P4.

### 5.3. Caso 3 – Região de Varjão de Minas, MG

A região onde foi feito o mapeamento pode ser vista na Figura 53.



Figura 53 - Área mapeada na região de Varjão de Minas, MG.  
(Fonte: Google Earth, 2012)

Os caminhos percorridos para realizar o mapeamento são mostrados através das linhas vermelhas na Figura 54 e Figura 55, em detalhe.



Figura 54 - Caminhos percorridos para mapeamento na região de Varjão de Minas, MG. (Fonte: Google Earth, 2012)



Figura 55 - Detalhe dos caminhos percorridos para mapeamento na região de Varjão de Minas, MG. (Fonte: Google Earth, 2012)

O conjunto de pontos foi processado, o relacionamento entre os pontos foi feito e foram adicionados os pontos de interesse. Estas informações são mostradas na Figura 56 e Figura 57, em detalhe.

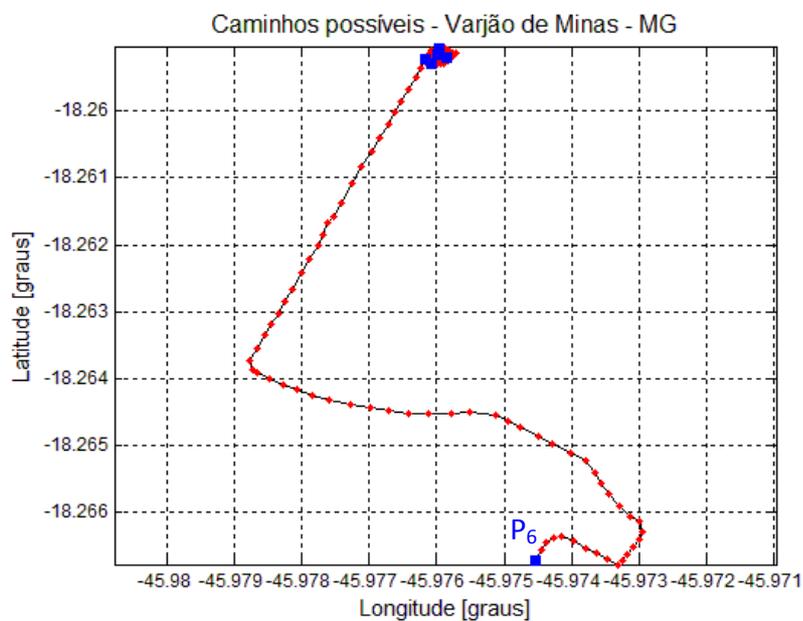


Figura 56 - Caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Varjão de Minas, MG.

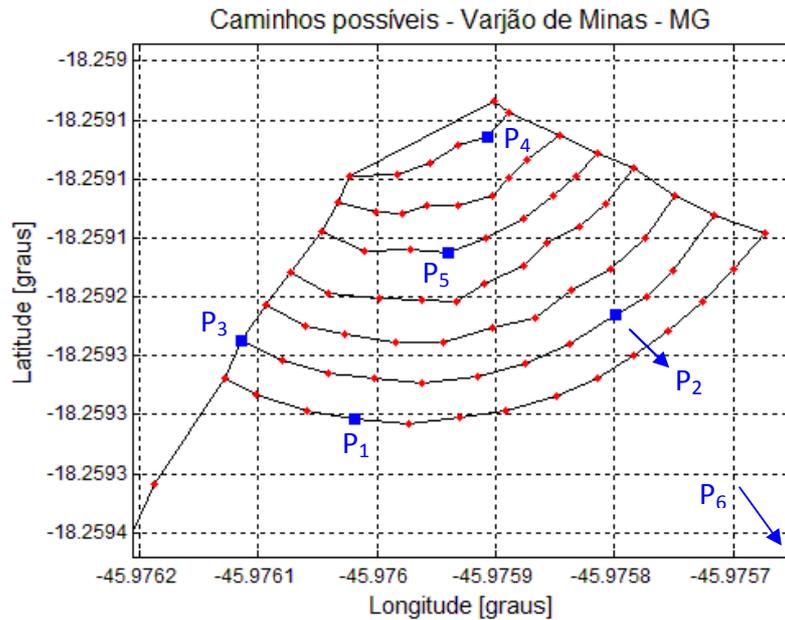


Figura 57 - Detalhe dos caminhos possíveis (linhas em preto), pontos mapeados (vermelho) e pontos de interesse (azul) para o mapeamento na região de Varjão de Minas, MG.

Foram então definidas três missões para teste.

### 5.3.1. Missão 1 – Varjão de Minas

A missão 1 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_1$  e atingir o ponto de destino  $P_2$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Pontos de origem e destinos para o caso 3, missão 1

Ponto de origem - $P_1$		Ponto de destino - $P_2$	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-045.976068	-18.259303	-045.975849	-18.259215

A rota calculada para a missão 1 pode ser visualizada na Figura 58.

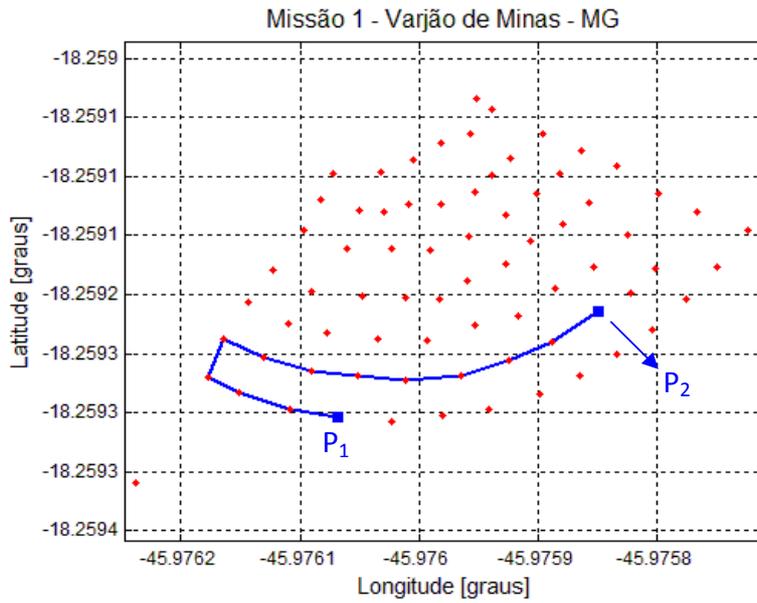


Figura 58 - Rota calculada para a missão 1 (linha azul) – P1 → P2.

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 1 foram plotados conforme mostrado na Figura 59. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

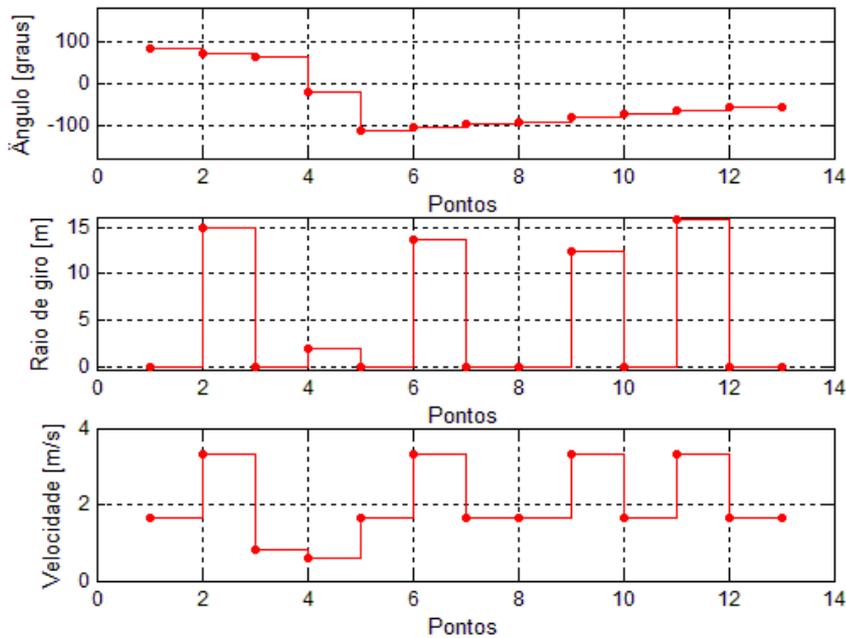


Figura 59 - Dados da missão 1 – P1 → P2.

A Figura 59 mostra alguns casos em que o raio de giro foi diferente de zero, porém

com comportamentos diferentes em relação à velocidade. No ponto 2, por exemplo, o raio de giro possibilitou o aumento da velocidade de deslocamento enquanto que no ponto 4 a velocidade foi calculada em função da velocidade angular máxima permitida. Caso alguma limitação deva ser aplicada aos valores de saída, o navegador realiza a limitação automaticamente, disponibilizando os dados de saída já limitados.

### 5.3.2. Missão 2 – Varjão de Minas

A missão 2 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_3$  e atingir o ponto de destino  $P_4$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Pontos de origem e destinos para o caso 3, missão 2

Ponto de origem - $P_3$		Ponto de destino - $P_4$	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-045.976164	-18.259238	-045.975957	-18.259064

A rota calculada para a missão 2 pode ser visualizada na Figura 60.

