

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 826

**NAVEGAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA COBERTURA  
DE ÁREAS COM MINIMIZAÇÃO DE TEMPO**

**Gustavo Silva Castilho de Avellar**

DATA DA DEFESA: 09/06/2014

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

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

**NAVEGAÇÃO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS PARA  
COBERTURA DE ÁREAS COM MINIMIZAÇÃO DE TEMPO**

Gustavo Silva Castilho de Avellar

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

Orientador: Prof. Guilherme Augusto Silva Pereira

Belo Horizonte - MG

Junho de 2014

A949n

Avellar, Gustavo Silva Castilho de.

Navegação de veículos aéreos não tripulados para cobertura de áreas com minimização de tempo [manuscrito] / Gustavo Silva Castilho de Avellar. – 2014.

xii, 95 f., enc.: il.

Orientador: Guilherme Augusto Silva Pereira.

Coorientador: Luciano Cunha de Araújo Pimenta.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.81-95.

Bibliografia: f. 75-80.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Campos vetoriais - Teses.

I. Pereira, Guilherme Augusto Silva. II. Pimenta, Luciano Cunha de Araújo. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

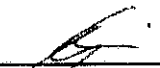
**"Navegação de Veículos Aéreos Não Tripulados Para Cobertura de Áreas Com Minimização de Tempo"**

**Gustavo Silva Castilho de Avellar**


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

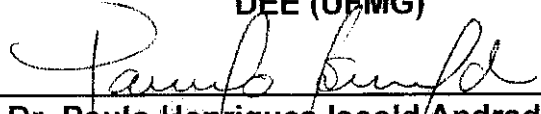
Aprovada em 09 de junho de 2014.

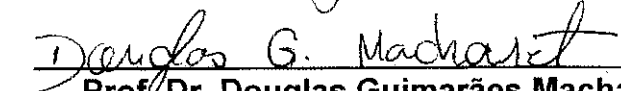
Por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **Guilherme Augusto Silva Pereira**  
BEE (UFMG) - Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **Luciano Cunha de Araújo Pimenta**  
DELT (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **Eduardo Gontijo Carrano**  
DEE (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **Paulo Henrique Iscold Andrade de Oliveira**  
DEMEC (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **Douglas Guimarães Macharet**  
DCC (UFMG)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Navegação de Veículos Aéreos Não Tripulados  
para Cobertura de Áreas com Minimização de Tempo**

**Gustavo Silva Castilho de Avellar**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Guilherme Augusto Silva Pereira

Co-orientador: Prof. Luciano Cunha de Araújo Pimenta

Belo Horizonte, 09 de Junho de 2014

Dedico esta tese à  
minha querida esposa,  
Ariane.

# Resumo

Este texto aborda o desenvolvimento, implementação e teste de metodologias para planejamento de caminhos e cooperação entre Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) na tarefa de cobertura de fronteiras e áreas. Foram escolhidas e avaliadas duas abordagens diferentes para o problema da navegação.

Na primeira, cada VANT é guiado através de curvas implícitas em um campo vetorial definido em seu espaço de trabalho. A avaliação do valor do campo na posição de cada VANT resulta em um vetor cuja direção é utilizada como referência para o seu ângulo de guinada e a magnitude é utilizada para referência de velocidade.

A segunda estratégia é baseada em uma distribuição inteligente de *waypoints* em uma área designada para cobertura. De posse da localização das fronteiras da área a ser coberta e das informações de altura de voo e ângulo de abertura da câmera, primeiramente são calculadas as posições das linhas por onde os VANTs irão voar. Esse cálculo leva em consideração que o VANT irá cobrir a área com movimentos de ida e volta, fazendo curvas na parte externa da área. A lista contendo as coordenadas da base e dos *waypoints* que delimitam cada linha são utilizadas na segunda etapa, em conjunto informações do número de VANTs disponíveis, tempo de *setup*, velocidade de voo e tempo máximo de voo. O conjunto de pontos é modelado como os vértices em um problema de múltiplos caixeiros viajantes modificado. A solução deste problema de programação linear inteira será o número de VANTs que são necessários para completar a missão no menor tempo possível e a sequência de *waypoints* que deverá ser percorrida por cada um deles, para que a área seja completamente coberta. A contribuição deste trabalho é a constatação de que a utilização de todos os VANTs disponíveis para a missão nem sempre resultará na sua realização em tempo mínimo. Isto é devido ao fato de que cada VANT possui um tempo de *setup*, e em algumas situações, a utilização de mais agentes nem sempre compensará o tempo de *setup* adicional de cada um deles. Experimentos realizados com um e dois VANTs em uma mesma área de interesse validaram os resultados.

# Abstract

This thesis addresses the development, implementation and testing of different methodologies for path planning and cooperation between Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the area and border coverage tasks. Two different approaches were chosen and evaluated for this navigation problem.

In the first one, each UAV is guided by implicit curves in a vector field which is defined in its workspace. The evaluation of the vector field in each UAV position gives a vector which its direction is used as a reference for heading and its magnitude is used as a reference for speed.

The second tested strategy is based on a intelligent waypoint distribution on a designated coverage area. With the location of the borders of the covered area and knowledge of the flight altitude and camera field of view, the positions of the lines where the UAVs will fly are calculated. This takes into consideration that the UAVs will cover the area with sweep like movements, doing turns outside the coverage region. The list containing the coordinates for the base and the waypoints that limit each sweep line, is used as an input to the second stage, as well as the number of available UAVs, their setup time, flight speed and maximum flight time. The set of points is modeled as vertexes in modified multiple salesmen traveling problem. The solution to this linear integer programming problem will be the number of UAVs that are needed to accomplish the mission in the minimum possible time and the sequence of waypoints that must be visited by each one of them, so that the area is completely covered. The contribution from this work is the realization that using all UAVs available for the mission will not always result in the minimum time to accomplish it. This is due to the fact that each UAV has a setup time, and in some situations, the usage of a bigger number of agents will not always make up for the additional setup time added by each one of them. Experiments were made with one and two UAVs covering the same region and validated these findings.

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a meus pais por terem me criado com amor e por propiciarem um ambiente favorável ao meu desenvolvimento cultural e intelectual. Apesar de breve, a convivência com meu pai despertou minha curiosidade e interesse pela engenharia. Minha mãe me apoiou e me direcionou, ensinando valores e educando. Agradeço à vovó Sônia, que insistiu para que eu persistisse na busca constante pelo conhecimento. Agradeço ao meu avô Oliveiros, pela sua garra e carinho. Agradeço também à minha esposa Ariane pelo apoio, compreensão e amor durante todo o tempo em que estamos juntos.

Agradeço ao professor e orientador Guilherme Pereira pelas suas contribuições, sugestões, conversas, conselhos e principalmente pela boa convivência e paciência. Agradeço também ao professor e coorientador Luciano Pimenta, que muito me ajudou nas formulações matemáticas dos problemas de otimização desta dissertação.

Gostaria de agradecer ao professor Paulo Iscold pelas ideias e pelo apoio na realização de testes. Neste quesito, agradeço também ao aluno de graduação Julliardy Matoso por me ajudar na preparação e realização dos voos.

Agradeço aos colegas do PPGE, CORO e CEA. A convivência e amizade que tenho com vocês sempre será lembrada.

Finalmente, agradeço ao CNPq, FINEP e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

# Sumário

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                      | <b>vii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                      | <b>x</b>   |
| <b>Lista de Siglas</b>                                       | <b>xi</b>  |
| <b>1 Introdução</b>                                          | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivação . . . . .                                      | 8          |
| 1.2 Objetivos . . . . .                                      | 9          |
| 1.3 Organização do Texto . . . . .                           | 10         |
| <b>2 Revisão de Literatura</b>                               | <b>11</b>  |
| 2.1 Espaço de Configurações . . . . .                        | 13         |
| 2.2 Navegação por <i>Waypoints</i> . . . . .                 | 14         |
| 2.3 Navegação em Campos Vetoriais . . . . .                  | 15         |
| 2.4 Otimização de Caminhos para Cobertura de Áreas . . . . . | 20         |
| <b>3 Cobertura de Fronteiras</b>                             | <b>26</b>  |
| 3.1 Metodologia . . . . .                                    | 26         |
| 3.2 Simulações . . . . .                                     | 34         |
| 3.3 Experimentos . . . . .                                   | 42         |
| <b>4 Cobertura de Áreas</b>                                  | <b>45</b>  |
| 4.1 Metodologia . . . . .                                    | 45         |
| 4.1.1 Decomposição da Área . . . . .                         | 46         |
| 4.1.2 Otimização do Caminho . . . . .                        | 50         |
| 4.2 Simulações . . . . .                                     | 56         |
| 4.3 Experimentos . . . . .                                   | 61         |
| <b>5 Conclusões e Trabalhos Futuros</b>                      | <b>70</b>  |
| 5.1 Cobertura de Estruturas Longilíneas . . . . .            | 71         |
| 5.2 Cobertura de Áreas . . . . .                             | 72         |

---

|          |                                                    |           |
|----------|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>A</b> | <b>Plataforma de Testes</b>                        | <b>81</b> |
| A.1      | SISVANT . . . . .                                  | 81        |
| A.1.1    | Veículo Aéreo Não Tripulado . . . . .              | 82        |
| A.1.2    | Estação de Controle no Solo . . . . .              | 86        |
| A.2      | Operação do Micropilot 2128 <sup>g</sup> . . . . . | 88        |
| A.2.1    | Sequência para Operação dos Equipamentos . . . . . | 89        |
| A.2.2    | Integração Horizon <sup>mp</sup> -Matlab . . . . . | 92        |

# Lista de Figuras

|     |                                                                                                                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Primeiros VANTs utilizados como torpedos aéreos. . . . .                                                                                           | 3  |
| 1.2 | VANTs experimentais do projeto ERAST. . . . .                                                                                                      | 5  |
| 1.3 | VANTs militares em operação a partir dos anos 2000. . . . .                                                                                        | 6  |
| 1.4 | Exemplos de aplicações de VANTs. . . . .                                                                                                           | 7  |
| 1.5 | VANT utilizado nos testes apresentados neste trabalho. . . . .                                                                                     | 10 |
| 2.1 | Tipos de <i>waypoints</i> . . . . .                                                                                                                | 15 |
| 2.2 | Condições para alcance de <i>waypoints</i> . . . . .                                                                                               | 15 |
| 2.3 | Demonstração das componentes e resultantes do campo vetorial em posições amostradas nas áreas internas, externas e tangentes à curva alvo. . . . . | 19 |
| 2.4 | Movimentos de ida e volta resultantes da decomposição Bustrófédon. . . . .                                                                         | 22 |
| 3.1 | Interseção entre duas superfícies, utilizadas para gerar a curva alvo. . . . .                                                                     | 28 |
| 3.2 | Curva de raio de 150 metros implícita em um campo vetorial. . . . .                                                                                | 33 |
| 3.3 | Exemplos da função $G(y)$ para diferentes valores da variável $\theta$ . . . . .                                                                   | 34 |
| 3.4 | Simulação com quatro condições iniciais para uma curva com diferentes valores de $\theta$ para a função $G(y)$ . . . . .                           | 35 |
| 3.5 | Simulação de um VANT percorrendo uma circunferência implícita em um campo vetorial para diferentes valores de $\theta$ . . . . .                   | 36 |
| 3.6 | Distância do VANT em relação à base, para diferentes valores da variável $\theta$ . . . . .                                                        | 36 |
| 3.7 | Comparação entre a referência e o ângulo de guinada do VANT percorrendo uma circunferência. . . . .                                                | 37 |
| 3.8 | Simulação de dois VANTs percorrendo uma circunferência implícita em um campo vetorial para diferentes valores de $\theta$ . . . . .                | 38 |
| 3.9 | Distância do VANT em relação à base, para diferentes valores da variável $\theta$ . . . . .                                                        | 39 |

|      |                                                                                                                            |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.10 | Comparação entre a referência e o ângulo de guinada do VANT percorrendo uma circunferência. . . . .                        | 39 |
| 3.11 | Curva implícita sendo percorrida por robôs holonômicos. . . . .                                                            | 40 |
| 3.12 | Comparação entre a curva implícita e o caminho percorrido pelo VANT simulado pelo software Horizon <sup>mp</sup> . . . . . | 41 |
| 3.13 | Caminho percorrido pelo VANT simulado no software Horizon <sup>mp</sup> para três condições de vento. . . . .              | 42 |
| 3.14 | Projeção isométrica do caminho percorrido pelo VANT durante um teste real de voo . . . . .                                 | 43 |
| 3.15 | Projeção vertical do caminho percorrido pelo VANT durante um teste real de voo . . . . .                                   | 43 |
| 4.1  | Polígono correspondente área de cobertura sendo rotacionado em busca de sua menor altura. . . . .                          | 47 |
| 4.2  | Esquema representando a relação entre as dimensões do sensor de imagem e as dimensões da área fotografada. . . . .         | 48 |
| 4.3  | Representação gráfica do procedimento utilizado para encontrar a direção ótima de cobertura. . . . .                       | 49 |
| 4.4  | Representação visual do grafo de adjacências posicionado geometricamente sobre a área de cobertura. . . . .                | 50 |
| 4.5  | Gráfico representando as etapas de uma missão utilizando dois VANTs. . . . .                                               | 54 |
| 4.6  | Exemplo mostrando como a ativação da Equação (4.15) impacta no resultado da solução do problema. . . . .                   | 56 |
| 4.7  | Resultados de simulações com e sem a inclusão de algumas restrições. . . . .                                               | 57 |
| 4.8  | Resultado da otimização com duas funções objetivos diferentes. . . . .                                                     | 58 |
| 4.9  | Resultados da otimização para diferentes condições. . . . .                                                                | 60 |
| 4.10 | Linhas de cobertura calculadas a partir de uma área selecionada para cobertura. . . . .                                    | 62 |
| 4.11 | Projeção no plano $xy$ do caminho percorrido pelo VANT em uma missão solo de cobertura. . . . .                            | 63 |
| 4.12 | Altitude do VANT em função do tempo. . . . .                                                                               | 64 |
| 4.13 | Projeção no plano $xy$ do caminho percorrido pelos VANTs em uma missão de cobertura em cooperação. . . . .                 | 65 |
| 4.14 | Altitude dos VANTs em função do tempo. . . . .                                                                             | 65 |
| 4.15 | Projeção no plano $xy$ do caminho percorrido pelos VANTs em uma missão de cobertura em cooperação. . . . .                 | 66 |
| 4.16 | Altitude dos VANTs em função do tempo. . . . .                                                                             | 66 |
| 4.17 | Sequência de imagens capturadas por um VANT em um voo para cobertura de uma área. . . . .                                  | 68 |

---

|      |                                                                                                      |    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.18 | Modelo tridimensional de superfície. . . . .                                                         | 69 |
| A.1  | Arquitetura do Sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados (SISVANT) utilizado neste trabalho. . . . . | 82 |
| A.2  | Evolução da fuselagem dos VANTs desenvolvidos para suporte desse projeto. . . . .                    | 84 |
| A.3  | Piloto automático mp2128 <sup>g</sup> . . . . .                                                      | 86 |
| A.4  | Estação de Controle no Solo. . . . .                                                                 | 87 |
| A.5  | Blocos da <i>toolbox</i> para Simulink fornecida pela fabricante do piloto automático. . . . .       | 93 |
| A.6  | Janela de configuração dos blocos da <i>toolbox</i> . . . . .                                        | 94 |
| A.7  | Modelo criado no Matlab Simulink para os experimentos do Capítulo 3. . . . .                         | 95 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                                                                    |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Dados de simulações comparando resultados da otimização com e sem heurística. . . . .              | 59 |
| 4.2 | Dados de simulações comparando resultados da otimização com heurística e pesos diferentes. . . . . | 60 |
| 4.3 | Dados das simulações sem heurística e com iterações. . . . .                                       | 61 |

# Lista de Siglas

|                |                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>ANAC</b>    | Agência Nacional de Aviação Civil                             |
| <b>ARP</b>     | Aeronave Remotamente Pilotada                                 |
| <b>AUVSI</b>   | Associação Internacional para Sistemas de Veículos Autônomos  |
| <b>CEA</b>     | Centro de Estudos Aeronáuticos                                |
| <b>CG</b>      | Centro de Gravidade                                           |
| <b>CNC</b>     | Comando Numérico Computadorizado                              |
| <b>CNPq</b>    | Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico |
| <b>CORO</b>    | Laboratório de Sistemas de Computação e Robótica              |
| <b>ECS</b>     | Estação de Controle de Solo                                   |
| <b>ERAST</b>   | Environmental Research Aircraft and Sensor Technology         |
| <b>ESC</b>     | Controlador Eletrônico de Velocidade                          |
| <b>EUA</b>     | Estados Unidos da América                                     |
| <b>FAA</b>     | Agência Reguladora da Aviação Norte-americana                 |
| <b>FAPEMIG</b> | Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais       |
| <b>FINEP</b>   | Agência Financiadora de Estudos e Pesquisas                   |
| <b>GPS</b>     | Sistema de Posicionamento Global                              |
| <b>IMU</b>     | Unidade de Medição Inercial                                   |
| <b>ITA</b>     | Instituto Tecnológico de Aeronáutica                          |
| <b>LiPo</b>    | Polímero de Lítio                                             |

---

|                |                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>MIT</b>     | Instituto de Tecnologia do Massachusetts                  |
| <b>NASA</b>    | Agência Espacial Norte-americana                          |
| <b>PDVA</b>    | Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos |
| <b>PID</b>     | Proporcional, Integral e Derivativo                       |
| <b>PPGEE</b>   | Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG  |
| <b>PVC</b>     | Policloreto de Vinil                                      |
| <b>SISVANT</b> | Sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados                 |
| <b>UAV</b>     | Unmanned Aerial Vehicle                                   |
| <b>UFAM</b>    | Universidade Federal do Amazonas                          |
| <b>UFMG</b>    | Universidade Federal de Minas Gerais                      |
| <b>VANT</b>    | Veículo Aéreo Não Tripulado                               |

# Capítulo 1

## Introdução

*Conhecimento científico é um poder que nos capacita para fazer o bem ou o mal, mas não traz instruções sobre como deve ser utilizado.*

Richard P. Feynman

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) estão se tornando cada vez mais viáveis para substituição de aeronaves tripuladas nas mais diversas aplicações. O desenvolvimento tecnológico da última década, aliado à diminuição do seu custo de operação, despertaram o interesse em massa e estão contribuindo para sua popularização. Esse texto aborda o tema da navegação de VANTs com o objetivo de dar mais autonomia e otimizar sua operação.