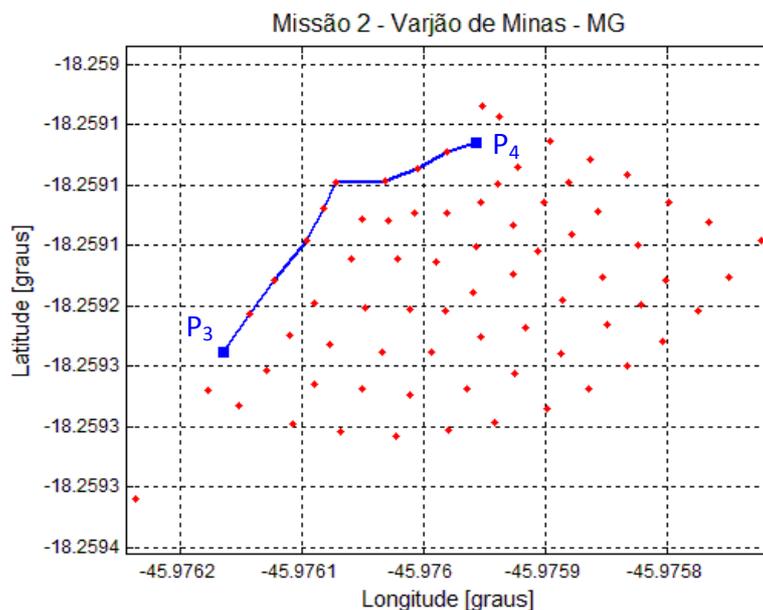


Figura 60 - Rota calculada para a missão 2 (linha azul) –  $P_3 \rightarrow P_4$ .

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 2 foram plotados conforme mostrado na Figura 61. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

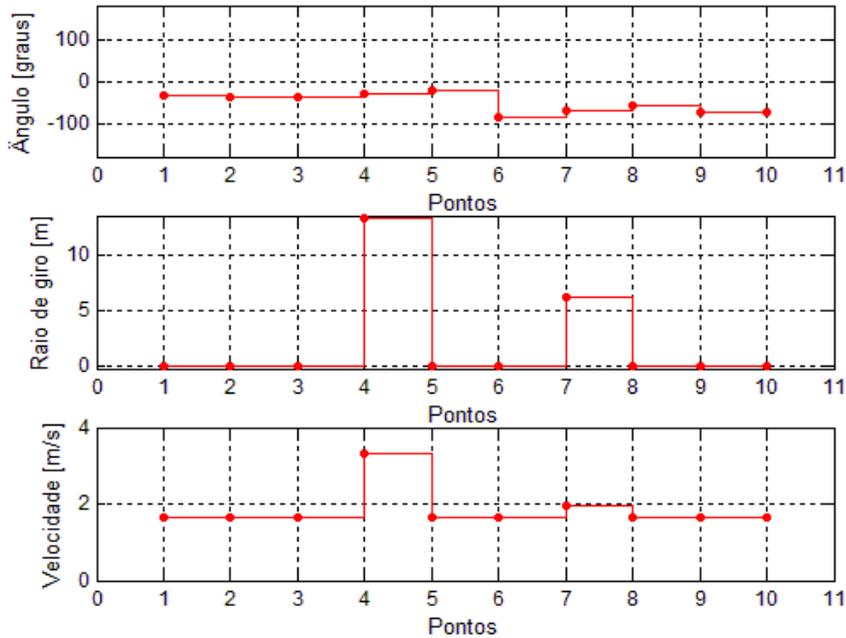


Figura 61 - Dados da missão 2 – P3 → P4.

A Figura 61 mostra dois casos em que o raio de giro foi diferente de zero. Em ambos os casos a velocidade foi aumentada devido à suavização do ângulo de direção, porém com comportamentos diferentes em relação à velocidade. No ponto 4 foi calculada a velocidade máxima enquanto que no ponto 7 a velocidade foi calculada em função da velocidade angular máxima permitida.

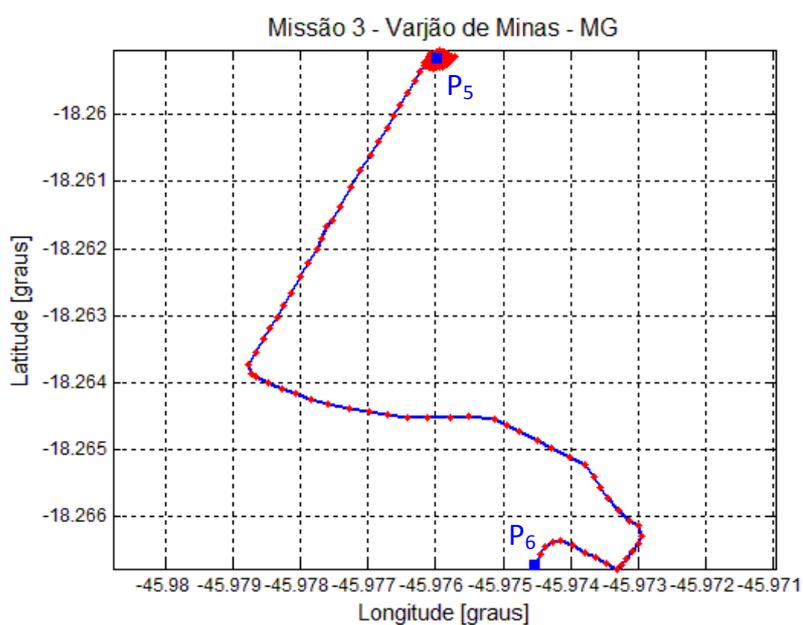
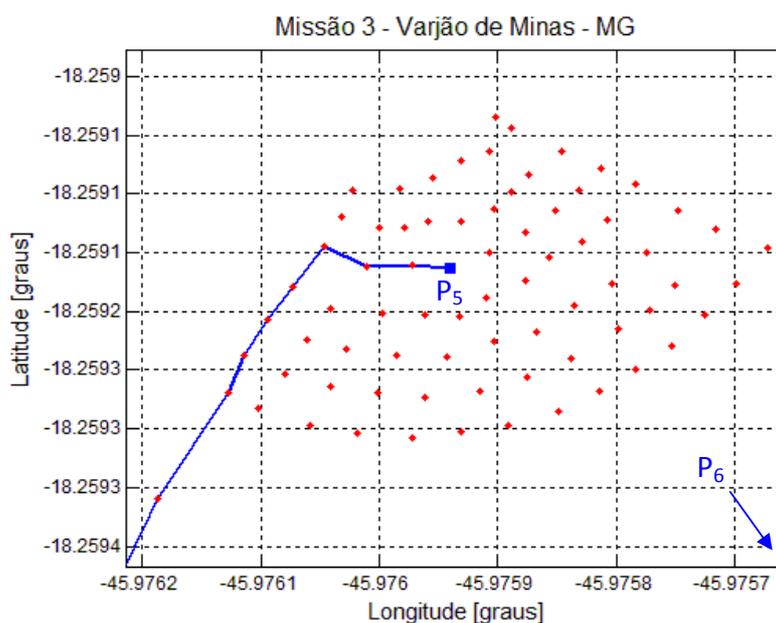
### 5.3.3. Missão 3 – Varjão de Minas

A missão 3 consistiu em determinar por quais coordenadas o veículo deveria passar para sair do ponto de origem  $P_5$  e atingir o ponto de destino  $P_6$  através do menor caminho possível. Os pontos de origem e destino são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Pontos de origem e destinos para o caso 3, missão 3

Ponto de origem - P <sub>5</sub>		Ponto de destino - P <sub>6</sub>	
Longitude [graus]	Latitude [graus]	Longitude [graus]	Latitude [graus]
-045.975990	-18.259163	-045.974542	-18.266705

A rota calculada para a missão 3 pode ser visualizada na Figura 62 e Figura 63, em detalhe.

Figura 62 - Rota calculada para a missão 3 (linha azul) – P<sub>5</sub> → P<sub>6</sub>.Figura 63 - Detalhe da rota calculada para a missão 3 (linha azul) – P<sub>5</sub> → P<sub>6</sub>.

Os dados calculados de ângulo de direção, raio de giro e velocidade de deslocamento máxima para a missão 3 foram plotados conforme mostrado na Figura 64. A tabela contendo os dados encontra-se no Apêndice A.

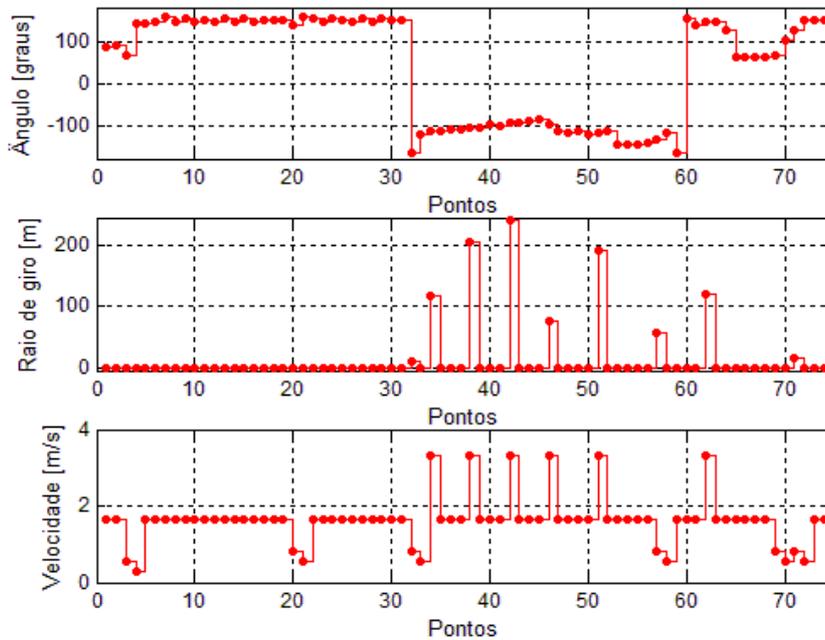


Figura 64 - Dados da missão 3 – P5 → P6.

A Figura 64 engloba três situações distintas: limitação de velocidade para raio de giro nulo e variação grande do ângulo de direção, aumento da velocidade para casos onde o raio de giro não é nulo e redução da velocidade em função da velocidade do ponto seguinte.

## Capítulo 6

# 6. CONCLUSÕES

Para culturas perenes presentes em campos agrícolas, como, por exemplo, café e citros, verifica-se que a área de cultivo sofre poucas alterações entre as safras. Logo, é possível desenvolver um mapeamento das vias transitáveis para que robôs móveis executem tarefas nestes campos através do emprego de dados de GPS. Tal mapa é uma ferramenta essencial para que seja planejada uma trajetória que viabilize a realização das tarefas desejadas. O sistema de planejamento de trajetória proposto neste trabalho através de missões é uma alternativa interessante para fornecer informações da rota a ser seguida em aplicações agrícolas. Embora o algoritmo principal utilizado (algoritmo de Dijkstra) date do final da década de 1950, ele ainda é uma excelente ferramenta para a determinação de caminhos mínimos e possui fácil implementação. Para sua aplicação foi necessário executar um pré-processamento dos dados de GPS. A complexidade do trabalho de pré-processamento dos pontos amostrados e inclusão do relacionamento entre os pontos é diretamente proporcional à quantidade de pontos. Assim, como sugestão para diminuir o tempo gasto durante o pré-processamento, aconselha-se dividir a área de trabalho em regiões menores que facilitem o processamento inicial dos dados.

A metodologia proposta para suavização de mudanças de ângulo de direção acrescentou um diferencial no planejamento das missões visto que com o emprego deste artifício houve, em alguns casos, aumento da velocidade de deslocamento. A interpretação correta dos dados de saída propostos por esta metodologia implica em desprezar os valores de ângulo de direção nos pontos onde o valor de raio de giro for maior que zero. Isto se deve ao fato de que o ângulo de saída do ponto onde deve ser iniciado o percurso de arco de circunferência será suavizado. O ângulo de direção só será importante no ponto final descrito pelo arco de circunferência, indicando a nova direção a ser seguida. Para casos onde o valor de raio de giro é zero mas há mudança de direção no ângulo de direção, deve-se, inicialmente, utilizar a velocidade calculada e alterar o ângulo de direção até a nova orientação desejada. Atingida a nova direção calculada, esta deve ser mantida até o próximo

ponto.

Os valores de velocidade foram sugeridos em função das velocidades aplicáveis ao AgriBOT, não tendo sido testadas na prática.

A precisão do receptor GPS não ocasionou problemas pois foram utilizados dados de mapeamento fornecidos pelo módulo coletor de dados da empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A, sendo processados por algoritmos desenvolvidos pela empresa. A troca do conjunto responsável pelo mapeamento deve ser considerada para utilizar receptores de GPS com maior precisão e possibilidade de aplicação de filtros complexos.

Trabalhos futuros devem ser feitos para implementar o sistema no controlador embarcado no AgriBOT e verificar se os valores sugeridos por este estudo são viáveis e podem ser utilizados ou necessitam de ajustes.

A utilização de mapeamento realizado em outros tipos de culturas perenes deve ser feita para aumentar a variabilidade de dados para o qual o sistema deve ser testado, aumentando assim sua robustez.

## REFERÊNCIAS<sup>9</sup>

ABRAMOVAY, R. Integrar sociedade e natureza na luta contra a fome no século XXI. **Cad. saúde pública**, v. 24, Nov, n. 11, p. 2704-2709, 2008.

ADAMCHUK, V. I. *et al.* On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, p. 71-91, 2004.

AUERNHAMMER, H. Precision farming – The environmental challenge. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 30, p. 31-43, 2001.

AG LEADER. Disponível em: <<http://www.agleader.com/products/yield-monitor/>>. Acesso em: 26 abr. 2012.

BLACKMORE, S.; GRIEPENTROG, H. W. A future view of Precision Farming. In: PreAgro Precision Agriculture Conference, 2002, Muncheberg. **Proceedings...**, Muncheberg, 2002.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision agriculture and sustainability. **Precision agriculture**, n. 5, p. 359-387, 2004.

BRASIL. Lei nº 1806, de 06 de janeiro de 1953. Dispõe sobre o Plano de Valorização Econômica da Amazônia, cria a superintendência da sua execução e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 07 jan. 1953. Seção 1, p. 276.

BRÄUNL, T. **Embedded robotics**. Perth: Springer, 454p., 2006.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I.R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**, Cambridge, Mass.: MIT Press, 488p., 2011.

CALLAGHAN, V. *et al.* Automating agricultural vehicles. **Industrial Robot**, v. 24, n. 5, p. 364-369, 1997.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. Disponível em: <[http://www2.camara.gov.br/atividade-legislativa/orcamentobrasil/orcamentouniao/ppa/ppa20002003/ppa\\_2000\\_2003/ppa\\_relaval/003\\_agricultura.PDF/view](http://www2.camara.gov.br/atividade-legislativa/orcamentobrasil/orcamentouniao/ppa/ppa20002003/ppa_2000_2003/ppa_relaval/003_agricultura.PDF/view)>. Acesso em 14 mar. 2012.

CASADY, W. *et al.* Precision agriculture: yield monitors. **Water Quality**, n. 451, p. 1-4, 1998.

COMBA, L. *et al.* **Robotics and automation for crop management: trends and perspective**. In: International Conference SHWA, 2010: Ragusa, 8p.

---

<sup>9</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

CRUVINEL, P. E.; KARAM, D. Construção de mapas de aplicação em taxa variável de herbicida para cultura do milho (*Zea mays L.*) com base em visão computacional e ocupação de plantas invasoras de folhas largas. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2010, Ribeirão Preto, SP. **Anais...** Ribeirão Preto, SP: SBEA, 4p., 2010.

DAY, W. Foresight project on global food and farming futures. **Journal of agricultural science**, n. 149, p. 55-61, 2011.

DIJKSTRA, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, p. 269-271, 1959.

DOBERMANN, A. *et al.* Precision Farming: Challenges and Future Directions. In: 4th International Crop Science Congress, 2004, Brisbane. 19p. **Proceedings...** Brisbane, 2004. CD-ROM.

DOERGE, T. A. Management zone concepts. **Site-specific management guidelines**, Norcross, v. 2, p. 1-4, 2000. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C0D052F04A53E0BF852579E500761AE3/\\$FILE/SSMG-02.pdf](http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C0D052F04A53E0BF852579E500761AE3/$FILE/SSMG-02.pdf)>. Acesso em: 03 mai. 2012.

FAO. Managing systems at risk. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture**, 2011.

GARMIN. Disponível em: <[www8.garmin.com/manuals/GPS18x\\_TechnicalSpecifications.pdf](http://www8.garmin.com/manuals/GPS18x_TechnicalSpecifications.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2012.

GODDARD, T. What is precision farming? **Proceedings: Precision Farming Conference**, Taber, 1997. Disponível em: <[http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/sag1951](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/sag1951)>. Acesso em 03 mai. 2012.

HERAUD, J.A; LANGE, A.F. Agricultural automatic vehicle guidance from horses to GPS: how we got here, and where we are going, In: Agricultural Equipment Technology Conference, Louisville, 2009, **ASABE Distinguished Lecture**, n. 33, p. 1-67, 2010.

HIJMANS, R.J.; WILLIAMS, E.; VENNES, C., **The geosphere package**, v. 1, p. 2-4, 2010. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/web/packages/geosphere/index.html>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

INAMASU, R. Y. *et al.* **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 334p., 2011.

KOCH, B.; KHOSLA, R. The role of precision agriculture in cropping systems. **Journal of crop production**, v. 9, n. 1-2, p. 361-381, 2003.

LARSEN, W.E.; NIELSEN, G.A.; TYLER, D.A. Precision navigation with GPS, **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 11, p. 85-95, 1994.

LOUP ELECTRONICS. Disponível em:

<[http://loupelectronics.com/products/yield\\_monitor.html](http://loupelectronics.com/products/yield_monitor.html)>. Acesso em: 26 abr. 2012.

MOLIN, J. P. Desafios da agricultura brasileira a partir da agricultura de precisão. In: **Simpósio sobre rotação soja/milho no plantio direto**, 3., 2002, Campinas. 9 p. Disponível em:

<[http://www.potafos.org/ppiweb/pbrazil.nsf/\\$webindex/article=36ED230B83256C950066174233DC5CAO!opendocument/](http://www.potafos.org/ppiweb/pbrazil.nsf/$webindex/article=36ED230B83256C950066174233DC5CAO!opendocument/)>. Acesso em: 26 abr. 2012.