A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) é o órgão do governo brasileiro com competência para regulamentar a utilização de VANTs no Brasil. De acordo com ela, a definição de VANT é (ANAC, 2012):

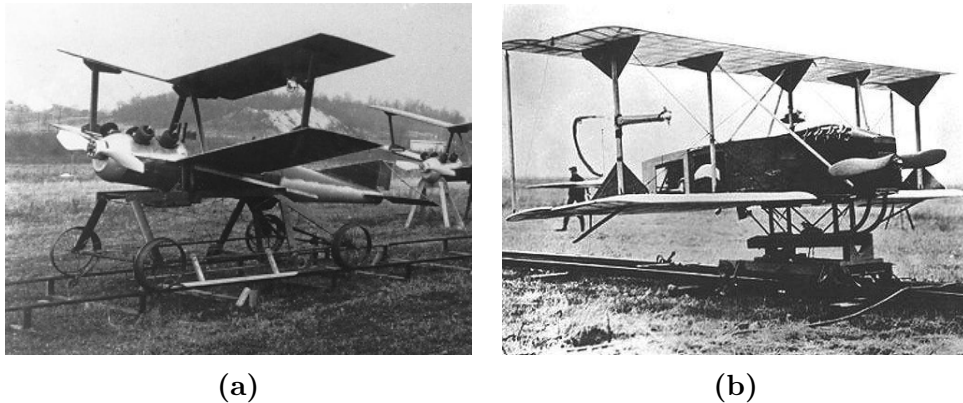
Aeronave projetada para operar sem piloto a bordo e que não seja utilizada para fins meramente recreativos. Nesta definição, incluem-se todos os aviões, helicópteros e dirigíveis controláveis nos três eixos, excluindo-se, portanto, os balões tradicionais e os aeromodelos.

Essa definição é muito ampla, uma vez que não diferencia uma Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) de uma aeronave autônoma, e nem especifica que a aeronave deve ser reutilizável, o que enquadraria alguns tipos de mísseis na categoria. Portanto, uma definição mais completa para VANT e que será utilizada no decorrer deste texto é:

Aeronave não tripulada, podendo ser remotamente pilotada ou autônoma, controlável nos três eixos, reutilizável e que não seja utilizada para fins meramente recreativos.

O Sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados (SISVANT) é o conjunto composto pelo VANT e todos os componentes adicionais necessários para sua operação. Normalmente, esse componentes são o controle remoto, o enlace de rádio, a estação de solo e a carga útil. Em adição à estes componentes, podem estar incluídos no SISVANT equipamentos de lançamento e recuperação, sistemas de comunicação com controle de tráfego, câmeras para visão em primeira pessoa, equipamentos de transporte de aeronave e outros equipamentos e sistemas de suporte.

A invenção do VANT é quase tão antiga quanto a do próprio avião e seu uso hoje está se difundindo nos mais diversos segmentos. Os primeiros registros de utilização de aeronaves não tripuladas datam do século XIX, com a utilização de balões de ar quente e pipas, ambos sem qualquer tipo de controle de voo. Em 22 de agosto de 1849, balões de origem Austríaca foram equipados com explosivos para um ataque à cidade italiana de Veneza. Alguns deles foram lançados a partir de navios e possuíam um mecanismo eletromagnético para detonação. Nem todos funcionaram, inclusive com alguns deles mudando de rota e retornando para explodir sobre os soldados austríacos. Na década de 1880, o inglês Douglas Archibald utilizou pipas equipadas com anemômetros para medição de velocidade do vento e câmeras



**Figura 1.1:** Primeiros VANTs utilizados como torpedos aéreos: (a) Kettering Bug. (KETTERING, 2014) (b) Sperry-Curtis Flying Bomb. (SPERRY-CURTIS, 2014)

fotográficas para obtenção de imagens do solo (FAHLSTROM; GLEASON, 2012). Estes experimentos serviram para mostrar o que futuramente seriam algumas das aplicações para os VANTs.

Os primeiros avanços que contribuíram para o que hoje definimos como VANT vieram na forma de torpedos aéreos, que foram desenvolvidos durante a 1ª Guerra Mundial. Nessa época, Charles Kettering e Lawrence Sperry criaram, respectivamente para o exército e marinha dos Estados Unidos da América (EUA), aviões biplanos não tripulados (Figura 1.1). Estes eram carregados de explosivos e eram dotados de um sistema rudimentar de controle, composto por giroscópio e barômetro. Um cálculo feito previamente por engenheiros estimava o número de revoluções que o motor deveria executar para levar o avião até o alvo. Quando este número era atingido, o motor parava e as asas eram liberadas, transformando o corpo do avião em uma bomba. Apesar dos esforços, nenhum deles se tornou operacional.

O controle por rádio foi introduzido na década de 1920, mas era utilizado apenas durante o lançamento, uma vez que o alcance era bastante reduzido. Em 15 de setembro de 1924, ocorreu o primeiro voo de uma aereo-

nave remotamente pilotada realizado em sua totalidade por controle via rádio (KEANE; CARR, 2013). Já em 1930 e durante a 2ª Guerra Mundial, o foco de aplicação por parte do Aliados mudou do bombardeio para o treinamento. Nessa época, milhares de aeronaves não tripuladas foram construídas para uso como alvo para artilharia terrestre e naval. A Alemanha, no entanto, desenvolveu o míssil de cruzeiro V-1, aprimorando os sistemas de propulsão e navegação (AUSTIN, 2010).

Nas décadas seguintes, de 1950 a meados de 1970, durante a Guerra do Vietnã, o uso de aeronaves não tripuladas em missões de reconhecimento aumentou muito. Estes sistemas eram remotamente pilotados a partir de estações de controle no solo, quando voavam em grandes altitudes e, por consequência, dentro do alcance do enlace de rádio. Quando o voo era em baixa altitude, o relevo impedia que os sinais de rádio chegassem até a estação de controle no solo, e por isso eram controlados partir de outras aeronaves de apoio. Tais aeronaves eram mais difíceis de detectar e abater que as aeronaves tripuladas, e principalmente, evitavam os incidentes diplomáticos causados pela captura de um piloto. Outra aplicação frequente nesta época era sua utilização acoplada a outras aeronaves, de onde era liberada posteriormente para despistar sistemas de radar inimigos. No final dessa década, missões com aeronaves não tripuladas já apresentavam taxas de sucesso superiores a 90% (FAHLSTROM; GLEASON, 2012).

No final dos anos 70 e durante dos anos 80, as forças armadas dos EUA procuraram desenvolver novos SISVANTs. Um desses esforços, chamado Aquila, sofreu muito com o inchaço causado pela adição de tecnologias e requisitos ao projeto inicial, o que causou aumento considerável de custo e de complexidade. Devido à dificuldades de integração de seus sistemas, o projeto foi cancelado após um gasto de mais de um bilhão de dólares. Nessa

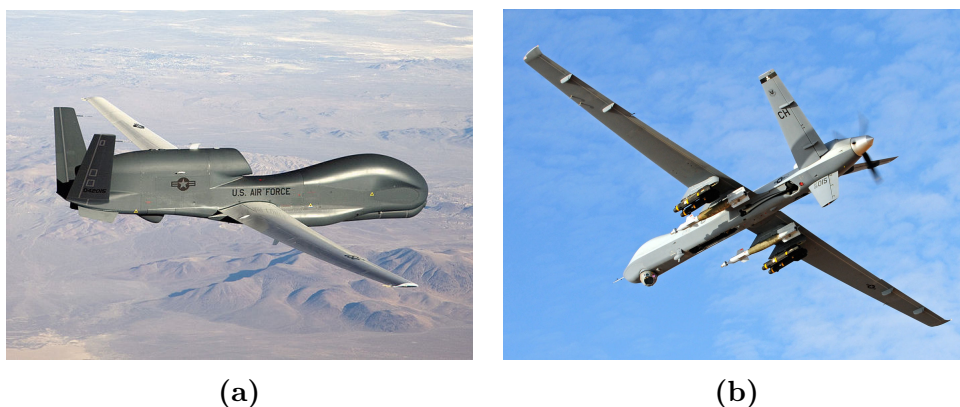


**Figura 1.2:** VANTs experimentais do projeto ERAST. (ERAST, 2014): (a) Helios. (b) Altus.

época, outros projetos foram mais bem sucedidos. Mas, para todos eles, ainda faltava uma peça de tecnologia que mudaria o paradigma de aeronaves remotamente pilotadas para veículos aéreos não tripulados.

A partir da década de 1990, o Sistema de Posicionamento Global (GPS), se tornou disponível e causou um grande impacto nas operações de VANTs. Seu alcance não estava mais limitado ao alcance dos sistemas de rádio, e a navegação não dependia mais apenas de sistemas baseados na estimação de estados a partir dos dados de sensores integrados ao longo do tempo. No campo de pesquisa, a Agência Espacial Norte-americana (NASA) foi responsável pelo projeto de pesquisa Environmental Research Aircraft and Sensor Technology (ERAST), que em conjunto com a indústria, serviu para demonstrar e testar tecnologia de propulsores, baterias e sensores em aplicações relacionadas às ciências da terra e meio ambiente (COX; SOMERS; FRATELLO, 2006). Este projeto contribuiu para o aumento da consciência da população em geral, uma vez que seus sucessos foram amplamente cobertos e divulgados pela mídia (Figura 1.2).

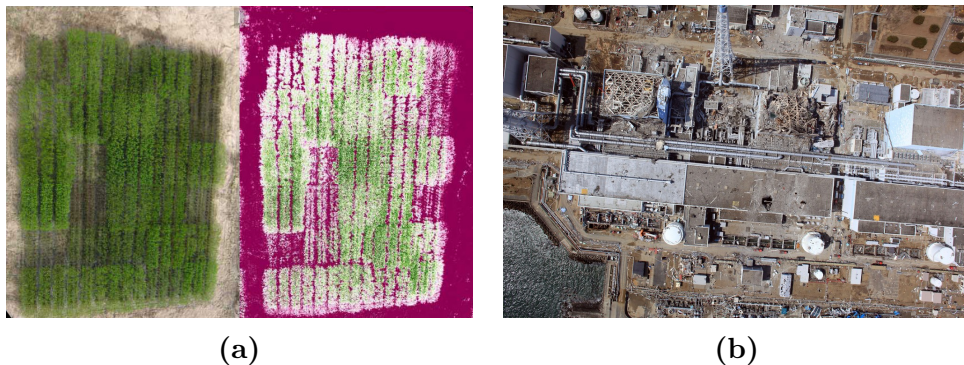
Dos anos 2000 em diante, o sinal do GPS passou a ser livre de interferências, pois a chamada disponibilidade seletiva foi encerrada pelo governo



**Figura 1.3:** (a) RQ-4B Global Hawk, VANT para missões de reconhecimento em voos de grande altitude e longa duração. (GRUMMAN, 2014) (b) MQ-9 Reaper, VANT para missões de vigilância e ataque em voos de media altitude e longa duração. (ATOMICS, 2014)

dos EUA. Isso elevou a precisão do sinal de 100 para menos de 20 metros. Ao mesmo tempo, a indústria microeletrônica, impulsionada pela demanda de implantação de tecnologias de processamento de movimentos em telefones móveis, conseguiu reduzir o tamanho e integrar o conjunto de sensores necessários para a Unidade de Medição Inercial (IMU), além de diminuir seu custo de aquisição. Tanto o aumento significativo na precisão do sinal do GPS quanto os avanços na indústria microeletrônica, possibilitaram que um número muito maior de pesquisadores passassem atuar ativamente no desenvolvimento de subsistemas e SISVANTs. Enquanto isso, os conflitos armados no Afeganistão e no Iraque, mostraram ao mundo a utilização massiva de SISVANTs militares para reconhecimento e combate. A silhueta de VANTs como o Global Hawk e Predador, utilizados com frequência neste período, passou a ser reconhecida e temida por grande parte da população (Figura 1.3). Com isso, o tema se tornou muito polêmico, com diversas manifestações contrárias ao uso militar de SISVANTs.

Atualmente, a pesquisa relacionada a SISVANTs e seu uso generalizado



**Figura 1.4:** Exemplos de aplicações de VANTs. (a) Imagem em infravermelho mostrando plantas saudáveis em uma plantação (PUBLICLAB, 2014). (b) Imagens do local do desastre nuclear de Fukushima, no Japão, capturadas por um VANT (SERVICES, 2014).

em aplicações não militares tem aumentado, mas ainda encontra barreiras regulatórias que impedem alguns avanços. Nos EUA, a Agência Reguladora da Aviação Norte-americana (FAA) pretende divulgar as normas para operação de SISVANTs apenas em 2015. No Brasil, a ANAC será um pouco mais rápida, prometendo uma consulta pública sobre o tema e divulgação das normas até o final de 2014. Apesar disso, há diversos esforços sendo realizados ao redor do mundo, para desenvolver estas tecnologias e aplicá-las comercialmente. Segundo estudos realizados pela Associação Internacional para Sistemas de Veículos Autônomos (AUVSI), este é um mercado com enorme potencial. Calcula-se que nos 3 anos seguintes à regulação do setor, apenas nos EUA, haveria um impacto econômico de 13,6 bilhões de dólares, com geração de mais de 34 mil empregos diretos e 70 mil empregos indiretos, com salário médio de mais de 40 mil dólares anuais (JENKINS; VASIGH, 2013).

Em geral, a utilização de VANTs em aplicações que poderiam ser realizadas por aeronaves tripuladas, se justifica em tarefas que são tediosas e podem ser automatizadas ou que podem apresentar algum risco para a tripulação.

Em adição, o custo de operação de um VANT é menor, em alguns casos chegando a ser 60% do custo de operação de uma aeronave tripulada preparada para uma aplicação similar. Muitas das aplicações de VANTs são baseadas no processamento de imagens de uma área de interesse, capturadas a partir de determinada altitude. Diversos segmentos podem se beneficiar desta aplicação, tais como mineração, construção civil e agricultura (Figura 1.4(a)). Este mesmo conceito pode ser aplicado em operações de busca e resgate e na tomada de decisão em situações de emergência, como em incêndios florestais e áreas atingidas por desastres (Figura 1.4(b)). Estas e outras aplicações motivaram a realização desse trabalho, como é detalhado a seguir.

## 1.1 Motivação

Um pequeno VANT, ou grupo de VANTs, de tamanho e peso suficientemente reduzidos para serem operados por até duas pessoas e capazes de voar por cerca de 40 minutos, podem cobrir uma área de pelo menos 80 hectares. Essa mobilidade é uma grande vantagem em situações em que a velocidade de resposta, a furtividade ou o tempo de execução são imprescindíveis para o sucesso de uma missão. Seja no meio da floresta amazônica procurando áreas de desmatamento ilegal e pistas de pouso clandestinas, mapeando uma área onde acaba de ocorrer um deslizamento de terra ou simplesmente fazendo um levantamento topográfico para a operação de uma mineradora, todos estes casos, e inúmeros outros, podem se beneficiar com a utilização deste tipo de ferramenta.