NOWATZKI, J. *et al.* GPS – Applications in crop production, **NDSU Extension Service**, Fargo, Abr, 2004. Disponível em: <<http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ageng/gis/ae1264w.htm>>. Acesso em: 03 mai. 2012.

PIERCE, F. J.; NOWAK, P. Aspects in precision agriculture. In: L. S. Donald (Ed.). **Advances in Agronomy**: Academic Press, v. 67, 1999. Aspects in precision agriculture, p. 1-85.

PIRES, J. L. F. *et al.* **Discutindo agricultura de precisão - aspectos gerais**. Passo Fundo, 2004. 18 p. Disponível em: <[http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p\\_do42.htm](http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.htm)>. Acesso em 02 Mai. 2012.

PORTAL DE ROBÓTICA AGRÍCOLA. Disponível em:

<<http://www.nepas.eesc.usp.br/roboticaagricola/index.php/robos-agricolas/agribot>>.

Acesso em: 03 mai. 2012.

SINNOTT, R.W. Virtues of the Haversine, **Sky and Telescope**, v. 68(2), p. 159, 1984.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I.R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**, Cambridge, Mass.: MIT Press, 488p., 2011.

STAFFORD, J. V., Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, Jul, p. 267-283, 2000.

SUDDUTH, K. A. Engineering technologies for precision farming. In: International Seminar on Agricultural Mechanization Technology for Precision Farming, 1999, Suwon. **Anais...** Suwon: Rural Development Admin. 1999, p.5-27.

SUDDUTH, K. A. *et al.* Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, p. 263-283, 2005.

TABILE, R. A. **Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão**. 2012. 210 p. (Doutorado). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

THE GOVERNMENT OFFICE FOR SCIENCE. Foresight - the future of food and farming. **Executive Summary**, 2011

TILMAN, D. *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, Ago, p. 671-677, 2002.

TOLLEFSON, J. The global farm. **Nature**, v. 466, Jul, p. 554-556, 2010.

TRIMBLE. Disponível em: <[http://www.trimble.com/agriculture/yield-monitoring-and-mapping-capabilities.aspx?dtID=technical\\_support](http://www.trimble.com/agriculture/yield-monitoring-and-mapping-capabilities.aspx?dtID=technical_support)>. Acesso em: 25 mai. 2012.

UNITED NATIONS POPULATIONS FUND. **State of world population**, 2011.

UNITED STATES PATENT and TRADEMARK OFFICE. Earl W. Ortlip. **Method and apparatus for spreading fertilizer**. U. S. PATENT 4630733, 5 fev. 1986, 23 dez. 1986.

VILDE, A. *et al.* Some investigations in precision agriculture, **Engineering for rural development**, p. 58-61, 2010.

WILSON, J. N., Guidance of agricultural vehicles – a historical perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, p. 3-9, 2000.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture - a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, n. 2-3, Nov, p. 113-132, 2002.

## Apêndice A – Dados calculados

Nesta seção são exibidos os dados calculados para as missões de acordo a sequencia apresentada no trabalho.

### A1. Caso 1 – missão 1

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-050.196724	-22.108442	0059.31160	000.00000	01.66
-050.196761	-22.108420	0049.64488	000.00000	00.83
-050.196808	-22.108381	0074.30644	000.00000	00.56
-050.196846	-22.108370	0039.53569	000.00000	00.56
-050.196864	-22.108347	0160.29236	000.00000	00.28
-050.196875	-22.108377	-132.14854	000.00000	00.28
-050.196853	-22.108397	-126.69602	027.81138	03.33
-050.196800	-22.108437	-117.61387	000.00000	01.66
-050.196741	-22.108468	-126.30625	000.00000	01.66
-050.196695	-22.108502	-119.77270	000.00000	01.66
-050.196641	-22.108532	-119.77270	000.00000	01.66

### A2. Caso 1 – missão 2

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-050.195635	-22.109644	-008.82270	000.00000	01.66
-050.195632	-22.109628	-005.64099	000.00000	01.66
-050.195627	-22.109574	0003.08926	000.00000	01.66
-050.195630	-22.109526	-013.57650	000.00000	00.83
-050.195619	-22.109483	0005.61151	000.00000	00.56
-050.195624	-22.109430	-007.14311	000.00000	00.83
-050.195616	-22.109367	0013.50869	000.00000	00.56
-050.195627	-22.109323	-000.05723	017.77232	03.33
-050.195627	-22.109253	-011.77164	000.00000	01.66
-050.195616	-22.109203	0002.61470	000.00000	01.66
-050.195619	-22.109147	-000.08528	000.00000	01.66
-050.195619	-22.109087	0007.48747	000.00000	00.83
-050.195624	-22.109048	0029.23273	000.00000	00.56
-050.195635	-22.109028	0071.08391	000.00000	00.56
-050.195660	-22.109020	0055.85327	000.00000	01.66
-050.195701	-22.108992	0055.44244	000.00000	01.66
-050.195747	-22.108960	0063.97956	043.34550	03.33
-050.195803	-22.108933	0064.05927	000.00000	01.66
-050.195856	-22.108907	0052.26025	000.00000	01.66
-050.195902	-22.108871	0052.26025	000.00000	01.66

### A3. Caso 1 – missão 3

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-050.196480	-22.108399	-120.76622	000.00000	01.66
-050.196470	-22.108405	-113.51368	000.00000	01.66
-050.196434	-22.108421	-117.14824	000.00000	01.66
-050.196381	-22.108448	-117.82068	000.00000	01.66
-050.196327	-22.108476	-116.95514	000.00000	01.66
-050.196293	-22.108493	-117.84025	000.00000	01.66
-050.196251	-22.108516	-113.58018	000.00000	01.66
-050.196208	-22.108535	-124.29805	000.00000	01.66
-050.196170	-22.108561	-114.14526	000.00000	01.66
-050.196112	-22.108587	-120.00616	000.00000	01.66
-050.196059	-22.108617	-119.77307	000.00000	01.66
-050.196015	-22.108642	-121.77772	000.00000	01.66
-050.195970	-22.108670	-115.63244	021.67818	03.33
-050.195932	-22.108689	-109.88240	000.00000	01.66
-050.195890	-22.108704	-128.79415	000.00000	01.66
-050.195856	-22.108731	-119.62561	019.69816	03.33
-050.195822	-22.108750	-116.70107	000.00000	01.66
-050.195771	-22.108776	-119.55613	000.00000	01.66
-050.195737	-22.108795	-122.33610	000.00000	01.66
-050.195681	-22.108830	-131.86882	000.00000	01.66
-050.195653	-22.108856	-161.01706	000.00000	00.83
-050.195649	-22.108867	-125.91458	000.00000	00.56
-050.195602	-22.108901	0179.67060	000.00000	01.66
-050.195602	-22.108937	0170.91246	026.96612	03.33
-050.195610	-22.108988	0167.49981	000.00000	01.66
-050.195624	-22.109048	0133.28176	000.00000	01.66
-050.195635	-22.109059	0066.12998	000.00000	01.66
-050.195675	-22.109041	0061.74256	000.00000	01.66
-050.195715	-22.109019	0063.94968	000.00000	01.66
-050.195754	-22.109000	0066.47985	000.00000	01.66
-050.195798	-22.108981	0062.45921	000.00000	01.66
-050.195840	-22.108960	0052.68120	000.00000	01.66
-050.195874	-22.108933	0060.91576	000.00000	01.66
-050.195910	-22.108913	0057.41081	000.00000	01.66
-050.195965	-22.108879	0063.19196	000.00000	01.66
-050.196005	-22.108858	0058.80509	000.00000	01.66
-050.196059	-22.108826	0054.54437	000.00000	01.66
-050.196092	-22.108801	0060.34219	029.48332	03.33
-050.196133	-22.108778	0064.15206	000.00000	01.66
-050.196185	-22.108753	0057.98351	000.00000	01.66
-050.196235	-22.108722	0063.59862	000.00000	01.66
-050.196286	-22.108697	0059.90820	000.00000	01.66
-050.196331	-22.108670	0056.60660	000.00000	01.66
-050.196364	-22.108649	0065.62935	000.00000	01.66
-050.196402	-22.108631	0062.42858	000.00000	01.66
-050.196440	-22.108612	0058.22701	000.00000	01.66
-050.196480	-22.108587	0062.42292	000.00000	01.66
-050.196518	-22.108567	0063.42159	000.00000	01.66
-050.196577	-22.108538	0053.50134	000.00000	01.66
-050.196630	-22.108498	0062.37914	000.00000	01.66
-050.196678	-22.108473	0056.24581	000.00000	01.66
-050.196724	-22.108442	0059.31160	000.00000	01.66
-050.196761	-22.108420	0049.64488	000.00000	00.83
-050.196808	-22.108381	0074.30644	000.00000	00.56
-050.196846	-22.108370	0039.53569	000.00000	00.56
-050.196864	-22.108347	0160.29236	000.00000	00.28
-050.196875	-22.108377	0153.38164	020.42062	03.33
-050.196889	-22.108406	0150.54234	000.00000	01.66
-050.196904	-22.108432	0148.53189	000.00000	01.66
-050.196924	-22.108464	0155.04852	000.00000	01.66
-050.196940	-22.108498	0155.04852	000.00000	01.66