Na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), o Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos (PDVA) tem projetado, construído testado e operado VANTs desde 2006 (CAMPOS et al., 2007; ISCOLD; PE-

REIRA; TORRES, 2010). A partir de 2010, com ajuda de financiamento por parte do governo, o grupo passou a desenvolver novas plataformas de testes e estratégias de controle e guiagem que permitissem que um time de VANTs pudesse cooperar para realização de missões de cobertura de grandes áreas em tempo reduzido.

Assim, a motivação para este trabalho foi desenvolver uma solução, com a utilização de pequenos VANTs, que permita um combate mais enérgico da ilegalidade, respostas mais rápidas de equipes de socorro e uma gestão mais eficiente dos ativos das empresas. Os objetivos do trabalho serão detalhados na próxima seção.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho teve dois objetivos principais, ambos relacionados a navegação de VANTs de asas fixas. Primeiramente, a metodologia de circulação de curvas implícitas em campos vetoriais proposta por Gonçalves et al. (2010b), foi implementada e testada em simulações e experimentos reais, com o foco na navegação sobre estruturas longilíneas, tais como linhas de transmissão, estradas, gasodutos e fronteiras. O segundo objetivo visou otimizar a solução do problema de cobertura de áreas, para missões de levantamento topográfico, agricultura de precisão e busca e salvamento, com a utilização de um ou mais VANTs. Nesse caso, procurou-se escolher o número de VANTs adequado para a missão de cobertura da área, além de planejar o melhor caminho para cada VANT, resultando em uma missão realizada no menor tempo possível. Os caminhos gerados por esse algoritmo foram testados em simulações e com um grupo de VANTs. O VANT utilizado nos experimentos é mostrado na Figura 1.5. Maiores detalhes sobre o VANT são



**Figura 1.5:** VANT utilizado nos testes apresentados neste trabalho.

encontrados no Apêndice A.

## 1.3 Organização do Texto

O Capítulo 1 apresentou a história do desenvolvimento de VANTs, a motivação e os objetivos desse texto, a metodologia utilizada para abordar o problema e as contribuições propostas. No Capítulo 2, será apresentada uma revisão de literatura sobre o tema de guiagem de robôs móveis em campos vetoriais e cobertura de áreas utilizando VANTs. Em seguida, o Capítulo 3 mostra a utilização de uma metodologia para navegação de VANTs baseada na circulação de curvas implícitas em campos vetoriais. No Capítulo 4, é proposto um algoritmo baseado no problema de roteamento de veículos com janela de tempo para minimizar o tempo de cobertura de uma área de interesse. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 5. O Apêndice A apresenta a plataforma de VANTs utilizada para os testes das teorias apresentadas nos capítulos anteriores, além de detalhes sobre a integração entre o piloto automático Micropilot 2128<sup>g</sup> e o software Matlab.

# Capítulo 2

## Revisão de Literatura

*A mente do homem esticada por, uma nova ideia,  
nunca voltará às suas dimensões originais.*

Oliver Wendell Holmes

Nos últimos anos, notou-se um grande aumento no interesse relacionado ao desenvolvimento de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para as mais diversas aplicações. Pessoas ligadas a institutos de pesquisa do mundo todo e também do Brasil desenvolveram nas últimas duas décadas plataformas de pesquisa focadas para o desenvolvimento de Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados (SISVANTs).

Pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) criaram uma plataforma com oito VANTs para testes de algoritmos de controle e coordenação. Essa plataforma usa o piloto automático comercial Piccolo fabricado pela Cloud Cap (TECHNOLOGY, 2014). A estação de controle é responsável pelo planejamento de caminhos e pela guiagem dos VANTs e também é onde ocorre a troca de informações entre eles (KING et al., 2004). A plataforma de testes criada em Stanford, chamada DragonFly, consiste de dois VANTs totalmente desenvolvidos nos laboratórios da universidade. Ela é utilizada para testes de sistemas operacionais de tempo real e para validação experimental de controle híbrido e testes de algoritmos anticolisão. Algorit-

mos de controle e navegação são executados simultaneamente no hardware do piloto automático e a comunicação entre VANTs ocorre com ajuda da estação de controle no solo (TEO; JANG; TOMLIN, 2004). Na Universidade de Berkeley, pesquisadores desenvolveram uma plataforma para testar algoritmos de navegação baseados em visão computacional, desvio de obstáculos e patrulhamento cooperativo. O piloto automático utilizado é o Piccolo, que é utilizado para os algoritmos de controle, mas há um computador PC104 a bordo conectado à ele, responsável pela guiagem e navegação (TISDALE et al., 2006).

No Brasil também há diversos grupos de pesquisa desenvolvendo SISVANTs. No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Rangel, Kienitz e Brandão (2011) desenvolveram um SISVANT com aeronaves de asa fixa e asa rotativa para demonstrações conceituais. As principais aplicações exploradas por eles foram a inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica e o uso dos VANTs como retransmissores para auxílio na comunicação em áreas isoladas. Na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Campos et al. (2007) e Iscold, Pereira e Torres (2010) desenvolveram projetos de VANTs de asa fixa de pequeno e médio porte a partir de 2006. O projeto inicialmente utilizava aeromodelos vendidos comercialmente e equipados com uma plataforma para controle e comunicação desenvolvida no contexto do projeto e baseada no PC104. Foi desenvolvido um VANT de médio porte, chamado *Watchdog*, onde foram testadas as tecnologias e algoritmos utilizados nos pequenos VANTs anteriores. A partir de 2010, uma nova plataforma começou a ser desenvolvida, financiada por uma chamada da Agência Financiadora de Estudos e Pesquisas (FINEP), vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia (AVELLAR et al., 2013). Com isso, houve um grande salto de produção e testes de tecnologias relacionadas a SISVANTs, com vários dos subsistemas

sendo pesquisados, testados e melhorados por pesquisadores de diversas áreas da universidade em parceria com pesquisadores da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

Nas próximas seções será apresentada uma revisão da bibliografia contendo os conhecimentos fundamentais para o entendimento dos capítulos subsequentes, bem como o estado da arte na pesquisa e desenvolvimento nos temas de guiagem de VANTs com campos vetoriais e planejamento e otimização de caminhos para cobertura de áreas com VANTs.

## 2.1 Espaço de Configurações

A descrição de um robô, ou corpo rígido, no espaço livre pode ser feita através de sua posição e orientação. Em um ambiente tridimensional, essa representação corresponde a configuração  $q = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ , onde os primeiros três termos representam a posição e os últimos três representam a orientação. O conjunto de todas as configurações  $q$  possíveis é chamado de espaço de configurações, denotado por  $\mathcal{Q}$ . Planejar o caminho de um robô significa definir a sequência de configurações  $q_i$  que leva o robô de sua configuração inicial  $q_0$  para uma configuração final  $q_f$ .

Há diferentes formas para planejar caminhos para robôs móveis e uma das mais comuns se dá através da utilização de campos vetoriais artificiais. Em alguns casos, este campo é calculado a partir de uma função de potencial definida sobre o espaço de configurações do robô. Esta função de potencial deve ser real e diferenciável  $U : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$ , podendo ser interpretada como função de energia, cuja derivada, ou gradiente, é equivalente à força. O gradiente é um vetor  $\nabla U(q) = [\frac{\partial U}{\partial q_1}(q), \dots, \frac{\partial U}{\partial q_m}(q)]^T$  que aponta na direção do crescimento máximo de  $U$  no ponto onde foi avaliado. Assim, o

campo vetorial é resultado do cálculo do gradiente em cada ponto do espaço de configurações  $\mathcal{Q}$  e é utilizado como sinal de entrada para velocidade ou aceleração (CHOSET et al., 2005).

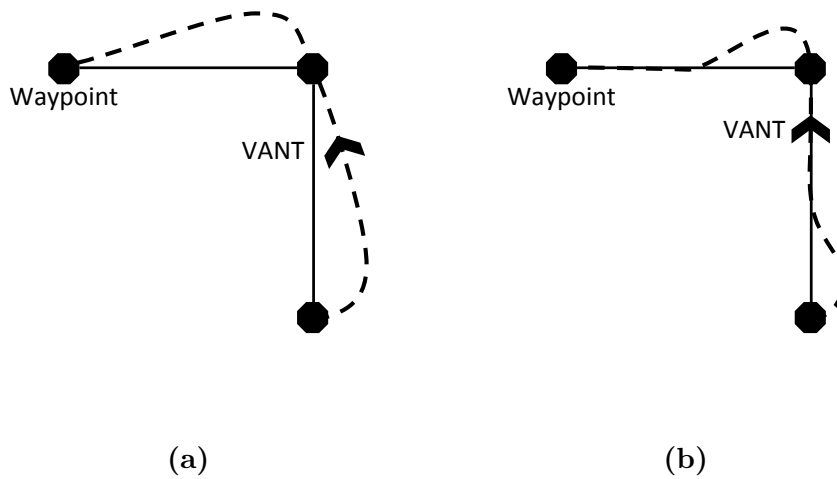
## 2.2 Navegação por *Waypoints*

A navegação baseada em *waypoints* é uma das formas mais básicas de navegação e está implementada na maioria dos pilotos automáticos encontrados no mercado. Ela consiste na definição de uma série coordenadas geográficas de latitude e longitude, que deverão ser alcançadas pelo VANT. A direção do próximo *waypoint* em relação à posição atual do VANT é usada como referência para o ângulo de guinada na malha que controla o ângulo de rolagem.

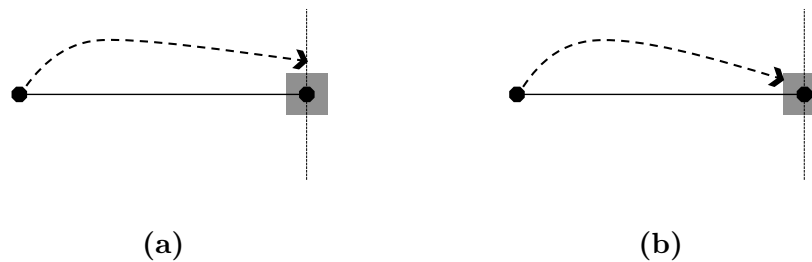
O piloto automático 2128<sup>g</sup> da Micropilot, conta com dois tipos de *waypoints* que podem ser alcançados de duas formas diferentes. Os *waypoints* do tipo `flyTo` fazem o VANT voar para o próximo *waypoint* sem alteração de altitude e velocidade, mas não compensam desvios causados por vento. Já os *waypoints* do tipo `fromTo` fazem o VANT voar para o próximo *waypoint* seguindo uma linha imaginária que o liga o *waypoint* atual ao *waypoint* anterior (Figura 2.1).

Para identificar que o VANT alcançou um *waypoint*, uma das duas condições devem ser atendidas (Figura 2.2):

1. O VANT alcançará um *waypoint* ao cruzar a linha imaginária que passa pelo centro do *waypoint* e é perpendicular à linha que une o *waypoint* atual e o anterior.
2. O VANT alcançará um *waypoint* ao entrar em uma área quadrada centralizada no *waypoint* e de lado duas vezes maior que seu diâmetro,



**Figura 2.1:** Tipos de *waypoints*: (a) flyTo e (b) fromTo.



**Figura 2.2:** Condições para alcance de *waypoints*.

que pode ser configurado de forma arbitrária pelo usuário.

Estes conceitos serão importantes ao utilizar sequências de *waypoints* para determinar linhas paralelas de cobertura sobre uma área de interesse.

## 2.3 Navegação em Campos Vetoriais

Uma das principais vantagens da utilização de campos vetoriais artificiais é o fato de ser uma abordagem de malha fechada. Isso significa que o planejamento do caminho está integrado ao controle do sistema, resultando em uma maior robustez a erros dos atuadores e de localização. Eles já foram

utilizados de diversas formas diferentes por vários autores (KHATIB, 1985; CONNOLLY; BURNS; WEISS, 1990; RIMON; KODITSCHEK, 1992; PIMENTA; PEREIRA; MESQUITA, 2007; ZHANG; LAVALLE; MANOCHA, 2009; MASOUD, 2009; PEREIRA et al., 2009). Khatib (1985) propôs a primeira técnica de planejamento de movimento baseada em campos vetoriais, que consistia na soma de funções de potencial atrativos para os alvos e funções de potencial repulsivas para os obstáculos. O resultado era uma função de potencial global cujo negativo do gradiente era utilizado como sinal de controle para o robô. Apesar da elegância, o método sofria com a ocorrência de mínimos locais. Esse problema foi resolvido por Rimon e Koditschek (1992), por meio da introdução de funções de navegação, que são funções de potencial global com apenas um ponto de mínimo, correspondente ao alvo do robô. Mais recentemente, a geração e o rastreamento de padrões passaram a ser pesquisados, já que aplicações como vigilância, acompanhamento e monitoramento de fronteiras e estruturas longilíneas podem se beneficiar das soluções encontradas. Problemas deste tipo envolvem o controle de um ou mais robôs, com o objetivo de que eles convirjam para uma curva preespecificada. Já os problemas de rastreamento de padrões tem objetivo parecido, que é fazer os robôs convergirem para uma curva fechada e fazendo-os circularem-na repetidas vezes.

Há diversos trabalhos em que campos vetoriais artificiais são utilizados para resolver o problema de geração de padrões para padrões bidimensionais estáticos e múltiplos robôs planares (CHAIMOWICZ; MICHAEL; KUMAR, 2005; HSIEH; KUMAR, 2006; PIMENTA et al., 2007). Neles, um campo vetorial, responsável por atrair os robôs para o padrão, é somado a outro campo, responsável por evitar colisões entre os robôs. Nestes trabalhos, a diferença se encontra na forma como o campo é calculado. Chaimowicz,

Michael e Kumar (2005) calculam o campo como o gradiente de uma função, que é construída a partir da interpolação de várias funções de base radial centralizadas em amostras da curva de interesse. Hsieh e Kumar (2006) também calculam o campo da mesma forma, mas a componente referente à anticolisão foi melhorada, o que permitiu provas de convergência para o grupo de robôs. Já Pimenta et al. (2007) propõe uma abordagem diferente, ao utilizar um método numérico para calcular um campo elétrico responsável por atrair um enxame de robôs para o padrão. Um das vantagens deste método é que ele torna mais simples a inclusão de obstáculos previamente conhecidos. Outra contribuição deste trabalho foi o uso de modelos de dinâmica de fluidos para o cálculo das interações entre os robôs.

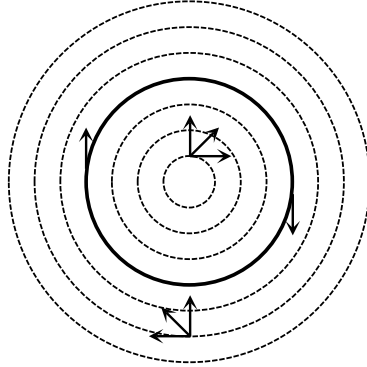
As soluções utilizadas para a circulação de curvas usando campos vetoriais são similares às mencionadas no parágrafo anterior. O campo que faz o robô se aproximar da curva deve ser somado a outro campo, que fará o robô circular a curva. Em (HSIEH; LOIZOU; KUMAR, 2007), um campo vetorial dinâmico é calculado e utilizado para fazer robôs circularem uma curva estática bidimensional. Apesar da natureza estática da curva, o campo deve ser dinâmico pois é atualizado de acordo com as posições dos robôs, de modo a evitar colisões. Ceccarelli et al. (2008) também lida com o problema de guiagem para robôs móveis no plano bidimensional e apesar de se restringir a uma curva circular, o autor mostra provas de convergência para um grupo de robôs não-holonômicos.

Em outros trabalhos, há soluções focadas em VANTs de asa fixa, em que existe uma restrição relacionada à velocidade mínima da aeronave, abaixo da qual ela iria estolar e por isso a convergência para um ponto específico não faz sentido. Nesse caso, as missões podem ser modeladas como um problema de circulação de curvas fechadas. Frew et al. (2007) utiliza campos vetoriais

para controlar VANTs para que sigam curvas circulares centralizadas em três tipos de aplicações: seguindo alvos móveis localizados no solo, rastreando uma nuvem de produtos químicos liberada na atmosfera e como repetidores móveis de sinais em redes *ad-hoc*. Apesar dos autores mostrarem resultados experimentais da solução, não mostram provas formais que considerem a natureza variante no tempo da curva, devido à mobilidade dos alvos. Em um trabalho mais recente, os autores abordam a natureza variante no tempo em curvas expansivas em formato de estrela no espaço tridimensional, mostrando provas formais de sua convergência (FREW; LAWRENCE, 2012).