#### A4. Caso 2 – missão 1

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-049.632130	-22.117937	0158.13235	000.00000	01.66
-049.632180	-22.118062	0164.86997	000.00000	00.56
-049.632192	-22.118105	-137.91681	000.00000	00.28
-049.632153	-22.118148	-106.98781	000.00000	00.56
-049.632072	-22.118173	-104.45413	000.00000	01.66
-049.632002	-22.118191	-104.99122	000.00000	01.66
-049.631929	-22.118210	-111.64852	000.00000	01.66
-049.631865	-22.118236	-102.42973	000.00000	01.66
-049.631782	-22.118254	-109.67820	000.00000	01.66
-049.631705	-22.118281	-100.43036	000.00000	01.66
-049.631639	-22.118294	-109.61378	000.00000	01.66
-049.631557	-22.118323	-108.49114	000.00000	01.66
-049.631483	-22.118347	-103.48676	000.00000	01.66
-049.631389	-22.118370	-113.25919	000.00000	01.66
-049.631306	-22.118405	-111.29774	000.00000	01.66
-049.631239	-22.118432	-104.21407	000.00000	01.66
-049.631180	-22.118447	-107.91180	000.00000	01.66
-049.631123	-22.118465	-101.50981	000.00000	01.66
-049.631067	-22.118476	-114.94683	000.00000	01.66
-049.631012	-22.118502	-106.52911	000.00000	01.66
-049.630957	-22.118519	-107.66410	000.00000	01.66
-049.630894	-22.118538	-162.75702	000.00000	01.66
-049.630882	-22.118577	0175.43253	000.00000	01.66
-049.630886	-22.118621	0175.43253	000.00000	01.66

#### A5. Caso 2 – missão 2

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-049.631750	-22.118964	-081.44618	000.00000	01.66
-049.631619	-22.118944	-078.94915	000.00000	01.66
-049.631509	-22.118923	-076.30760	000.00000	01.66
-049.631392	-22.118894	-069.61504	000.00000	01.66
-049.631344	-22.118876	-045.14558	010.16348	00.83
-049.631294	-22.118827	-025.90451	000.00000	00.56
-049.631279	-22.118794	-010.08862	000.00000	00.56
-049.631268	-22.118737	-010.53679	000.00000	01.66
-049.631256	-22.118671	-009.00867	000.00000	01.66
-049.631243	-22.118592	-007.32350	000.00000	01.66
-049.631235	-22.118526	-007.32368	000.00000	01.66
-049.631226	-22.118459	-075.16432	000.00000	01.66
-049.631180	-22.118447	-107.91180	000.00000	01.66
-049.631123	-22.118465	-101.50981	000.00000	01.66
-049.631067	-22.118476	-114.94683	000.00000	01.66
-049.631012	-22.118502	-106.52911	000.00000	01.66
-049.630957	-22.118519	-107.66410	000.00000	01.66
-049.630894	-22.118538	0137.11798	000.00000	00.56
-049.630916	-22.118562	-175.62859	000.00000	00.28
-049.630913	-22.118601	0164.14955	000.00000	01.66
-049.630921	-22.118628	0166.69544	000.00000	01.66
-049.630931	-22.118671	0171.01859	000.00000	01.66
-049.630940	-22.118726	0168.37360	000.00000	01.66
-049.630951	-22.118781	0168.37360	000.00000	01.66

### A6. Caso 3 – missão 1

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-045.976068	-18.259303	0081.19122	000.00000	01.66
-045.976108	-18.259297	0071.65100	014.87330	03.33
-045.976152	-18.259283	0062.43214	000.00000	00.83
-045.976177	-18.259270	-022.09612	001.90230	00.60
-045.976164	-18.259238	-114.41000	000.00000	01.66
-045.976130	-18.259253	-106.17460	013.69628	03.33
-045.976091	-18.259265	-096.14184	000.00000	01.66
-045.976051	-18.259269	-095.98563	000.00000	01.66
-045.976011	-18.259273	-083.86415	012.42347	03.33
-045.975965	-18.259268	-073.12426	000.00000	01.66
-045.975925	-18.259256	-066.26790	015.81248	03.33
-045.975888	-18.259240	-057.38487	000.00000	01.66
-045.975849	-18.259215	-057.38487	000.00000	01.66

### A7. Caso 3 – missão 2

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-045.976164	-18.259238	-033.26157	000.00000	01.66
-045.976144	-18.259206	-037.27456	000.00000	01.66
-045.976123	-18.259179	-037.71723	000.00000	01.66
-045.976097	-18.259145	-029.79530	013.38463	03.33
-045.976082	-18.259119	-023.72987	000.00000	01.66
-045.976072	-18.259097	-087.85897	000.00000	01.66
-045.976032	-18.259096	-070.39791	006.26609	01.97
-045.976005	-18.259086	-059.54573	000.00000	01.66
-045.975981	-18.259072	-072.54512	000.00000	01.66
-045.975957	-18.259064	-072.54512	000.00000	01.66

### A8. Caso 3 – missão 3

Longitude [graus]	Latitude [graus]	A. direção [°]	R. giro [m]	V max [m/s]
-045.975990	-18.259163	0085.98445	000.00000	01.66
-045.976022	-18.259160	0091.37866	000.00000	01.66
-045.976060	-18.259161	0066.31480	000.00000	00.56
-045.976097	-18.259145	0142.28277	000.00000	00.28
-045.976123	-18.259179	0142.72544	000.00000	01.66
-045.976144	-18.259206	0146.73843	000.00000	01.66
-045.976164	-18.259238	0157.90388	000.00000	01.66
-045.976177	-18.259270	0146.10480	000.00000	01.66
-045.976237	-18.259359	0154.82064	000.00000	01.66
-045.976304	-18.259501	0146.59190	000.00000	01.66
-045.976414	-18.259668	0150.46862	000.00000	01.66
-045.976526	-18.259864	0147.33897	000.00000	01.66
-045.976620	-18.260011	0154.81836	000.00000	01.66
-045.976709	-18.260200	0144.16787	000.00000	01.66
-045.976852	-18.260399	0153.33556	000.00000	01.66
-045.976957	-18.260608	0146.51299	000.00000	01.66
-045.977106	-18.260833	0150.80472	000.00000	01.66
-045.977249	-18.261089	0150.57050	000.00000	01.66
-045.977414	-18.261382	0150.14947	000.00000	01.66
-045.977524	-18.261573	0139.06705	000.00000	00.83
-045.977609	-18.261671	0157.82181	000.00000	00.56
-045.977682	-18.261850	0154.72925	000.00000	01.66
-045.977761	-18.262017	0146.51845	000.00000	01.66

-045.977894	-18.262218	0152.25163	000.00000	01.66
-045.977997	-18.262414	0150.04721	000.00000	01.66
-045.978137	-18.262657	0147.17622	000.00000	01.66
-045.978252	-18.262835	0152.97412	000.00000	01.66
-045.978349	-18.263025	0145.46325	000.00000	01.66
-045.978452	-18.263175	0153.85357	000.00000	01.66
-045.978537	-18.263348	0149.54158	000.00000	01.66
-045.978652	-18.263543	0148.44136	000.00000	01.66
-045.978767	-18.263731	-164.69655	010.86366	00.83
-045.978731	-18.263862	-123.18707	000.00000	00.56
-045.978652	-18.263914	-113.73775	116.73042	03.33
-045.978470	-18.263994	-112.80013	000.00000	01.66
-045.978264	-18.264080	-110.67634	000.00000	01.66
-045.978064	-18.264156	-111.70409	000.00000	01.66
-045.977846	-18.264243	-105.53364	205.61607	03.33
-045.977597	-18.264312	-104.08259	000.00000	01.66
-045.977276	-18.264392	-097.88531	000.00000	01.66
-045.976985	-18.264433	-100.30678	000.00000	01.66
-045.976701	-18.264484	-094.72108	240.38659	03.33
-045.976422	-18.264507	-093.26138	000.00000	01.66
-045.976119	-18.264525	-089.01686	000.00000	01.66
-045.975784	-18.264519	-085.17554	000.00000	01.66
-045.975511	-18.264496	-096.98612	076.77680	03.33
-045.975136	-18.264542	-115.37029	000.00000	01.66
-045.974954	-18.264628	-116.07987	000.00000	01.66
-045.974754	-18.264726	-114.37377	000.00000	01.66
-045.974487	-18.264847	-123.09974	000.00000	01.66
-045.974293	-18.264973	-116.76883	192.51206	03.33
-045.974008	-18.265117	-112.93906	000.00000	01.66
-045.973790	-18.265209	-145.41803	000.00000	01.66
-045.973663	-18.265393	-147.28223	000.00000	01.66
-045.973560	-18.265555	-145.23701	000.00000	01.66
-045.973444	-18.265722	-140.52604	000.00000	01.66
-045.973292	-18.265906	-132.43998	057.34872	00.83
-045.973128	-18.266056	-116.33037	000.00000	00.56
-045.972996	-18.266121	-166.85306	000.00000	01.66
-045.972957	-18.266289	0154.38762	000.00000	01.66
-045.973006	-18.266392	0138.97956	000.00000	01.66
-045.973099	-18.266499	0146.45428	119.62920	03.33
-045.973183	-18.266625	0146.89999	000.00000	01.66
-045.973246	-18.266722	0124.14893	000.00000	01.66
-045.973315	-18.266769	0062.49190	000.00000	01.66
-045.973467	-18.266690	0062.06951	000.00000	01.66
-045.973633	-18.266601	0063.26229	000.00000	01.66
-045.973790	-18.266522	0061.84821	000.00000	01.66
-045.973982	-18.266420	0065.23908	000.00000	00.83
-045.974154	-18.266341	0100.75361	000.00000	00.56
-045.974276	-18.266364	0124.14873	016.47170	00.83
-045.974380	-18.266434	0148.71974	000.00000	00.56
-045.974453	-18.266556	0149.35952	000.00000	01.66
-045.974542	-18.266705	0149.35952	000.00000	01.66

## Apêndice B – Algoritmos desenvolvidos no MATLAB

Esta seção apresenta os algoritmos desenvolvidos no MATLAB que foram utilizados para processamento dos dados e desenvolvimento da metodologia apresentada neste trabalho.