A navegação tradicional, baseada em *waypoints*, pode ser modelada como um problema de circulação de curvas se os *waypoints* forem utilizados como amostras de uma dessas curvas. Nesses casos, o maior desafio é a construção de um campo que seja contínuo, mesmo nas transições entre *waypoints*. Usando a metodologia proposta por Lawrence, Frew e Pisano (2008), é possível gerar campos vetoriais contínuos para qualquer curva que possa ser construída a partir da deformação de uma circunferência. Mas como essa técnica não prevê o uso de *waypoints*, os autores propuseram um algoritmo para alternar o *waypoint* ativo em um dado momento, o que gera campos descontínuos. Iscold, Pereira e Torres (2010) calculam um campo vetorial contínuo, baseado em uma sequência de *waypoints* posicionados dentro de um corredor poligonal. Em seguida, aplicam a metodologia proposta por Pimenta, Pereira e Mesquita (2007) para criar um campo vetorial dentro do corredor. As maiores desvantagens do método são a dificuldade de estendê-lo para espaços de trabalho tridimensionais e a descontinuidade do campo nas bordas do corredor. Em uma situação com vento excessivo, o VANT pode ser empurrado para fora do corredor, sem conseguir retornar para dentro dele.

Gonçalves et al. (2010b) propõe o cálculo de um campo vetorial para um



**Figura 2.3:** Demonstração das componentes perpendicular e tangencial e a resultante do campo vetorial em posições amostradas nas áreas internas, externas e tangentes à curva alvo.

único robô, em seu espaço de configurações, fazendo-o circular e convergir para uma curva fechada. Esta curva é obtida através da interseção de  $n - 1$  funções em  $n$  dimensões. O campo vetorial então pode ser calculado como resultado da soma de três termos. O primeiro é uma composição dos gradientes das funções utilizadas para a construção da curva e é responsável por atrair o robô para a curva. O segundo termo, ortogonal ao primeiro, faz o robô continuar percorrendo a curva, mesmo após convergir para ela (Figura 2.3). E o terceiro termo, que é opcional, pode ser utilizado em situações em que a curva é variante no tempo. Os algoritmos propostos por Gonçalves et al. (2010b) foram utilizados neste trabalho e os resultados serão apresentados e discutidos no Capítulo 3.

Gonçalves, Pimenta e Pereira (2011) utilizam o campo proposto em (GONÇALVES et al., 2010b) para a convergência e circulação de um grupo de robôs com restrições holonômicas em curvas implícitas. Os robôs são modelados como esferas com um modelo dinâmico associado e com restrições relacionadas a velocidade mínima. Para evitar colisões entre os robôs, o controle é dividido em duas etapas. Na primeira, os robôs se organizam sobre a curva bus-

cando suas posições, mas em diferentes altitudes. Uma vez distribuídos, os robôs diminuem sua altitude de voo, convergindo para a curva. O assunto é aprofundado por Jesus et al. (2013), com a apresentação de garantias de convergência e não-colisão durante toda execução da tarefa. Pimenta et al. (2013) também adaptou o campo proposto em (GONÇALVES et al., 2010b) para a convergência e circulação de enxame de robôs, incluindo o sistema anti-colisão no cálculo do campo vetorial. Os resultados foram validados com um time de VANTs quadro-rotores.

Ainda tratando de enxames de robôs, Pimenta et al. (2013) desenvolveu leis de controle baseadas na dinâmica dos fluidos a aplicando-as na solução de um problema de geração de padrões. Os controladores de cada robô são descentralizados e cada um deles se comporta como uma partícula no fluido. A abordagem leva em consideração obstáculos estáticos e dinâmicos. O método também é testado com robôs não holonômicos e provas de estabilidade e convergência são apresentadas para situações sem a presença de obstáculos.

## 2.4 Otimização de Caminhos para Cobertura de Áreas

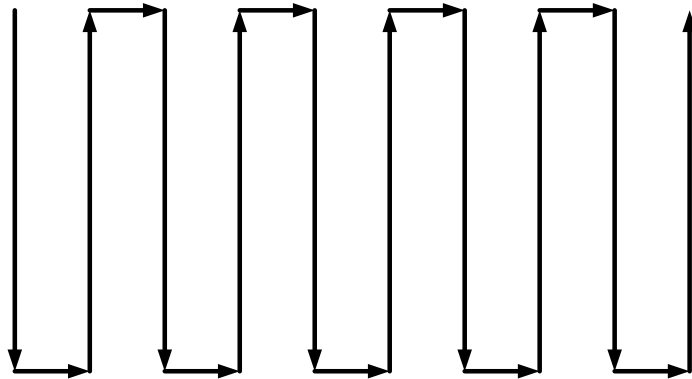
A utilização de campos vetoriais é vantajosa para o monitoramento e inspeção de estruturas longilíneas mas, para cobertura de áreas, é necessário planejar o caminho do VANT, ou grupo de VANTs, de modo que a área de interesse seja inteiramente coberta. Nesse caso, a simples distribuição aleatória ou através de escolha por parte do usuário não garante a cobertura completa e nem a melhor eficiência na execução da missão.

Um dos trabalhos mais antigos relacionados ao tema definiu os requisitos que um robô deve atender para cumprir uma missão de cobertura (CAO;

HUANG; HALL, 1988). Alguns desses requisitos são: o robô deve se mover pela área cobrindo-a completamente, deve seguir um caminho que não se sobreponha ou que se repita e deve evitar colisões. O problema de cobertura é relacionado diretamente com uma variante do problema do caixeiro viajante, onde ao invés de visitar cidades, o caixeiro deve visitar as áreas adjacentes à cada cidade (ARKIN; HASSIN, 1994). Como o problema do caixeiro viajante é NP-difícil, o tempo para obter uma solução aumenta drasticamente com o aumento de sua dimensão. Outro problema relacionado com a cobertura de áreas é a rota do vigilante, cuja solução é a menor rota que começa e termina no mesmo ponto tal que cada ponto na área de interesse seja visível de pelo menos uma posição da rota (SHERMER, 1992).

Algoritmos de cobertura podem ser classificados como heurísticos ou completos dependendo se conseguem ou não garantir formalmente a cobertura do espaço (GALCERAN; CARRERAS, 2013). Outra forma de classificá-los é se o processamento é *online* ou *offline* (CHOSSET, 2001). O processamento *offline* depende do conhecimento prévio do espaço e assume que ele seja invariante no tempo. Algoritmos *online* por sua vez, não necessitam de conhecimento prévio do espaço e dependem de medições de sensores em tempo real para conhecer a área.

Em alguns casos, uma abordagem interessante para o problema de cobertura é realizá-la de forma aleatória. É assim que alguns robôs móveis utilizados para limpeza doméstica realizam suas missões, baseando-se na ideia de que se o chão for varrido aleatoriamente por tempo suficiente, deve ficar completamente limpo (PALACIN et al., 2005). A grande vantagem do método é que não são necessários sensores de posicionamento caros e recursos computacionais para execução de algoritmos. No entanto, estas soluções são difíceis de serem estendidas para VANTs, onde o combustível é limitado e o



**Figura 2.4:** Movimentos de ida e volta resultantes da decomposição Boustrophédon.

prognóstico do seu fim é catastrófico.

Choset e Pignon (1998) abordaram o tema desenvolvendo a decomposição Boustrophédon, que é uma forma de decomposição celular exata, com propósito específico de cobertura. Boustrophédon é um tipo de escrita bi-direcional, em que cada linha tem sua direção alternada ao longo do texto. O termo é derivado do grego e significa “o caminho do boi”, que remete ao movimento dos animais quando são usados para arar a terra em uma plantação (Figura 2.4). O algoritmo proposto consiste na divisão do espaço de configurações e da utilização de movimentos de ida e volta para cobertura de uma área. Como a área é previamente conhecida, o método evita a colisão com obstáculos.

Xu e Stentz (2011) desenvolveram uma abordagem que utilizou grafos para representar o ambiente em que a cobertura deve acontecer, assumindo que um mapa está previamente disponível, mas que este pode ser impreciso. O algoritmo do caixeiro viajante é usado para modelar o problema, com a possibilidade de se realizar mudanças *online* no grafo. Um número fixo de múltiplos robôs podem ser utilizados, e o algoritmo permite equalizar e minimizar o tempo de cobertura destes robôs.

Há vários trabalhos na literatura lidando com o planejamento dos cami-

nhos para cobertura de áreas em relação a otimização de seu comprimento ou tempo necessário para percorrê-lo. Somente é possível otimizar o planejamento para espaços previamente ou parcialmente conhecidos (GALCERAN; CARRERAS, 2013), por isso todos os métodos são classificados como *offline*.

Uma forma simples de otimização é através da escolha da direção das linhas obtidas a partir da decomposição Bustrofédon, que serão percorridas durante a cobertura. A ideia é minimizar o número de curvas do caminho, pois cada uma delas aumenta o custo por causas das desacelerações e acelerações envolvidas em cada curva. A direção ótima para varredura é obtida pelo alinhamento com o eixo de maior comprimento e, assim, efetivamente aumentando o comprimento das linhas de cobertura (HUANG, 2001). Como exemplo, observando a Figura 2.4, foram necessárias nove curvas para ligar as 10 linhas de cobertura (verticais) e cobrir a área. Se a direção das linhas de cobertura fosse horizontal, ou seja, se houvesse uma rotação de  $\pi/2$  raios na direção de cobertura, seriam necessárias 5 linhas de cobertura, com 4 curvas ligando-as.

Xu, Viriyasuthee e Rekleitis (2011) apresentaram uma aplicação da decomposição Bustrofédon para VANTs. Inicialmente o espaço é particionado em células que não se sobrepõem e em seguida modelado como o problema do carteiro chinês. Esse é o nome dado à variante do problema do caixeiro viajante em que se deseja visitar cada cidade apenas uma vez. O problema é resolvido através de uma busca exaustiva no grafo de adjacências, computando o circuito Euleriano pelos vértices do grafo. Por fim, os caminhos de cada célula são concatenados gerando o caminho completo para cobertura. O caminho planejado leva em consideração as restrições cinemáticas do VANT e os algoritmos propostos foram testados em mais de 200 km de testes com um VANT de asa fixa real.

Outros pesquisadores aplicaram as soluções baseadas na busca em grafos para utilização simultânea com múltiplos VANTs. Há diversas vantagens na utilização de múltiplos robôs na cobertura de áreas. É intuitivo afirmar que tempo para completar a missão diminuirá devido à divisão das tarefas (GALCERAN; CARRERAS, 2013). Além disso, um time de robôs aumenta a robustez do sistema, pois a falha de um dos membros do time pode ser compensada pelos outros robôs. A maior parte das abordagens deste tipo é simplesmente uma extensão dos métodos de cobertura com um robô, mas há algumas estratégias totalmente originais, como será mostrado a seguir.

Ahmadzadeh et al. (2006) propôs um algoritmo de cobertura com foco em vigilância usando um time de VANTs. O sistema foi modelado como um problema de programação linear inteira, levando em consideração a manobrabilidade limitada e restrições relacionadas à câmeras fixas à fuselagem. A eficácia do método foi validada através de simulação e experimentos. Maza e Ollero (2007) propõem a cobertura de áreas levando em consideração a heterogeneidade dos VANTs utilizados, como autonomia, velocidade e dinâmicas diferentes. Seu método propõe um particionamento da área de interesse. Em seguida, os VANTs são designados para cada uma das sub-áreas. O algoritmo então encontra a melhor direção para cobertura, que será feita com movimentos semelhantes àqueles da decomposição bustrofédon. Uma consideração importante sobre o método proposto é sua baixa complexidade, sendo possível executá-lo em tempo real.

No Capítulo 4 será apresentada uma solução para o problema de cobertura de áreas utilizando múltiplos VANTs. A solução consiste no planejamento da missão com objetivo de minimizar o tempo de cobertura. O planejamento ocorre em dois estágios. No primeiro, a área é decomposta e a direção ótima para as linhas de varredura é calculada por meio de uma função de diâmetro

de polígonos. Antes do próximo passo, a área é dividida em linhas de cobertura de acordo com as características dos VANT, do voo e das câmeras utilizadas, assumindo que todos os equipamentos são homogêneos. No segundo passo, cada linha de cobertura é modelada como um par de vértices em um grafo e a solução para o problema de roteamento de veículos com janela de tempo fornece o caminho ótimo que deverá ser seguido pelos VANTs para completar a missão no menor tempo possível. A maior contribuição dessa abordagem é que a escolha do número de VANTs utilizados não é fixa pois mostra-se que em algumas situações, aumentar o número de VANTs pode tornar solução menos eficiente.

O próximo capítulo mostrará a aplicação da metodologia baseada em campos vetoriais para para navegação de VANTs. Os algoritmos propostos por Gonçalves et al. (2010a) implementados neste trabalho para guiagem de VANTs de asa fixa, com suas resultados apresentados e discutidos a seguir.

# Capítulo 3

## Cobertura de Fronteiras

*Ventos e ondas sempre estarão do lado dos mais hábeis navegadores.*

Edward Gibbon

Neste capítulo serão apresentados a implementação, simulação e experimentos da metodologia de guiagem de robôs móveis em curvas implícitas em campos vetoriais, proposta por Gonçalves et al. (2010a), e com aplicação na cobertura de estruturas longilíneas, como fronteiras, linhas de transmissão e vias de transporte. A Seção 3.1 mostrará a metodologia citada. Em seguida, na Seção 3.2 será mostrada a aplicação das teorias propostas em ambiente de simulação utilizando o software Horizon<sup>mp</sup> e Matlab Simulink. Finalmente, na Seção 3.3 serão mostrados resultados de experimentos realizados em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

### 3.1 Metodologia

Esta seção apresenta um resumo da metodologia mostrada em Gonçalves et al. (2010a). O objetivo é criar um campo vetorial contínuo que possa ser usado para guiar um VANT em uma curva fechada.

Simplificando a dinâmica do VANT como um veículo holonômico e pon-

tual, temos:

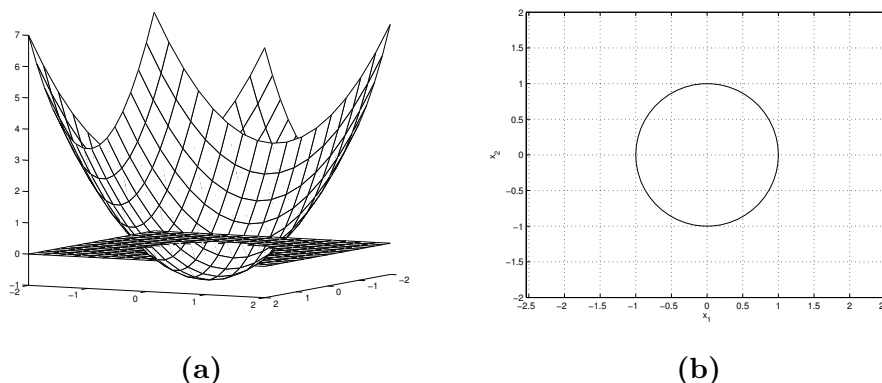
$$\dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{u}(t) \quad (3.1)$$

onde  $\mathbf{q}(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$  é a posição do VANT em relação à base no instante  $t$  e  $\mathbf{u}(t)$  é a entrada de controle neste mesmo instante. Deseja-se fazer com que  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{v}(x_1, x_2)$ , isto é, que a entrada de controle seja igual a um campo vetorial calculado na posição do VANT no espaço.

Como o VANT não tem uma dinâmica tão simples e é um veículo não-holonômico, pois há menos atuadores do que graus de liberdade, o cálculo do campo vetorial serve como um planejamento em alto nível do caminho a ser seguido. Deve haver um sistema de controle que garanta que o VANT consiga seguir este campo e, por consequência, siga também a curva. Neste caso, há uma malha de controle, chamada *Roll from Heading*, que tem como entrada um ângulo de guinada e cuja ação de controle é o rolamento da aeronave, que inicia uma curva que direciona o VANT até que o sentido deste ângulo seja alcançado. Portanto, a entrada de controle dessa malha é a direção em que o vetor  $\mathbf{u}(t)$  aponta.

O campo vetorial que será utilizado como referência para a entrada de controle é formado por dois componentes. O primeiro componente é perpendicular à curva que se deseja seguir, responsável por aproximar o VANT da curva. O segundo componente é tangencial e é responsável por manter o VANT circulando a curva alvo (Figura 2.3). Assume-se que a curva está contida em um plano e é fechada, ou seja, em  $\mathbb{R}^2$  a curva pode ser escrita como  $\phi(x_1, x_2) = 0$ . Ainda, a função  $\phi$  deve ser escolhida de modo que seja positiva fora da curva alvo e negativa dentro dela.

Na Figura 3.1 é possível observar a interseção entre as funções  $\phi_1(x_1, x_2) = 0$  e  $\phi_2(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 1$ , gerando a curva alvo  $x_1^2 + x_2^2 = 1$ . O gradiente da função  $\phi_i(x_1, x_2)$  aponta na direção do crescimento desta função, e será



**Figura 3.1:** (a) Interseção entre o plano  $\phi_1(x_1, x_2) = 0$  e  $\phi_2(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 1$ , gerando a curva alvo  $x_1^2 + x_2^2 = 1$ . (b) Curva alvo  $x_1^2 + x_2^2 = 1$ .

utilizado para aproximar o VANT da curva. Note que ao avaliar a função,  $\phi(x_1, x_2) = C$ , caso  $C < 0$ , o VANT se encontrará dentro da curva e apenas o gradiente será suficiente para aproximá-lo da curva. Caso  $C > 0$ , o VANT se encontrará fora da curva, situação em que se o crescimento do gradiente for seguido, o afastará ainda mais da curva. Portanto, ao calcular a componente do campo vetorial responsável por aproximar o VANT da curva, deve haver um fator que mude a direção do campo vetorial conforme a posição, interna ou externa, do VANT em relação à curva alvo.

Assim, a componente perpendicular, que aproxima o VANT da curva, deve ser calculada da forma a seguir:

$$\mathbf{P}(x_1, x_2) = a(x_1, x_2)\nabla\phi(x_1, x_2), \quad (3.2)$$

onde o escalar  $a(x_1, x_2)$ , multiplica o gradiente da função  $\phi$  e deve ter sinal negativo, quando o VANT estiver fora da curva, sinal positivo, quando ele se encontrar dentro dela, e ser nulo quando o VANT estiver sobre a curva. Como a posição do VANT em relação à curva pode ser conhecida pelo sinal

da função  $\phi$ , o escalar  $a$  deve ter a seguinte forma:

$$a(x_1, x_2) = G(\phi(x_1, x_2)) \quad (3.3)$$

em que  $G(y)$  tem as seguintes propriedades:  $G(y) > 0$  para  $y < 0$ ,  $G(y) < 0$  para  $y > 0$  e  $G(y) = 0$  para  $y = 0$ . Como queremos que os movimentos do VANT sejam suaves, devemos escolher uma função  $G(y)$  que seja contínua. O exemplo mais simples para esta função é  $G(y) = -y$ .

Para manter o VANT circulando a curva, é utilizado um vetor que é ortogonal ao gradiente, chamado campo Hamiltoniano. Essa componente, tangente à curva alvo, pode ser escrita da forma a seguir:

$$\mathbf{T}(x_1, x_2) = b(x_1, x_2) \nabla_H \phi(x_1, x_2), \quad (3.4)$$

onde  $\nabla_H \phi = \left( -\frac{\partial \phi}{\partial x_2} \frac{\partial \phi}{\partial x_1} \right)^T$  é o campo Hamiltoniano e  $b$  deve ter a seguinte forma:

$$b(x_1, x_2) = H(\phi(x_1, x_2)), \quad (3.5)$$

onde  $b$  é um escalar não nulo com sinal escolhido de acordo com o sentido desejado para a circulação. Os exemplos mais simples para a função  $H$  são  $H(y) = 1$  ou  $H(y) = -1$ .

Somando as componentes perpendicular e tangencial, chega-se ao campo vetorial  $\mathbf{v}$ , dado por:

$$\mathbf{v}(x_1, x_2) = \mathbf{P}(x_1, x_2) + \mathbf{T}(x_1, x_2), \quad (3.6)$$

que pode ser usado como entrada para a malha que controla o ângulo de rolagem do VANT a partir de um ângulo de guinada de referência. Enquanto o VANT não estiver sobre curva, a componente perpendicular o direcionará

para ela, enquanto a componente tangencial o manterá circulando-a. Ao alcançar a curva, a componente perpendicular se anulará, restando apenas a componente tangencial fazendo o VANT percorrê-la.

Para formalizar matematicamente a metodologia, Gonçalves et al. (2010a) propõe a definição e teorema apresentados a seguir:

**Definição 3.1** *Uma função  $G : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  neste texto é qualquer função que pode ser obtida como a derivada de uma função negativa definida diferenciável tal que a derivada se anule somente na origem.*

Escolhendo  $G(y) = -y$ , como já proposto, nota-se que  $G(y) = \frac{d}{dy}(-\frac{1}{2}y^2)$  e  $-\frac{1}{2}y^2$  é uma função negativa definida, cuja derivada só se anula na origem, o que garante as propriedades da função  $G(y)$  já mencionadas. Assim, podemos provar a convergência deste método.

**Teorema 3.1** *Seja  $\phi(x_1, x_2)$  uma função com as seguintes propriedades:*

- *A curva de nível  $\phi(x_1, x_2)$  é conexa;*
- *As derivadas parciais de  $\phi$  são contínuas;*
- *$\nabla\phi$  é não nulo na curva  $\phi = 0$ .*

*Considere o sistema:*

$$\dot{\mathbf{q}} = g(x_1, x_2)G(\phi(x_1, x_2)) \nabla\phi(x_1, x_2) + h(x_1, x_2)H(\phi(x_1, x_2)) \nabla_H\phi(x_1, x_2), \quad (3.7)$$

*com  $G(\phi)$  de acordo com a Definição 3.1,  $H(\phi)$  uma função contínua tal que  $H(0) \neq 0$  e  $g$  e  $h$  funções positivas e contínuas para qualquer  $x_1, x_2$ . Se todos os pontos de equilíbrio do sistema em questão, que são os pontos no qual  $\nabla\phi = 0$ , são instáveis, então a variável  $q$  é conduzida para a curva  $\phi = 0$  e a*

*mantém percorrendo em um sentido fixo para todas as condições iniciais  $q_0$  que não são pontos de equilíbrio.*

*Prova:*

A prova vem diretamente do princípio de Krasovskii-LaSalle. Considere a função:

$$V(x_1, x_2) = - \int_0^{\phi(x_1, x_2)} G(y) dy, \quad (3.8)$$

que é positiva definida devido a própria definição da função  $G$ . Derivando com relação ao tempo tem-se:

$$\dot{V} = -G(\phi)\nabla\phi^T\dot{\mathbf{q}}, \quad (3.9)$$

substituindo a expressão de  $\dot{\mathbf{q}}$  e usando o fato que  $\nabla\phi$  e  $\nabla_H\phi$  são ortogonais:

$$\dot{V} = -g(x_1, x_2)G(\phi)^2\|\nabla\phi\|^2. \quad (3.10)$$

Assim, devido as hipóteses em  $g$  e  $G$ ,  $\dot{V}$  é negativa semidefinida e nula apenas na curva alvo, quando  $\phi = 0$ , ou nos pontos de gradiente nulo (que são pontos de equilíbrio). Como os pontos de equilíbrio são instáveis, por hipótese, o sistema se aproxima da curva  $\phi(x_1, x_2) = 0$ .

Uma vez na curva alvo, só restará a componente tangencial, pois  $G(0) = 0$ , que manterá a variável  $\mathbf{q}$ , que representa a configuração do VANT, percorrendo a curva no sentido escolhido. A curva deve ser conexa pois caso contrário surgirão curvas degeneradas como, por exemplo, duas curvas disjuntas. ■

Conforme pode ser observado no Teorema 3.1 e sua prova, não há necessidade de assumir que a curva alvo seja fechada e que a função  $\phi$  seja negativa dentro da curva e positiva fora dela. De todo o modo, continua-

remos utilizando funções que tenham essa características, pela facilidade de implementação. A função  $H$ , que inicialmente assumiu-se não nula, precisa ter essa característica apenas na origem, pois a circulação só é realmente necessária na curva alvo. As funções  $g$  e  $h$ , introduzidas no Teorema 3.1, não alteram sentido ou direção das componentes, e servem para tornar o campo vetorial normalizado.

Como a direção da configuração  $\mathbf{q}(x_1, x_2)$  será utilizada como referência para a malha que controla a direção do VANT, é desejável que o campo vetorial seja normalizado. Para que o campo seja normalizado, primeiramente relaxa-se a hipótese do Teorema 3.1 que exige que  $g$  e  $h$  sejam contínuas e escolhe-se as funções a seguir para  $H$ ,  $g$  e  $h$ :

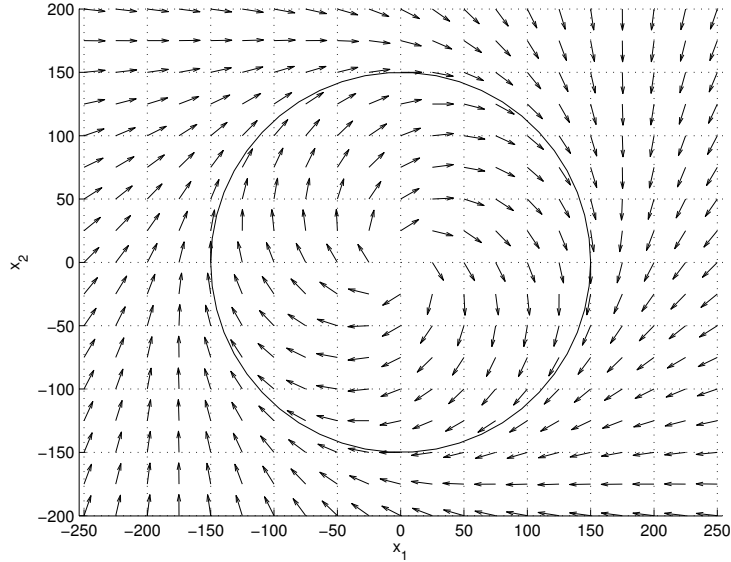
$$H(\phi) = \pm \sqrt{1 - G(\phi)^2}, \quad (3.11)$$

$$g(x_1, x_2) = \frac{1}{\|\nabla\phi\|}, \quad (3.12)$$

$$h(x_1, x_2) = \frac{1}{\|\nabla_H\phi\|}. \quad (3.13)$$

Além disso, adiciona-se a hipótese que  $|G(y)| \leq 1$ . Note que a escolha do sinal da função  $H$  definirá o sentido de circulação da curva. As funções  $g$  e  $h$  agora podem ser descontínuas em  $\nabla\phi = 0$ , mas isso não será um problema, uma vez que esses pontos são instáveis.

Assim, devido a escolha das Equações (3.11), (3.12) e (3.13), o sistema depende apenas da escolha da curva  $\phi$  e da função  $G(y)$ . Além disso, observa-se que enquanto  $G(y)$  cresce,  $H(y)$  decresce, e vice versa. Essa característica pode ser usada para controle de trajetória, uma vez que o VANT não é capaz de fazer curvas muito fechadas. No exemplo a seguir será mostrado este método em funcionamento, além dos efeitos da escolha da função  $G$  no caminho gerado para o robô.

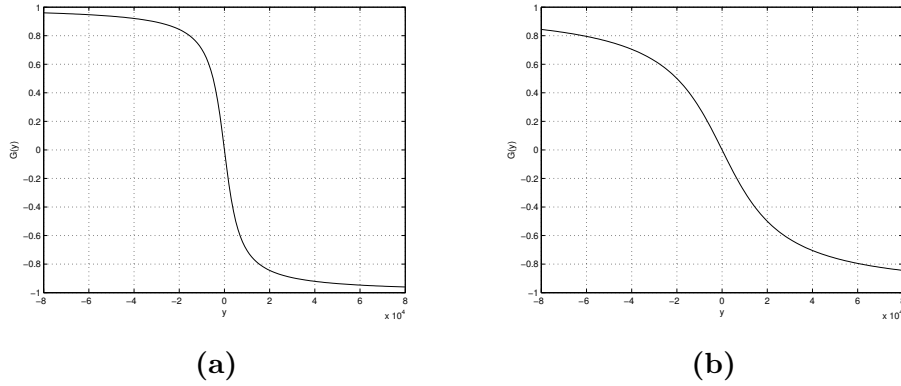


**Figura 3.2:** Curva de raio de 150 metros implícita em um campo vetorial.

Considere um robô percorrendo uma circunferência de 150 metros (Figura 3.2) descrita pela equação  $x_1^2 + x_2^2 = 150^2$ . Esta curva está implícita no cruzamento da função  $\phi(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 150^2$  com o plano  $(x_1, x_2)$  e tem gradiente  $\nabla\phi = [2x_1 \ 2x_2]^T$ . Nota-se que  $\nabla\phi = 0$  somente quando  $x_1 = x_2 = 0$  o que causará uma descontinuidade, mas que não será um problema uma vez que este ponto é instável.

A escolha adequada da função  $G$  permite que a transição entre as componentes perpendicular e tangente à curva seja feita de maneira suave. Para que isso ocorra, escolhemos  $G(y) = -\frac{2}{\pi} \arctan(\frac{y}{\theta})$ . Note que  $\theta$  é um escalar positivo escolhido de acordo com a função  $\phi$  e a característica desejada para a aproximação do robô.

Na Figura 3.3, é possível observar que o intervalo e os valores escolhidos para  $y$  são bem significativos. Isso se deve ao fato de ser necessário avaliar a função  $\phi$  nas proximidades da curva onde se deseja que ocorra a transição

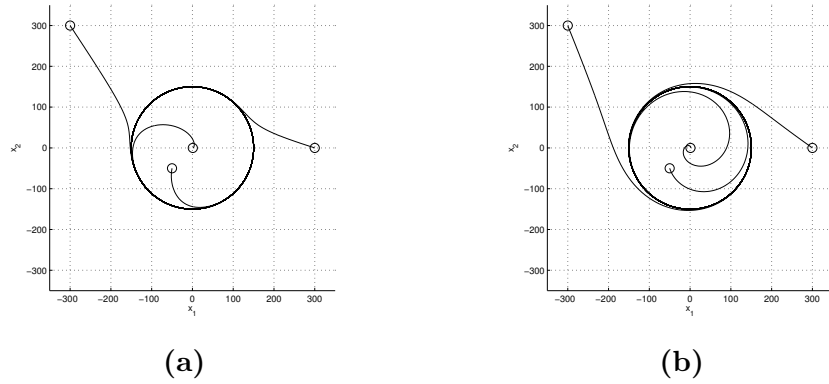


**Figura 3.3:** Função  $G(y) = -\frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{y}{\theta}\right)$  com (a)  $\theta = 5 \times 10^3$  e com (b)  $\theta = 20 \times 10^3$ .

entre a componente perpendicular e a componente tangencial. Para a função  $\phi$  escolhida, a função foi avaliada a cem metros de distância, tanto na parte interna quanto na parte externa, resultando no intervalo  $(-20, 40) \times 10^3$ . Observando a Figura 3.3(a), percebe-se que fora deste intervalo,  $G(y)$  acarreta um peso para a componente perpendicular de aproximadamente oitenta e cinco por cento, o que causa pouco movimento tangente à curva. Esse comportamento é notado na Figura 3.4(a), principalmente para as condições iniciais externas à curva. Já na Figura 3.3(b), percebe-se que fora do intervalo de  $(-20, 40) \times 10^3$ ,  $G(y)$  faz o peso da componente perpendicular diminuir para cerca de cinquenta por cento, o que causa mais movimento tangente à curva. Esse comportamento é notado na Figura 3.4(b), sendo mais acentuado para as condições iniciais internas à curva.

## 3.2 Simulações

Nesta seção serão apresentados resultados de simulações da metodologia para guiagem de VANTs apresentada neste capítulo. As simulações foram realizadas em um computador executando os softwares Horizon<sup>mp</sup> versão 3.4

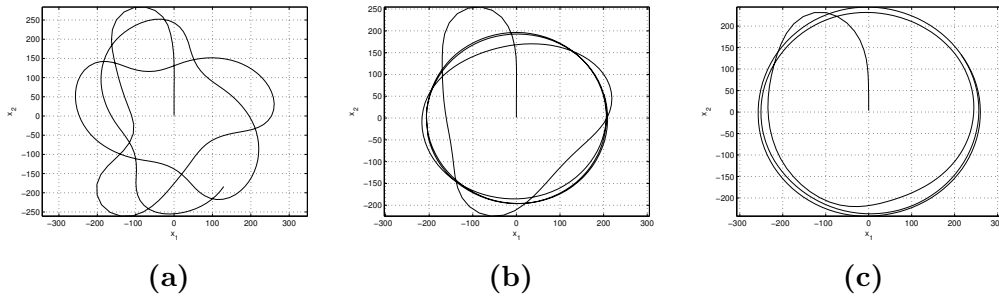


**Figura 3.4:** Simulação com quatro condições iniciais para a curva  $x_1^2 + x_2^2 = 150^2$  com diferentes valores de  $\theta$  para a função  $G(y)$  (a)  $\theta = 5 \times 10^3$  e (b)  $\theta = 20 \times 10^3$ .