### B1. Algoritmo para separação da sentença NMEA RMC e conversão de unidades dos dados contidos nos arquivos de mapeamento

```
% Algoritmo para separar a sentença NMEA GPRMC dos arquivos do coletor de dados
Jacto

clear;
clc;

fid = fopen('J010612.txt','r');
fid2 = fopen('J010612_Pronto.txt','a+');

pontos = 0;

while ~feof(fid)
    data = fscanf(fid,'%s',1);

    if ~isempty(data)
        if(data(1) == '$')
            %aqui separa os dados de interesse
            if(data(8) == 'A')
                % gps ativo - sinal válido
                pontos = pontos + 1;

                %Latitude (em graus)
                grausLatitude = str2double(data(9:10));
                minLatitude = str2double(data(11:18)) / 60000000;
                latitude = grausLatitude + minLatitude;

                if(data(19) == 'S')
                    latitude = latitude * (-1);
                end

                %Longitude (em graus)
                grausLongitude = str2double(data(20:22));
                minLongitude = str2double(data(23:30)) / 60000000;
                longitude = grausLongitude + minLongitude;

                if(data(31) == 'W')
                    longitude = longitude * (-1);
                end

                fprintf(fid2, '%10.6f,%9.6f,0 ', longitude, latitude);
            end
        end
    end
end

fclose(fid2);
```

```
fclose(fid);
```

## B2. Algoritmo que implementa a fórmula de *Haversine* para calcular a distância entre duas coordenadas geográficas

```
function dist = haversine(long1,lat1,long2,lat2)
    % R.W. Sinnott, "Virtues of the Haversine", Sky and Telescope, vol. 68, no. 2,
    1984, p. 159
    R = 6371; %raio da Terra, em km

    rlat1 = degtorad(lat1);
    rlat2 = degtorad(lat2);
    rlong1 = degtorad(long1);
    rlong2 = degtorad(long2);

    delta_lat = rlat2 - rlat1; % diferença de latitude
    delta_long = rlong2 - rlong1; % diferença de longitude
    a = sin(delta_lat/2)^2 + cos(rlat1) * cos(rlat2) * sin(delta_long/2)^2;
    c = 2 * asin(min(1,sqrt(a)));
    dist = R * c * 1000; % distância, em m
end
```

## B3. Algoritmo para adicionar relacionamento entre dois pontos

```
function matriz = ligaPonto(mat,coord,ponto1,ponto2)
    dist = haversine(coord(ponto2,1),coord(ponto2,2),coord(ponto1,1),coord(ponto1,2));
    mat(ponto1,ponto2) = dist;
    mat(ponto2,ponto1) = dist;
    matriz = mat;
end
```

## B4. Algoritmo para adicionar relacionamento a um conjunto de pontos consecutivos

```
function matriz = ligaSegmento(mat,coord,ponto1,ponto2)
    for i = ponto1:ponto2-1
        dist = haversine(coord(i+1,1),coord(i+1,2),coord(i,1),coord(i,2));
        mat(i,i+1) = dist;
        mat(i+1,i) = dist;
    end
    matriz = mat;
end
```

## B5. Algoritmo que implementa o algoritmo de Dijkstra para calcular o caminho ótimo entre dois pontos

```
% Função Dijkstra
% Calcula o menor caminho entre origem e destino
% O menor caminho pode não ser único. Mostra somente um.

function [caminho,distancia,erro] = Dijkstra(mapa,origem,destino)

erro = 0;
```

```

caminho = 0;
distancia = 0;

% Códigos de erro
% 0 - sem erro
% 1 - arquivo de entrada não é válido
% 2 - matriz não é quadrada
% 3 - nó de origem acima do valor máximo
% 4 - nó de destino acima do valor máximo
% 5 - nó de origem e destino iguais

if isempty(mapa))
    %msgbox('O arquivo de entrada não é válido','Erro','error');
    erro = 1;
else
    [linhas,colunas] = size(mapa);

    if(linhas ~= colunas)
        %msgbox('A matriz não é quadrada','Erro','error');
        erro = 2;
    else
        if(origem < 1 || origem > colunas)
            %msgbox('Nó de origem acima do valor máximo','Erro','error');
            erro = 3;
        else
            if(destino < 1 || destino > colunas)
                %msgbox('Nó de destino acima do valor máximo','Erro','error');
                erro = 4;
            else
                if(destino == origem)
                    %msgbox('Nó de origem e destino iguais','Erro','error');
                    erro = 5;
                else
                    % variáveis temporárias
                    [~,colunas] = size(mapa);
                    vizinhos = zeros(1,colunas);
                    dist = zeros(1,colunas);
                    pronto = zeros(1,colunas);
                    anterior = zeros(1,colunas);

                    for i = 1:colunas
                        if(i ~= origem)
                            dist(i) = Inf; % atribui distância infinita aos nós
                                (exceto origem)
                        end
                    end

                    while (nnz(pronto) ~= colunas)

                        %calcula a menor distância
                        menorDist = Inf;
                        no = 0;
                        for i = 1:colunas
                            if(dist(i) < menorDist && pronto(i) == 0)
                                menorDist = dist(i);
                                no = i;
                            end
                        end

                        %atualizar as distâncias
                        pronto(no) = 1;

                        for i = 1:colunas
                            if(mapa(no,i) > 0 && ~isinf(mapa(no,i)) && pronto(i) ==
0)
                                vizinhos(i) = mapa(no,i);
                            else
                                vizinhos(i) = 0;

```



```

        teta = temp; %lado direito, assume negativo
    end
end

```

## B8. Algoritmo para calcular o ângulo de direção, o raio de giro e a velocidade de deslocamento

```

function [status] = raio(rota,nome)

    TOLERANCIA_ANGULO = 10.0; %tolerância para diferença entre os ângulos [graus]
    ESTERCAMENTO_MINIMO = 15.0;
    ESTERCAMENTO_MAXIMO = 45.0; %ângulo máximo de esterçamento para permitir
    velocidade mais alta [graus]
    ANGULO_MAXIMO = 95.0;
    ANGULO_RETO = 5.0;

    VELOCIDADE_MINIMA = 0.28; %velocidade de deslocamento [m/s]
    VELOCIDADE_BAIXA = 0.56; %velocidade de deslocamento [m/s]
    VELOCIDADE_MEDIA = 1.66; %velocidade de deslocamento [m/s]
    VELOCIDADE_ALTA = 3.33; %velocidade de deslocamento [m/s]
    WCM_MAX = 0.314; %velocidade angular do CM máxima [rad/s]

    status = false;

    nos = length(rota);

    if(nos > 3)
        %Vetores
        for i = 1:nos-1
            vetor(i,1) = rota(i+1,1) - rota(i,1);
            vetor(i,2) = rota(i+1,2) - rota(i,2);
            vetor(i,3) = 0;
            dist(i) = haversine(rota(i+1,1),rota(i+1,2),rota(i,1),rota(i,2));
        end

        %ângulos e lado dos ângulos
        for i = 1:nos
            if(i == 1 || i == nos)
                teta(i) = 0;
            else
                a = vetor(i-1,:);
                b = vetor(i,:);

                %Ângulos entre os vetores consecutivos
                teta(i) = angulo(a,b);
            end

            if(i < nos)
                N = [0 1 0];
                v = vetor(i,:);

                heading(i) = angulo(N,v);
            else
                heading(i) = heading(i-1);
            end
        end

        %Raio de giro instantâneo
        for i = 1:nos
            if(i == 1 || i == nos)
                tr(i) = 0;
            else
                if((teta(i) > 0 && teta(i+1) > 0) || (teta(i) < 0 && teta(i+1) <
0))
                    if(abs(teta(i) - teta(i+1)) <= TOLERANCIA_ANGULO &&