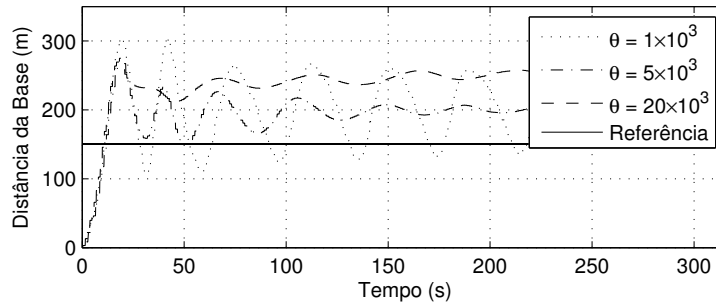
build 1374.2 e Matlab R2012a. Para que os dois softwares pudessem trocar informações foi necessária a instalação de uma *toolbox*, fornecida pela empresa Micropilot, fabricante do piloto automático utilizado neste projeto. A aeronave simulada possui 1,5 metros de envergadura, área alar de  $0,43 \text{ m}^2$ , motor de 600 watts equipado com uma hélice de 40 cm. No Apêndice A podem ser encontradas maiores informações a respeito da plataforma utilizada.

Na primeira missão simulada, o VANT deverá voar em uma circunferência de raio de 150 metros localizada a 150 metros de altura em relação ao solo. A curva está implícita na função  $\phi(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 150^2 = 0$  e a função  $G(y) = -\frac{2}{\pi} \arctan(\frac{y}{\theta})$  foi modificada com valores diferentes para a variável  $\theta$ .

Como pode ser observado nos gráficos da Figura 3.5, a escolha acertada da variável  $\theta$  na função  $G(y)$  é crítica para a convergência do VANT para a curva alvo. No caso da Figura 3.5(a), em que  $\theta = 1 \times 10^3$ , o VANT se aproxima quase que perpendicular à curva, pois o peso da componente perpendicular no cálculo do campo vetorial anula quase que totalmente o peso da componente tangencial. Faltando poucos metros para alcançar a curva, há uma troca e o peso da componente tangencial passa a ser mais significativo. Mas como o VANT estava voando perpendicular a curva, ele a atravessa e há uma



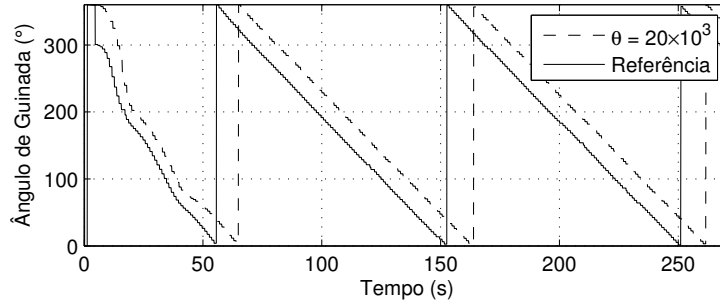
**Figura 3.5:** Simulação de um VANT percorrendo uma circunferência de 150 metros de raio implícita em um campo vetorial para diferentes valores de  $\theta$ . (a)  $\theta = 1 \times 10^3$ , (b)  $\theta = 5 \times 10^3$ , (c)  $\theta = 20 \times 10^3$ .



**Figura 3.6:** Distância do VANT em relação à base, tendo como referência uma circunferência de 150 metros de raio, para diferentes valores da variável  $\theta$ .

nova troca de pesos, com a componente perpendicular novamente ganhando importância. Na Figura 3.5(b), em que  $\theta = 5 \times 10^3$ , o comportamento é observado novamente, mas com menos intensidade. Ainda há oscilação, mas sua frequência diminui, fruto da ação suavizante da variável  $\theta$ . Por fim, na Figura 3.5(c), em que  $\theta = 20 \times 10^3$ , a transição entre as componentes do campo vetorial ocorre com mais suavidade, conforme pode ser verificado na Figura 3.3(b). Apesar de estar percorrendo uma circunferência, o VANT está a quase 100 metros de distância da curva alvo sem convergir para a mesma.

As observações feitas até este ponto podem ser verificadas na Figura 3.6, em que a distância do VANT em relação à base, em cada um dos casos citados, é mostrada em relação ao tempo. Nesta figura, fica claro o movimento



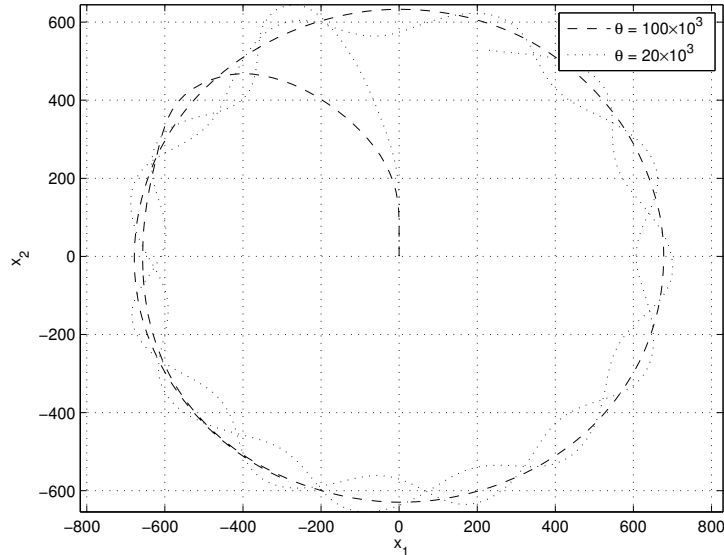
**Figura 3.7:** Comparação entre a referência e o ângulo de guinada do VANT percorrendo uma circunferência de 150 metros de raio com  $\theta = 20 \times 10^3$ .

oscilatório e o erro de estado estacionário, que persiste após a diminuição da oscilação.

Há duas hipóteses para a persistência do erro de estado estacionário. A primeira é que como a referência do ângulo de guinada é equivalente à uma entrada em rampa (Figura 3.7) e para anular o erro de estado estacionário deste tipo de entrada são necessários dois integradores. A outra hipótese é que este erro é inerente à dinâmica do VANT modelado no simulador do software e sua capacidade de fazer curvas fechadas.

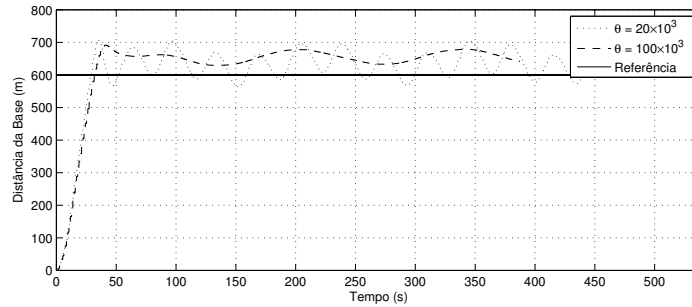
No segundo exemplo de missão simulada, o raio da circunferência foi aumentado para 600 metros, para análise de como a variável  $\theta$  na função  $G(y)$  deve ser alterada para ser adequada a uma nova função  $\phi(x_1, x_2)$ . Conforme pode ser observado na Figura 3.8, ao tentar se aproximar da circunferência de 600 metros de raio, ocorre a mesma situação enfrentada pelo VANT da Figura 3.5(a). A escolha inadequada da variável  $\theta$  leva o VANT em direção perpendicular à curva e causa oscilação, impedindo a convergência. Ao aumentar o valor para  $\theta = 100 \times 10^3$ , o problema é minimizado consideravelmente.

Novamente ocorre o erro de estado estacionário mencionado anteriormente. Mas é preciso observar que o mesmo ocorre em escala muito menor,

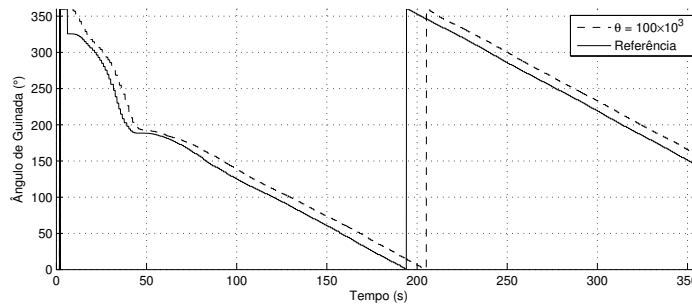


**Figura 3.8:** Simulação de dois VANTs percorrendo uma circunferência de 600 metros de raio implícita em um campo vetorial para diferentes valores de  $\theta$ .

quando comparada ao raio da curva. Ao percorrer a circunferência de 150 metros de raio, observa-se na Figura 3.6 que o erro é de cerca de 100 metros ou seja, 66% do raio da curva alvo. Para o caso em análise, na circunferência de 600 metros de raio, o erro foi cerca de 60 metros, ou 10% maior que o raio da curva alvo, conforme pode ser observado na Figura 3.9. Analisando as hipóteses levantadas para a persistência do erro em estado estacionário, é mais provável que seja uma situação causada pela dinâmica da aeronave do que pela falta de um integrador na malha de controle. A aeronave simulada conta com integradores na malha de controle do ângulo de rolamento a partir do ângulo de guinada e também na malha de controle do aileron a partir do ângulo de rolamento. Outra hipótese poderia ser levantada a partir dessas informações. Talvez, os ganhos de controle destas malhas estão ajustados incorretamente. Contra esta hipótese há o fato de que em outras situações de simulação de voo, representando diversas condições de teste, o VANT se



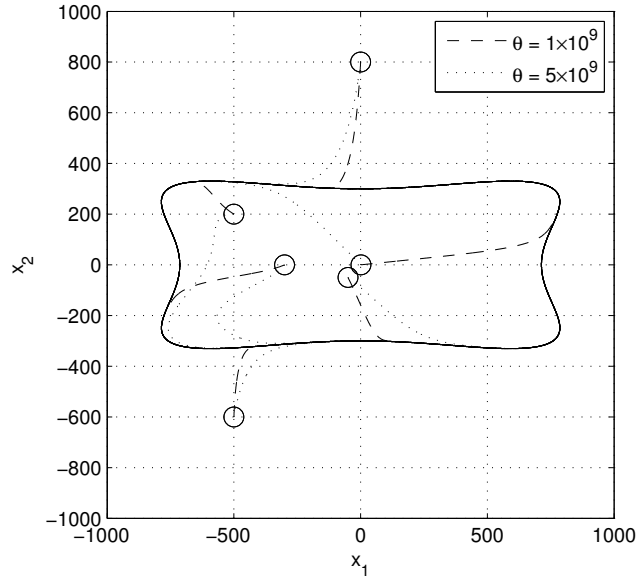
**Figura 3.9:** Distância do VANT em relação à base, tendo como referência uma circunferência de 600 metros de raio, para diferentes valores da variável  $\theta$ .



**Figura 3.10:** Comparação entre a referência e o ângulo de guinada do VANT percorrendo uma circunferência de 600 metros de raio com  $\theta = 100 \times 10^3$ .

mostrou estável e controlável. Outro fato que corrobora esta análise é que estes ganhos foram ajustados pelo fabricante do software, o que dá credibilidade ao sistema de controle. Como era de se esperar, a diferença entre o ângulo de guinada e sua referência diminuiu consideravelmente, mas conforme observado na Figura 3.10, não se tornou nulo.

Nem sempre o aumento do valor da variável  $\theta$  na função  $G(y)$  irá suavizar o caminho aumentando o raio das curvas na trajetória planejada. Para alguns tipos de campo, o efeito será justamente o contrário. Por exemplo, na curva implícita na função  $\phi(x_1, x_2) = \frac{1}{32}x_1^4 - \frac{1}{5}x_1^2x_2^2 + x_2^4 - 300^4 = 0$  (Figura 3.11), no quadrante inferior esquerdo, o robô com condição inicial  $x_1 = -300, x_2 = 0$ , tem que fazer uma curva mais fechada para alcançar a curva quando a função

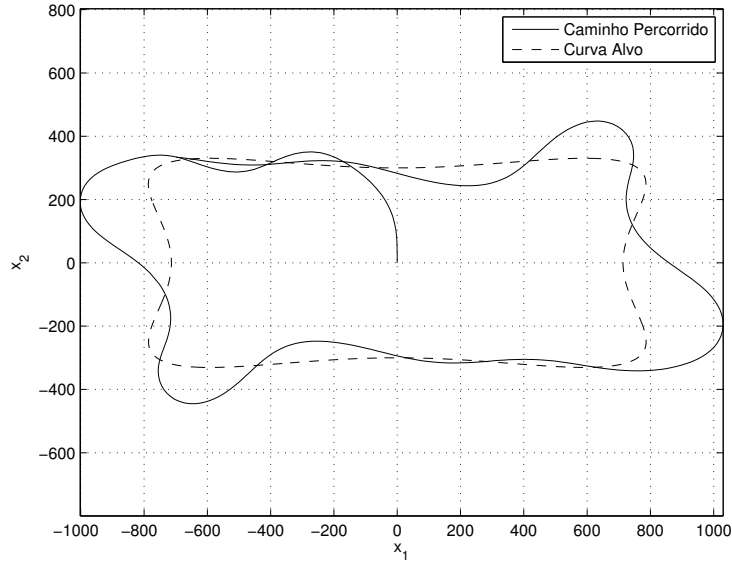


**Figura 3.11:** Curva implícita na função  $\phi(x_1, x_2) = \frac{1}{32}x_1^4 - \frac{1}{5}x_1^2x_2^2 + x_2^4 - 300^4 = 0$  sendo percorrida por robôs holonômicos com valores diferentes de  $\theta$  na função  $G(y)$ .

$G(y)$  tem  $\theta = 5 \times 10^9$  do que quando o valor dela é cinco vezes menor.

Essa curva se mostra particularmente difícil para ser percorrida pelo VANT no simulador. As sequências de três curvas à leste e à oeste do gráfico, precedidas por uma longa curva de grande raio se mostram difíceis para serem acompanhadas. O fato de ser uma função de potencial de ordem quatro, junto com a quantidade de curvas, faz com que o valor de  $\phi$  varie muito e faz a referência do ângulo de guinada mudar muito rapidamente, situação que o VANT simulado não é capaz de acompanhar (Figura 3.12). Para resolver este problema, seria necessário que a relação da função  $G(y)$  com o campo vetorial levasse em consideração as variações de  $\phi$  e o raio mínimo de curva que o VANT é capaz de realizar.

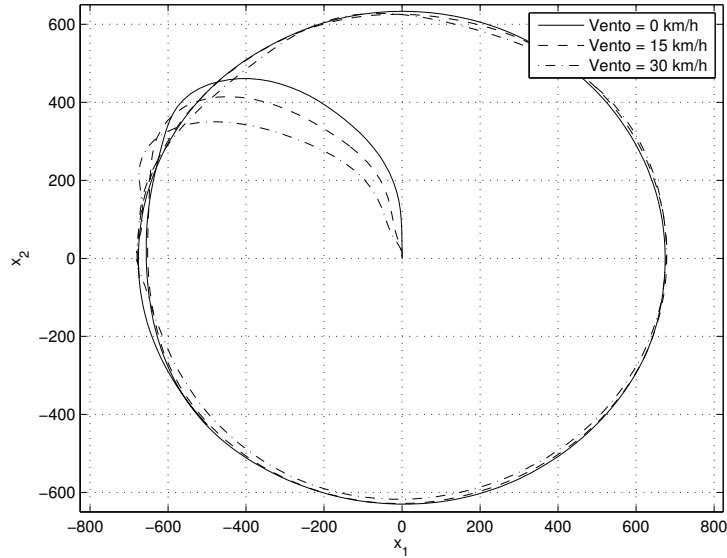
Como último exemplo, mostra-se a robustez da metodologia contra distúrbios externos. Nessa missão simulada, o VANT deveria circular por uma circun-



**Figura 3.12:** Comparação entre a curva implícita na função  $\phi(x_1, x_2) = \frac{1}{32}x_1^4 - \frac{1}{5}x_1^2x_2^2 + x_2^4 - 300^4 = 0$  e o caminho percorrido pelo VANT simulado pelo software Horizon<sup>mp</sup>.

ferência de 600 metros de raio em diferentes condições de vento. Foram realizadas três simulações, na primeira não havia vento e na segunda e terceira, o vento vinha da direção leste para oeste com velocidade de 15 km/h e 30km/h.

Observa-se na Figura 3.13 que mesmo o vento mais forte não foi capaz de alterar de forma significativa o caminho percorrido, sendo possível perceber apenas pequenas alterações no trajeto. A simulação foi realizada com o VANT configurado para voo a 56 km/h. Um quarto experimento foi realizado, com ventos de 45 km/h na direção leste. Neste caso, o VANT apresentou dificuldades para avançar quando estava voando na direção contrária ao vento. Os resultados deste teste foram omitidos da Figura 3.13.

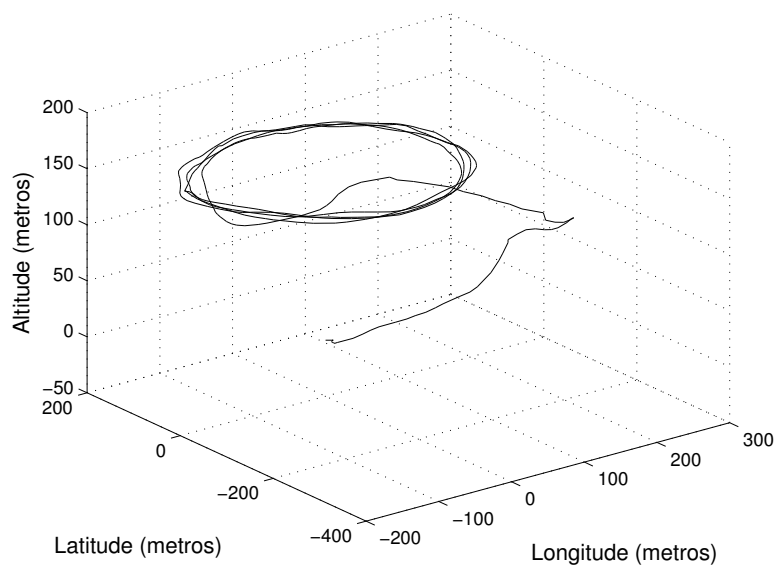


**Figura 3.13:** Caminho percorrido pelo VANT simulado no software Horizon<sup>mp</sup> para três condições de vento.

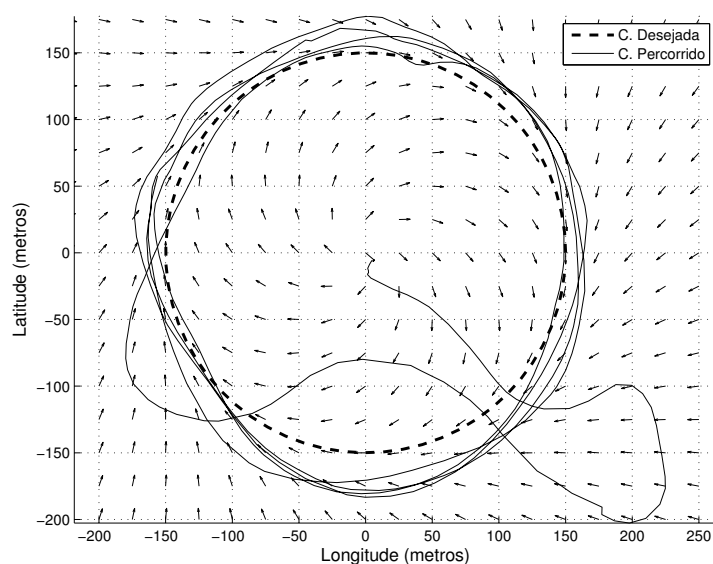
### 3.3 Experimentos

A metodologia apresentada neste capítulo foi testada em voo no dia 8 de novembro de 2012, no campo de futebol da Faculdade de Educação da UFMG. Foi a primeira vez que o método criado por Gonçalves et al. (2010a) foi testado em uma aeronave de asa fixa. Foram realizadas duas missões com características semelhantes. Os voos consistiram de decolagem através de lançamento manual, mudança para o modo de pilotagem autônomo, subida para 150 metros de altura em relação ao solo e circulação de uma circunferência de 150 metros de raio. Após algumas voltas, o modo de pilotagem manual era acionado e o piloto pousava o VANT (Figura 3.14). Maiores detalhes sobre o VANT podem ser encontrados no Apêndice A.

É possível observar na Figura 3.15 que o VANT se aproxima da circunferência de 150 metros de raio, mas só consegue alcançá-la em alguns trechos.



**Figura 3.14:** Projeção isométrica do caminho percorrido pelo VANT durante um teste real de voo com o objetivo de convergir para uma circunferência implícita na função  $\phi(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 150^2 = 0$  localizada a 150 metros de altura.



**Figura 3.15:** Projeção vertical do caminho percorrido pelo VANT durante um teste real de voo com o objetivo de convergir para uma circunferência implícita na função  $\phi(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - 150^2 = 0$  localizada a 150 metros de altura.

No entanto, ao comparar o resultado deste experimento com aquele mostrado na Figura 3.5(c), conclui-se que este resultado foi muito melhor, com o VANT percorrendo a circunferência sempre entre 150 e 175 metros da origem. O que é curioso, uma vez que não há ganho integral no controlador de ângulo de rolamento a partir de ângulo de guinada. Mas essa malha de controle tem em sua sequência, ou cascata, outro controlador. Este é responsável pelo comando do aileron a partir do ângulo de rolamento e há ação integral sintonizada neste caso.

Neste capítulo foi mostrada a implementação prática, com experimentos em ambiente simulado e real, da metodologia proposta por Gonçalves et al. (2010a). Esta metodologia é ideal para utilização em missões de cobertura persistente de estruturas longilíneas, devido à convergência do campo vetorial para uma curva fechada. Esta curva pode ser modelada de forma a percorrer tais estruturas, como estradas, gasodutos, linhas de transmissão e fronteiras. No entanto, para cobertura de áreas como plantações, terrenos e em operações de buscas, será proposta uma metodologia diferente e com aplicação mais direta, que será apresentada no Capítulo 4.

# Capítulo 4

## Cobertura de Áreas

*As vezes o caminho no qual você se encontra não é tão importante quanto a direção para a qual você se dirige.*

Kevin Smith

Neste capítulo será apresentada uma solução para o problema de cobertura de áreas utilizando múltiplos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). A solução tem como objetivo o planejamento da missão, minimizando o tempo de cobertura, através do emprego inteligente dos VANTs e do melhor caminho.

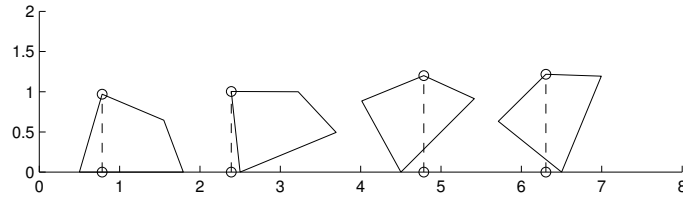
### 4.1 Metodologia

O planejamento para cobertura de áreas ocorre em dois estágios. No primeiro, a direção ótima para as linhas de varredura é calculada por meio de uma função de diâmetro de polígonos. Essa direção é aquela que resultará no menor número de linha sendo distribuído sobre a área de interesse e, por consequência, no menor número de curvas fora da mesma área (HUANG, 2001). Assim, essa direção produz o melhor aproveitamento do tempo da missão, mas não necessariamente resultará em um caminho mais curto. Antes do próximo passo, a área é dividida em linhas de cobertura de acordo com

as características dos VANTs, do voo e das câmeras utilizadas para captura de imagens do solo. Assume-se que todos os equipamentos são homogêneos entre os VANTs, ou seja, que todos utilizam o mesmo tipo de câmera, bateria, motor e demais equipamentos. No segundo passo, cada linha de cobertura é modelada como um par de vértices em um grafo e a solução para o problema de roteamento de veículos com janela de tempo fornece o caminho ótimo que deverá ser seguido pelos VANTs para completar a missão no menor tempo possível. A maior contribuição dessa abordagem é que a escolha do número de VANTs utilizados não é fixa, pois conforme será mostrado adiante, em algumas situações, a utilização de um número menor de veículos pode resultar em um menor tempo para cobertura da área.

#### 4.1.1 Decomposição da Área

A área de cobertura é definida como um polígono convexo representado pelo conjunto de vértices  $P$ . O VANT irá sobrevoar a área de cobertura executando movimentos semelhantes àqueles mostrados na Figura 2.4. Ele estará voando reto e nivelado enquanto estiver percorrendo as linhas de cobertura e, ao final de cada uma delas, realizará curvas fora da área para retornar para a próxima linha. A diferença em relação à Figura 2.4 é a direção principal em que estas linhas estarão em relação à orientação do polígono. A direção ótima de cobertura é perpendicular à menor altura do polígono (HUANG, 2001). Nela, o VANT percorre o menor número de linhas e por consequência, realiza o menor número de curvas fora da área de interesse. Essa abordagem é interessante pois cada curva envolve desacelerações para mudança de direção, além de ser um tempo inútil para captura de imagens. No entanto, é importante enfatizar que o menor número de linhas **não** implica em caminho mais curto.



**Figura 4.1:** Polígono correspondente área de cobertura sendo rotacionado em busca de sua menor altura.

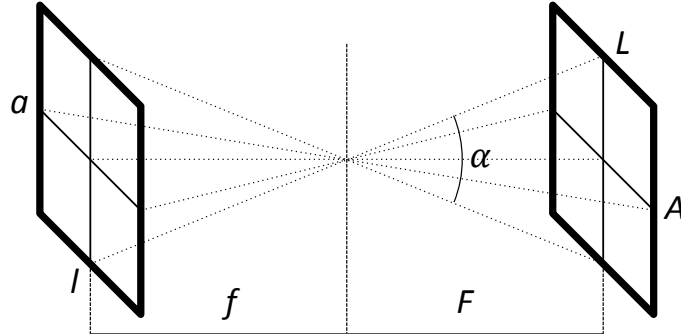
Para encontrar a menor altura do polígono, é necessário girá-lo sobre uma superfície, medindo a maior altura para cada ângulo, como mostra a Figura 4.1. O ângulo ótimo para cobertura  $\theta_{opt}$  é aquele em que é encontrada a menor destas alturas medidas. Uma vez que este ângulo  $\theta_{opt}$  foi encontrado, é possível distribuir as linhas de cobertura sobre a área, mas antes é necessário calcular a distância entre elas, que está diretamente ligada às dimensões da área no solo que será projetada no sensor de imagem da câmera que equipa o VANT. Para calcular estas dimensões  $A$  e  $L$ , são necessárias apenas noções básicas de geometria (Figura 4.2). Para que o cálculo seja efetuado, é preciso conhecer as dimensões do sensor da câmera, a distância focal, além da distância do plano fotografado, que é a altura de voo. De acordo com a Figura 4.2, o cálculo deve ser feito como uma simples semelhança entre triângulos.

$$L = F \frac{l}{f}, \quad (4.1)$$

$$A = F \frac{a}{f}. \quad (4.2)$$

Observando a Figura 4.2, também é possível calcular os ângulos de abertura horizontal e vertical da lente:

$$\alpha_h = 2 \tan^{-1} \left( \frac{l}{2f} \right), \quad \alpha_v = 2 \tan^{-1} \left( \frac{a}{2f} \right) \quad (4.3)$$



**Figura 4.2:** Esquema representando a relação entre as dimensões do sensor de imagem, no lado esquerdo, e as dimensões da área fotografada, no lado direito. (as dimensões estão fora de proporção).

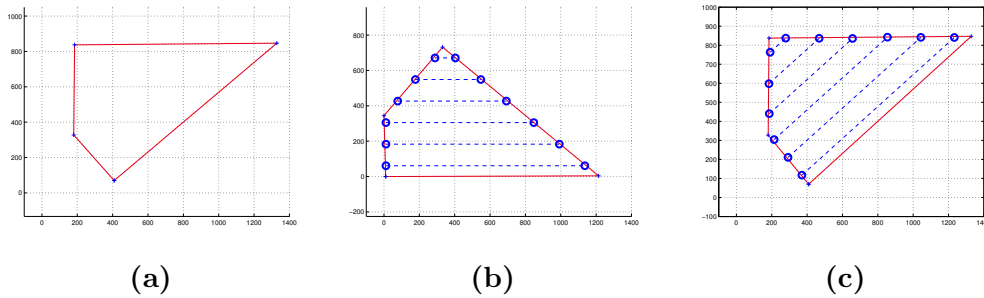
onde  $\alpha$  é o ângulo de abertura em radianos,  $f$  é a distância focal,  $l$  é a largura e  $a$  é a altura do sensor de imagem. Para que estes cálculos sejam válidos, é necessário que o plano do sensor seja paralelo ao plano da área fotografada. Por isso, é importante que o VANT voe reto e nivelado enquanto está cobrindo a área.

É possível calcular quantas serão as linhas de cobertura e a distância entre elas, com as equações a seguir:

$$N_l = \left\lceil \frac{h_{min}}{L(1-s)} \right\rceil, \quad d_l = \frac{h_{min}}{N_l}. \quad (4.4)$$

onde  $h_{min}$  é a altura do polígono na direção do ângulo  $\theta_{opt}$ ,  $L$  é a largura da área que é projetada no sensor da câmera e  $s$  é o percentual escolhido para sobreposição das imagens. Esse percentual é necessário na montagem de um mapa por meio da concatenação das imagens coletadas e geralmente é escolhido entre 0,3 e 0,8. Por fim,  $d_l$  é a distância entre as linhas.

O cálculo da posição dos vértices que definem cada linha de cobertura será feito com o polígono rotacionado de um ângulo  $\theta$ . Isso irá facilitar o



**Figura 4.3:** Representação gráfica do procedimento utilizado para encontrar a direção ótima de cobertura. (a) Área de interesse. (b) Área rotacionada e linhas de cobertura posicionadas. (c) Área e linhas novamente rotacionadas para a posição original.

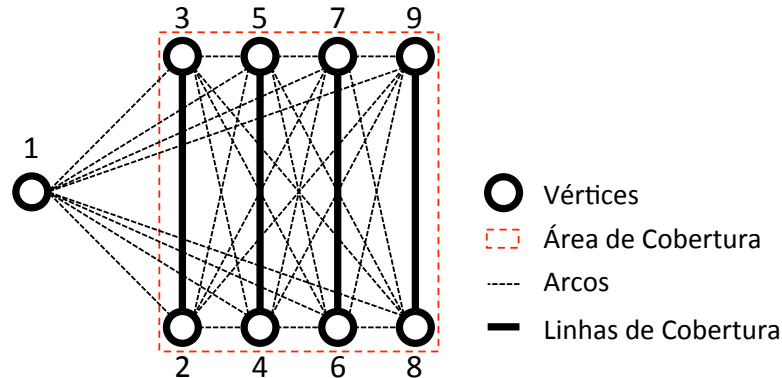
cálculo, pois as linhas de cobertura ficarão paralelas ao eixo  $x$ .

Cada linha de cobertura é definida por dois vértices. Considerando que o polígono foi rotacionado e está encostado no eixo  $x$ , a coordenada  $y$  dos dois vértices de cada linha é definida pela equação:

$$y_i = i \cdot d_l - \frac{d_l}{2}, \quad i = 1, \dots, N_l. \quad (4.5)$$

Já a coordenada  $x$  de cada vértice é definida nos dois pontos em que a reta horizontal com coordenada  $y_i$  cruzar as fronteiras do polígono que representa a área de cobertura (Figura 4.3(b)). Uma vez que as coordenadas de todos os vértices foram calculadas para o polígono rotacionado, é necessário fazer uma transformação inversa para rotacioná-las no referencial original (Figura 4.3(c)).

O resultado de todas essas operações é um conjunto de vértices compostos por coordenadas cartesianas que representam os limites de cada linha de cobertura. É preciso, por fim, incluir nessa lista as coordenadas da base, que geralmente são  $(0, 0)$ . Com esta lista de vértices, na próxima seção serão mostradas as etapas para construção de um algoritmo de otimização que



**Figura 4.4:** Representação visual do grafo de adjacências posicionado geometricamente sobre a área de cobertura.

tem como objetivo buscar o melhor caminho utilizando o menor número de VANTs para cobertura de áreas.

#### 4.1.2 Otimização do Caminho

De posse do conjunto de vértices que representa a posição da base e dos limites de cada linha de cobertura, é preciso modelá-los como um problema de busca em grafos. O sistema será modelado como um problema de múltiplos caixeiros viajantes conforme apresentado por Christofides, Mingozzi e Toth (1981). É importante notar que foram feitas modificações no modelo citado, com o objetivo de adequar a solução às necessidades deste projeto. Neste caso, o número de veículos não é fixo e cabe ao algoritmo a decisão de quantos veículos utilizar. No texto citado, o objetivo é minimizar o custo total, ou seja, a soma da distância percorrida por todos os caixeiros para visitar todas as cidades, visando por exemplo, a redução do gasto com combustíveis. Já neste trabalho, o objetivo é minimizar o tempo individual gasto por cada uma dos caixeiros, sendo que o maior destes tempos é equivalente ao tempo gasto para concluir a missão. Por isso, a este problema é dado o nome de

roteamento de veículos com janela de tempo.

Assim, um grafo de adjacências  $G = (V, A)$  em que  $V$  é o conjunto de  $N$  waypoints incluindo a base e os limites das linhas de cobertura e  $A$  é o conjunto de arcos que ligam os vértices. Seja  $C = c_{ij}$  uma matriz de custo associada a  $A$ . A matriz  $C$  é simétrica  $c_{ij} = c_{ji}, \forall (i, j) \in A$ , respeita a desigualdade do triângulo  $c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}$  e é invariante no tempo.