```

```

abs(teta(i)) <= ANGULO_MAXIMO && abs(teta(i+1)) <= ANGULO_MAXIMO)
        if(abs(teta(i)) >= ANGULO_RETO && abs(teta(i+1)) <=
ANGULO_MAXIMO && tr(i-1) == 0) % Não deixa fazer duas suavizações seguidas
            tr(i) = dist(i) / (2 * sind((abs(teta(i)) +
abs(teta(i+1))) / 2));
        else
            tr(i) = 0;
        end
    else
        tr(i) = 0;
    end
else
    tr(i) = 0;
end
end
end
end

%Velocidade
for i = 1:nos
    if(i == nos)
        vmax(i) = VELOCIDADE_MEDIA;
    else
        if(tr(i) == 0)
            if(teta(i) <= ESTERCAMENTO_MINIMO)
                vmax(i) = VELOCIDADE_MEDIA;
            else
                if(teta(i) > ESTERCAMENTO_MINIMO && teta(i) <=
ESTERCAMENTO_MAXIMO)
                    vmax(i) = VELOCIDADE_BAIXA;
                else
                    vmax(i) = VELOCIDADE_MINIMA;
                end
            end
        else
            vTemp = WCM_MAX * tr(i);
            if(vTemp < VELOCIDADE_ALTA)
                vmax(i) = vTemp;
            else
                vmax(i) = VELOCIDADE_ALTA;
            end
        end
    end
end

if(i > 1)
    if(vmax(i) >= VELOCIDADE_BAIXA && vmax(i) < VELOCIDADE_MEDIA &&
vmax(i-1) > VELOCIDADE_BAIXA)
        vmax(i-1) = VELOCIDADE_MEDIA / 2;
    end
    if(vmax(i) < VELOCIDADE_BAIXA && vmax(i-1) > VELOCIDADE_BAIXA)
        vmax(i-1) = VELOCIDADE_BAIXA;
    end
end
end

nomeArquivo = strcat(nome, '.txt');
dados = [rota'; heading; tr; vmax];

fid = fopen(nomeArquivo, 'w+');
fprintf(fid, '%011.6f %010.6f %010.5f %09.5f %05.2f\r\n', dados);
fclose(fid);

x = 1:1:nos;

figure(1);
clf

subplot(3,2,[1 2]);
hold on

```

```

xlabel ('Pontos','FontSize',10)
ylabel ('Ângulo [graus]','FontSize',10)
set(gca,'FontSize',9)
grid on
box on
xlim([0,nos+1]);
ylim([-180,180]);
stairs(x,heading,'-r','LineWidth',1.2);
plot(x,heading,'or','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',4);
hold off

subplot(3,2,[3 4]);
hold on
xlabel ('Pontos','FontSize',10)
ylabel ('Raio de giro [m]','FontSize',10)
set(gca,'FontSize',9)
grid on
box on
xlim([0,nos+1]);
if(min(tr) ~= max(tr))
    ylim([-max(tr)*0.02,max(tr)*1.02]);
end
stairs(x,tr,'-r','LineWidth',1.2);
plot(x,tr,'or','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',4);
hold off

subplot(3,2,[5 6]);
hold on
xlabel ('Pontos','FontSize',10)
ylabel ('Velocidade [m/s]','FontSize',10)
set(gca,'FontSize',9)
grid on
box on
xlim([0,nos+1]);
ylim([0,4]);
stairs(x,vmax,'-r','LineWidth',1.2);
plot(x,vmax,'or','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',4);
hold off

nomeArquivo = strcat(nome,'_Dados.bmp');
saveas(gcf,nomeArquivo)
close(1);

status = true;
end
end

```

## B9. Algoritmo que agrupa todos os algoritmos e gera os gráficos do caso 1

```

clear
clc

load Pontos_Pompeia.txt
coordenadas = Pontos_Pompeia;

%Cria a matriz com todos os pontos do caminho
%Inicializa as distâncias entre os pontos com infinito
pontos = length(coordenadas);
mapa = inf(pontos, pontos);

plotar = true;

%% Relacionamento dos pontos
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,1,48);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,49,56);

```

```

mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,57,101);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,102,147);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,148,186);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,187,215);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,216,241);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,242,269);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,270,296);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,297,301);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,7,48);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,1,56);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,1,57);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,49,101);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,6,102);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,30,124);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,5,147);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,5,148);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,125,167);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,4,186);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,4,187);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,3,241);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,2,242);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,1,296);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,77,297);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,78,297);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,270,298);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,269,299);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,216,300);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,215,301);

%% Mapeamento
if(plotar == true)
    figure(10);
    clf
    %Figura para mostrar o mapeamento da área
    hold on
    title('Mapeamento da área - Pompéia - SP','FontSize',12)
    xlabel('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Mapeamento_Pompéia.bmp')
    %close(10)
end

%% Rotas para indicar os caminhos possíveis
if(plotar == true)
    [rota1,~] = rota(coordenadas,mapa,101,301);
    [rota2,~] = rota(coordenadas,mapa,101,29);
    [rota3,~] = rota(coordenadas,mapa,1,78);
    [rota4,~] = rota(coordenadas,mapa,1,297);
    [rota5,~] = rota(coordenadas,mapa,2,298);
    [rota6,~] = rota(coordenadas,mapa,3,299);
    [rota7,~] = rota(coordenadas,mapa,1,298);
    [rota8,~] = rota(coordenadas,mapa,4,301);
    [rota9,~] = rota(coordenadas,mapa,4,168);
    [rota10,~] = rota(coordenadas,mapa,29,168);
    [rota11,~] = rota(coordenadas,mapa,5,167);
    [rota12,~] = rota(coordenadas,mapa,5,125);
    [rota13,~] = rota(coordenadas,mapa,6,124);
    [rota14,~] = rota(coordenadas,mapa,7,30);

    figure(20);
    clf

```

```

%Figura para mostrar todos os caminhos possíveis
hold on
title ('Caminhos possíveis - Pompéia - SP','FontSize',12)
xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
set(gca,'FontSize',9)
axis equal
box on
grid on
plot(rota1(:,1),rota1(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota2(:,1),rota2(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota3(:,1),rota3(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota4(:,1),rota4(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota5(:,1),rota5(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota6(:,1),rota6(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota7(:,1),rota7(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota8(:,1),rota8(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota9(:,1),rota9(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota10(:,1),rota10(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota11(:,1),rota11(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota12(:,1),rota12(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota13(:,1),rota13(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota14(:,1),rota14(:,2),'-k','LineWidth',1);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
saveas(gcf,'Caminhos_Pompéia.bmp')

plot(coordenadas(212,1),coordenadas(212,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
5);

plot(coordenadas(220,1),coordenadas(220,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
5);

plot(coordenadas(101,1),coordenadas(101,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
5);

plot(coordenadas(180,1),coordenadas(180,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
5);

plot(coordenadas(29,1),coordenadas(29,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
;

plot(coordenadas(78,1),coordenadas(78,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
;
saveas(gcf,'Pontos_Interesse_Pompéia.bmp')

hold off
%close(20)
end

%% Missão 1
[rota1,~] = rota(coordenadas,mapa,212,220);
raio(rota1,'Missao1_Pompeia');

if(plotar == true)
figure(30);
clf
%Figura para mostrar a missão 1
hold on
title ('Missão 1 - Pompéia - SP','FontSize',12)
xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
set(gca,'FontSize',9)
axis equal
box on
grid on
plot(rota1(:,1),rota1(:,2),'-b','LineWidth',2);

```

```

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    plot(rota1(1,1),rota1(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    [tamanho,~] = size(rota1);

plot(rota1(tamanho,1),rota1(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Missão1_Pompéia.bmp')
    %close(30)
end

%% Missão 2
[rota2,~] = rota(coordenadas,mapa,101,180);
raio(rota2,'Missao2_Pompeia');

if(plotar == true)
    figure(40);
    clf
    %Figura para mostrar a missão 2
    hold on
    title ('Missão 2 - Pompéia - SP','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota2(:,1),rota2(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    plot(rota2(1,1),rota2(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    [tamanho,~] = size(rota2);

plot(rota2(tamanho,1),rota2(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Missão2_Pompéia.bmp')
    %close(40)
end

%% Missão 3
[rota3,~] = rota(coordenadas,mapa,29,78);
raio(rota3,'Missao3_Pompeia');

if(plotar == true)
    figure(50);
    clf
    %Figura para mostrar a missão 3
    hold on
    title ('Missão 3 - Pompéia - SP','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota3(:,1),rota3(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    plot(rota3(1,1),rota3(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    [tamanho,~] = size(rota3);

plot(rota3(tamanho,1),rota3(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Missão3_Pompéia.bmp')
    %close(50)
end

```

## B10. Algoritmo que agrupa todos os algoritmos e gera os gráficos do caso 2

```

clear
clc

load Pontos_Garca.txt
coordenadas = Pontos_Garca;

%Cria a matriz com todos os pontos do caminho
%Inicializa as distâncias entre os pontos com infinito
pontos = length(coordенadas);
mapa = inf(pontos, pontos);

plotar = true;

%% Relacionamento dos pontos
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 1, 139);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 206, 216);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 188, 205);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 173, 187);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 159, 172);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 151, 158);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 144, 150);
mapa = ligaSegmento(mapa, coordenadas, 140, 143);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 71, 216);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 102, 206);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 103, 206);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 117, 188);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 83, 139);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 134, 205);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 134, 173);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 119, 187);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 118, 187);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 120, 172);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 132, 140);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 133, 144);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 133, 151);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 133, 159);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 134, 173);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 134, 205);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 84, 139);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 123, 158);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 124, 150);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 125, 150);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 126, 150);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 127, 143);
mapa = ligaPonto(mapa, coordenadas, 128, 143);

%% Mapeamento
if(plotar == true)
    figure(10);
    clf
    %Figura para mostrar o mapeamento da área
    hold on
    title ('Mapeamento da área - Garça - SP', 'FontSize', 12)
    xlabel ('Longitude [graus]', 'FontSize', 11)
    ylabel ('Latitude [graus]', 'FontSize', 11)
    set(gca, 'FontSize', 9)
    axis equal
    box on
    grid on

plot(coordенadas(:, 1), coordenadas(:, 2), 'r.', 'MarkerFaceColor', 'r', 'MarkerSize', 5);
hold off
saveas(gcf, 'Mapeamento_Garca.bmp')
%close(10)

```

```

end

%% Rotas para indicar os caminhos possíveis
if(plotar == true)
    [rota1,~] = rota(coordenadas,mapa,1,132);
    [rota2,~] = rota(coordenadas,mapa,83,104);
    [rota3,~] = rota(coordenadas,mapa,71,104);
    [rota4,~] = rota(coordenadas,mapa,104,132);
    [rota5,~] = rota(coordenadas,mapa,72,216);
    [rota6,~] = rota(coordenadas,mapa,120,133);
    [rota7,~] = rota(coordenadas,mapa,117,134);
    [rota8,~] = rota(coordenadas,mapa,118,134);
    [rota9,~] = rota(coordenadas,mapa,123,133);
    [rota10,~] = rota(coordenadas,mapa,127,132);
    [rota11,~] = rota(coordenadas,mapa,123,144);
    [rota12,~] = rota(coordenadas,mapa,150,125);
    [rota13,~] = rota(coordenadas,mapa,150,126);
    [rota14,~] = rota(coordenadas,mapa,133,144);
    [rota15,~] = rota(coordenadas,mapa,127,131);
    [rota16,~] = rota(coordenadas,mapa,131,132);

    figure(20);
    clf
    %Figura para mostrar todos os caminhos possíveis
    hold on
    title ('Caminhos possíveis - Garça - SP','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota1(:,1),rota1(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota2(:,1),rota2(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota3(:,1),rota3(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota4(:,1),rota4(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota5(:,1),rota5(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota6(:,1),rota6(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota7(:,1),rota7(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota8(:,1),rota8(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota9(:,1),rota9(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota10(:,1),rota10(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota11(:,1),rota11(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota12(:,1),rota12(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota13(:,1),rota13(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota14(:,1),rota14(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota15(:,1),rota15(:,2),'-k','LineWidth',1);
    plot(rota16(:,1),rota16(:,2),'-k','LineWidth',1);

    plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    saveas(gcf,'Caminhos_Garça.bmp')

    plot(coordenadas(68,1),coordenadas(68,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
    ;

    plot(coordenadas(174,1),coordenadas(174,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
    5);

    plot(coordenadas(95,1),coordenadas(95,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
    ;

    plot(coordenadas(200,1),coordenadas(200,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
    5);
    saveas(gcf,'Pontos_Interesse_Garça.bmp')

    hold off
    %close(20)

```

```

end

%% Missão 1
[rota1,~] = rota(coordenadas,mapa,68,174);
raio(rota1,'Missao1_Garca');

if(plotar == true)
    figure(30);
    clf
    %Figura para mostrar a missão 1
    hold on
    title ('Missão 1 - Garça - SP','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota1(:,1),rota1(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
plot(rota1(1,1),rota1(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
[tamanho,~] = size(rota1);

plot(rota1(tamanho,1),rota1(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
hold off
saveas(gcf,'Missao1_Garca.bmp')
%close(30)
end

%% Missão 2
[rota2,~] = rota(coordenadas,mapa,95,200);
raio(rota2,'Missao2_Garca');

if(plotar == true)
    figure(40);
    clf
    %Figura para mostrar a missão 2
    hold on
    title ('Missão 2 - Garça - SP','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota2(:,1),rota2(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
plot(rota2(1,1),rota2(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
[tamanho,~] = size(rota2);

plot(rota2(tamanho,1),rota2(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
hold off
saveas(gcf,'Missao2_Garca.bmp')
%close(40)
end

```

## B11. Algoritmo que agrupa todos os algoritmos e gera os gráficos do caso 3

```

clear
clc

load Pontos_Varjao.txt
coordenadas = Pontos_Varjao;

```

```

%Cria a matriz com todos os pontos do caminho
%Inicializa as distâncias entre os pontos com infinito
pontos = length(coordenadas);
mapa = inf(pontos, pontos);

plotar = true;

%% Relacionamento dos pontos
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,1,66);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,69,82);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,83,94);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,95,105);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,106,116);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,117,125);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,126,134);
mapa = ligaSegmento(mapa,coordenadas,135,139);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,66,82);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,82,83);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,83,105);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,105,116);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,116,125);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,125,134);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,67,134);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,67,68);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,67,139);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,68,135);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,126,135);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,117,126);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,106,117);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,95,106);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,94,95);
mapa = ligaPonto(mapa,coordenadas,69,94);

%% Mapeamento
if(plotar == true)
    figure(10);
    clf
    %Figura para mostrar o mapeamento da área
    hold on
    title ('Mapeamento da área - Varjão de Minas - MG','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on

    plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Mapeamento_Varjão.bmp')
    %close(10)
end

%% Rotas para indicar os caminhos possíveis
if(plotar == true)
    [rota1,~] = rota(coordenadas,mapa,1,68);
    [rota2,~] = rota(coordenadas,mapa,69,82);
    [rota3,~] = rota(coordenadas,mapa,83,94);
    [rota4,~] = rota(coordenadas,mapa,95,105);
    [rota5,~] = rota(coordenadas,mapa,106,116);
    [rota6,~] = rota(coordenadas,mapa,117,125);
    [rota7,~] = rota(coordenadas,mapa,126,134);
    [rota8,~] = rota(coordenadas,mapa,68,69);
    [rota9,~] = rota(coordenadas,mapa,135,139);
    [rota10,~] = rota(coordenadas,mapa,67,139);

    figure(20);

```

```

clf
%Figura para mostrar todos os caminhos possíveis
hold on
title ('Caminhos possíveis - Varjão de Minas - MG','FontSize',12)
xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
set(gca,'FontSize',9)
axis equal
box on
grid on
plot(rota1(:,1),rota1(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota2(:,1),rota2(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota3(:,1),rota3(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota4(:,1),rota4(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota5(:,1),rota5(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota6(:,1),rota6(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota7(:,1),rota7(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota8(:,1),rota8(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota9(:,1),rota9(:,2),'-k','LineWidth',1);
plot(rota10(:,1),rota10(:,2),'-k','LineWidth',1);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
saveas(gcf,'Caminhos_Varjão.bmp')

plot(coordenadas(79,1),coordenadas(79,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
;

plot(coordenadas(91,1),coordenadas(91,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
;

plot(coordenadas(83,1),coordenadas(83,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5)
;

plot(coordenadas(136,1),coordenadas(136,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
5);

plot(coordenadas(122,1),coordenadas(122,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',
5);

plot(coordenadas(1,1),coordenadas(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
saveas(gcf,'Pontos_Interesse_Varjão.bmp')

hold off
%close(20)
end

%% Missão 1
[rota1,~] = rota(coordenadas,mapa,79,91);
raio(rota1,'Missao1_Varjao');

if(plotar == true)
figure(30);
clf
%Figura para mostrar a missão 1
hold on
title ('Missão 1 - Varjão de Minas - MG','FontSize',12)
xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
set(gca,'FontSize',9)
axis equal
box on
grid on
plot(rota1(:,1),rota1(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
plot(rota1(1,1),rota1(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
[tamanho,~] = size(rota1);

```

```

plot(rota1(tamanho,1),rota1(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Missão1_Varjão.bmp')
    %close(30)
end

%% Missão 2
[rota2,~] = rota(coordenadas,mapa,83,136);
raio(rota2,'Missao2_Varjao');

if(plotar == true)
    figure(40);
    clf
    %Figura para mostrar a missão 2
    hold on
    title ('Missão 2 - Varjão de Minas - MG','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota2(:,1),rota2(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    plot(rota2(1,1),rota2(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    [tamanho,~] = size(rota2);

plot(rota2(tamanho,1),rota2(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Missão2_Varjão.bmp')
    %close(40)
end

%% Missão 3
[rota3,~] = rota(coordenadas,mapa,122,1);
raio(rota3,'Missao3_Varjao');

if(plotar == true)
    figure(50);
    clf
    %Figura para mostrar a missão 3
    hold on
    title ('Missão 3 - Varjão de Minas - MG','FontSize',12)
    xlabel ('Longitude [graus]','FontSize',11)
    ylabel ('Latitude [graus]','FontSize',11)
    set(gca,'FontSize',9)
    axis equal
    box on
    grid on
    plot(rota3(:,1),rota3(:,2),'-b','LineWidth',2);

plot(coordenadas(:,1),coordenadas(:,2),'r.','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5);
    plot(rota3(1,1),rota3(1,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    [tamanho,~] = size(rota3);

plot(rota3(tamanho,1),rota3(tamanho,2),'bs','MarkerFaceColor','b','MarkerSize',5);
    hold off
    saveas(gcf,'Missão3_Varjão.bmp')
    %close(50)
end

```