O sistema modelado como o problema do caixeiro viajante modificado é mostrado a seguir.

$$\min_k (v_k) \quad (4.6)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} X_{ij}^k + d_k \leq v_k, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4.7)$$

$$t_s k \sum_{j=1}^N X_{1j}^k = d_k, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4.8)$$

$$v_k - d_k \leq L_k, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4.9)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N X_{ij}^k = 1, \quad j = 2, \dots, N, \quad (4.10)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ip}^k - \sum_{j=1}^N X_{pj}^k = 0, \quad p = 1, \dots, N, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4.11)$$

$$\sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N X_{1j}^k = m, \quad (4.12)$$

$$m \leq M, \quad (4.13)$$

$$u_i - u_j + N \sum_{k=1}^M X_{ij}^k \leq N - 1, \quad i, j = 2, \dots, N, \quad (4.14)$$

$$\sum_{k=1}^M X_{i,i+1}^k + \sum_{k=1}^M X_{i+1,i}^k = 1, \quad i = 2, 4, \dots, N, \quad (4.15)$$

$$\sum_{k=1}^M X_{i,i+1}^k = \sum_{k=1}^M \sum_{j=3,5,\dots}^N X_{i,j}^k, \quad i = 2, 4, \dots, N, \quad (4.16)$$

$$\sum_{k=1}^M X_{i,i-1}^k = \sum_{k=1}^M \sum_{j=2,4,\dots}^N X_{i,j}^k, \quad i = 3, 5, \dots, N, \quad (4.17)$$

$$v_k \in \mathbb{R}, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4.18)$$

$$m \in \mathbb{N} \quad (4.19)$$

$$u_i \in \mathbb{R}, \quad i = 2, \dots, N, \quad (4.20)$$

$$X_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad i, j = 2, \dots, N, k = 1, \dots, M. \quad (4.21)$$

onde  $v$  é o conjunto de escalares  $v_k$  que resultam do cálculo do custo de utilização do  $k$ -ésimo VANT,  $t_s$  é o tempo individual de preparação de um VANT antes e após o voo,  $m$  é igual ao número de VANTs designados para a missão,  $u_i$  são variáveis necessárias para obrigar que os VANTs comecem e terminem no mesmo vértice,  $X_{ij}^k$  é uma variável binária que indica que o VANT  $k$  foi do vértice  $i$  para o vértice  $j$  quando  $X_{ij}^k = 1$ ,  $M$  é o número de VANTs disponíveis e  $N$  é o número de vértices.

Cada uma das restrições do problema tem um propósito. A Equação (4.7) contabiliza o custo total para cada VANT utilizado na missão. Caso o VANT não seja utilizado o custo será zero, pois o mesmo não terá saído da base. Nesta equação há um termo  $d_k$ , detalhado na Equação (4.8) que contabiliza um custo adicional de utilização para cada VANT. Este custo, chamado *tempo de setup*, corresponde ao tempo que é gasto antes e depois do lançamento do VANT com sua preparação para o voo. Nesse valor estão incluídos a espera pelo sinal GPS, a preparação final para decolagem, o tempo para buscar o VANT após o pouso e o *download* de dados de telemetria após

o voo. Em uma missão em que há apenas uma pessoa operando os VANTs, todo VANT irá possuir esse tempo e o mesmo será cumulativo. Isso significa que, por exemplo, ao utilizar dois VANTs, enquanto o VANT 1 é preparado, nada acontece com o VANT 2. Após a decolagem do VANT 1, o VANT 2 poderá ser preparado para a missão. No fim da missão ocorrerá o mesmo, com o VANT 2 pousando primeiro, sendo buscado e tendo seus dados transferidos. Em seguida o VANT 1 irá pousar e passará pelas mesmas tarefas.

Para um exemplo mais detalhado, suponha que sejam disponibilizados  $M = 3$  VANTs, com tempo de preparação individual  $t_s = 10$  minutos, para cobrir uma área quadrada. Nesta área foram calculadas 8 linhas de cobertura e cada linha leva 2,5 minutos para ser percorrida. Desconsidere o tempo que cada VANT leva para se deslocar da base até o primeiro *waypoint*, de uma linha de cobertura para a próxima linha e do último *waypoint* até o retorno à base. Como primeira hipótese, todos os VANTs são utilizados, e calculamos o tempo de *setup* de cada um deles a partir da Equação 4.22 da seguinte forma:

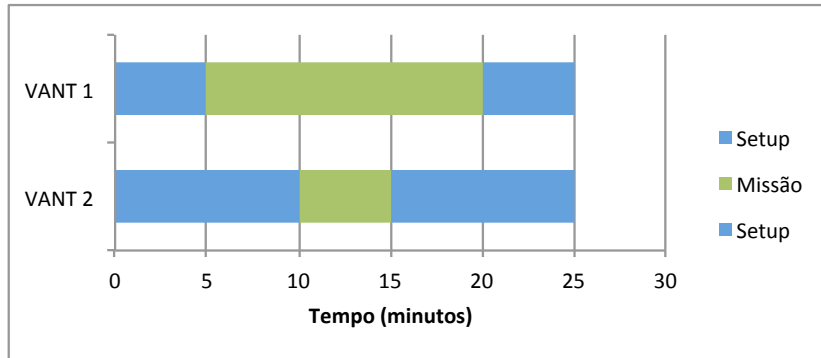
$$t_s k \sum_{j=1}^N X_{1j}^k = d_k, \quad k = 1, \dots, M, \quad (4.22)$$

$$10 \cdot 1 \cdot 1 = d_1$$

$$10 \cdot 2 \cdot 1 = d_2$$

$$10 \cdot 3 \cdot 1 = d_3$$

Com base nessa hipótese inicial, o tempo de *setup* do VANT 3,  $d_3 = 30$  minutos, que é equivalente ao tempo total de missão caso apenas um dos VANTs fosse utilizado. Ou seja, certamente não vale a pena a utilização do VANT 3. Assim, o termo  $\sum_{j=1}^N X_{1j}^k$ , utilizado no cálculo de  $d_k$  para  $k = 3$  se anula e  $d_3 = 0$ . Dessa forma, o tempo de *setup* referente a este VANT



**Figura 4.5:** Gráfico representando as etapas de uma missão utilizando dois VANTs.

não irá mais impactar o custo total de operação dos VANTs. Na Figura 4.5 é mostrado o resultado final deste exemplo. Foram atribuídas seis linhas de cobertura para o VANT 1 e apenas duas linhas para o VANT 2, totalizando 25 minutos de missão. Caso apenas um VANT fosse utilizado, a missão duraria 30 minutos, e no caso do uso dos três VANTs, a missão duraria, na melhor possibilidade, 32,5 minutos.

Com a equação (4.9), cada VANT fica impedido de ser utilizado por um tempo maior que aquele permitido pela autonomia de sua bateria. O tempo de *setup*  $d_k$  é subtraído do tempo total  $v_k$  e não deve ser maior que a autonomia da bateria. A utilização dessa restrição deve ser feita de forma cuidadosa, uma vez que pode tornar o problema infactível. Seria o caso, por exemplo, de uma missão com poucos VANTs disponíveis e uma grande área de interesse.

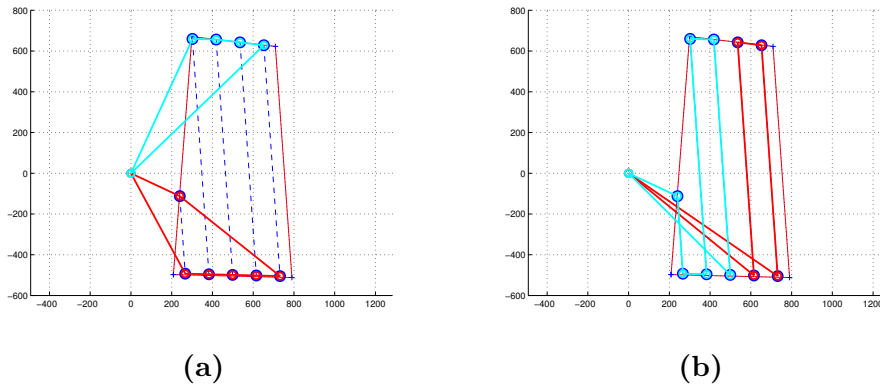
A Equação (4.10) garante que cada vértice, exceto a base, será visitado por apenas um VANT. Já a Equação (4.11) garante que o VANT que chega em um vértice é o mesmo VANT que sairá daquele vértice. Em outras palavras, estas duas equações significam que cada vértice só poderá ser visitado uma vez e por um único VANT. Observando a Figura 4.4, um possível

exemplo da aplicação destas regras, que dividiria as linhas igualmente entre os VANTs seriam as sequências de waypoints  $\{1, 2, 3, 5, 4, 1\}$  e  $\{1, 9, 8, 6, 7, 1\}$ .

As equações (4.12) e (4.13) servem para relaxar o número  $m$  de VANTs escolhidos para a missão. Essa escolha fica então, totalmente em função da minimização das variáveis  $v_k$ , que correspondem ao custo acumulado da utilização de cada VANT. Esta equação é uma das modificações em relação à modelagem do problema proposta em (CHRISTOFIDES; MINGOZZI; TOTH, 1981).

A Equação (4.14) é uma restrição para eliminar a possibilidade de ocorrência de subciclos e forçar que cada caminho se inicie e termine na base. Sem esta restrição, poderiam ser planejados caminhos representados, por exemplo, pelas sequências de waypoints  $\{1, 2, 3, 5, 4, 1\}$  e  $\{9, 8, 6, 7, 9\}$ , em que a última é claramente um subciclo.

Por fim, a Equação (4.15) obriga que cada VANT, ao visitar o primeiro vértice de uma linha de cobertura, tenha que visitar o outro vértice daquela linha. Isso é possível por causa da forma com que o conjunto de vértices  $V$  foi construído (Figura 4.4). A base é a primeira posição do conjunto  $V$  e, em seguida, cada par de vértices que representa cada linha de cobertura está nas posições par e ímpar subsequentes. Assim, a Equação (4.15) obriga cada VANT que visita um vértice par a visitar também o próximo vértice ímpar ou que cada VANT que visita um vértice ímpar a visitar também o vértice par anterior. Na Figura 4.4, o resultado dessa restrição é representado pelas linhas verticais cheias que ligam os *waypoints* inferiores aos superiores. Essa restrição é a mais importante no sentido de tornar a solução deste problema em uma solução para a otimização de caminhos para cobertura de áreas. Sem ela o problema se reduz ao problema de roteamento de veículos, conforme a Figura 4.6.



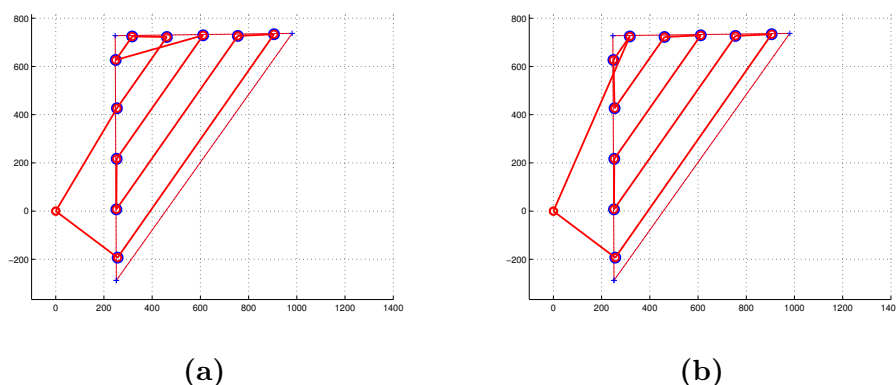
**Figura 4.6:** Exemplo mostrando como a ativação da Equação (4.15) impacta no resultado da solução do problema. Nesta figura o caminho do VANT 1 é representado pela cor vermelha e o caminho do VANT 2 é representado pela cor ciano. (a) A equação não é utilizada e o problema se reduz a um problema de roteamento de veículos. (b) A equação é ativada e temos uma solução otimizada para a cobertura de áreas.

## 4.2 Simulações

Nesta seção serão mostrados os resultados de alguns experimentos simulados e informações com relação à complexidade computacional e tempo de execução dos algoritmos. A realização de simulações evidenciou alguns problemas que precisaram ser corrigidos antes da realização dos experimentos com VANTs.

As simulações para o planejamento dos caminhos foram realizadas com o software Matlab R2013a sendo executado em um computador Apple MacBook Air, com processador Intel Core i5 1,7GHz de dois núcleos e quatro *threads*, 4GB de memória RAM e sistema operacional Mac OS X 10.9 64 bits. Para a implementação do problema de programação linear mista foi utilizado a toolbox Yalmip (LÖFBERG, 2004) como *frontend* e o *solver* comercial Gorubi (OPTIMIZATION, 2014) no *backend*.

No primeiro exemplo, o objetivo era mostrar que apesar do algoritmo apresentar um resultado ótimo do ponto de vista do custo para execução da

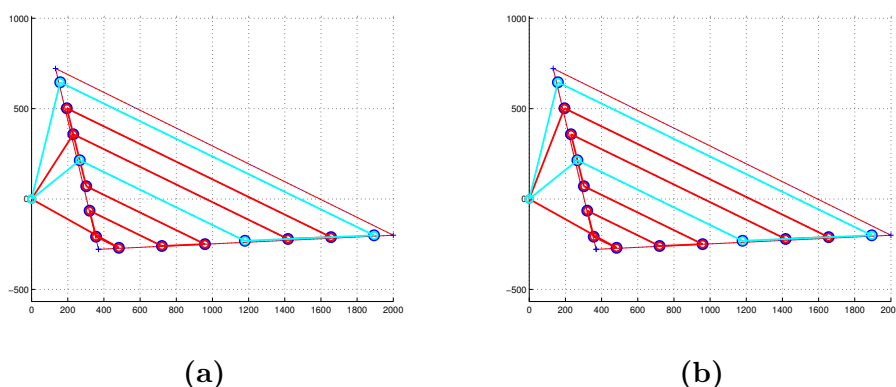


**Figura 4.7:** Resultados de simulações: (a) Sem a inclusão das restrições. (b) Com a inclusão das restrições.

missão, o caminho planejado não ficava adequado para a dinâmica do VANT e para a missão de cobertura de áreas. Verificando a Figura 4.7(a), no vértice mais próximo ao ponto  $(600, 700)$ , há uma curva fechada na direção leste que leva ao vértice próximo ao ponto  $(200, 600)$ . Esse desvio faz com que o caminho de cobertura se cruze e se repita, além de criar uma dificuldade maior para o VANT terminar a curva e retornar para o caminho planejado.

Para sanar este problema, foram incluídas novas restrições que impedem que, caso o VANT esteja em um vértice par, vá para um vértice ímpar que não seja o próximo vértice (Equação (4.16)). Ou, caso o VANT esteja em um vértice ímpar, vá para um vértice par que não seja o vértice anterior (Equação (4.17)). O resultado, como se pode observar na Figura 4.7(b) é um caminho com curvas mais suaves e sem cruzamento das linhas de cobertura.

Essa simulação gerou um conjunto de 11 vértices. No primeiro caso, quando não havia a restrição, a simulação demorou 1,31 segundos para ser executada e gerou um caminho que seria percorrido em 5,16 minutos pelo VANT. No segundo caso, quando a restrição havia sido incluída, a simulação demorou 1,01 segundos para ser executada e gerou um caminho que seria percorrido em 5,29 minutos pelo VANT. O tempo de simulação diminuiu



**Figura 4.8:** Resultado da otimização com duas funções objetivos diferentes. (a) Minimização do maior dos custos de operação dos VANTs. (b) Heurística entre a minimização do maior custo e minimização da média dos custos ponderados por um fator  $\rho$

por que ao adicionar a restrição, eliminou-se o uso de alguns arcos do grafo, efetivamente deixando a busca menos complexa. Em compensação, o novo caminho gerado é menos eficiente em termos de custo total, se comparado com o caminho obtido através da solução do problema sem a restrição.

No segundo exemplo, foi verificado que o algoritmo cumpre a tarefa modelada através da função objetivo, que é otimizar o maior dos custos de operação dos VANTs. No entanto, ao encontrar este mínimo, o algoritmo encerra sua operação, em alguns casos sem otimizar o custo de operação dos outros VANTs. Com isso, o algoritmo cumpre seu objetivo geral, mas ao analisar o custo individual de cada VANT, ainda há oportunidade para melhorias.

Observando a Figura 4.8(a) e os dados referentes à simulação 1 na Tabela 4.1 é possível verificar esse comportamento. O caminho do VANT 2, mostrado na cor ciano foi otimizado, mas fica claro que o VANT 1 está dando mais voltas que o necessário para cumprir sua missão.

O que se deseja nesse caso é que após esgotar todas as possibilidades de

|                   | Sim. 1 | Sim. 2 |
|-------------------|--------|--------|
| VANTs Disp.       | 2      | 2      |
| $t_{setup}$ (min) |        | 2      |
| N                 |        | 15     |
| $t_{sim}$ (s)     | 13,75  | 13,70  |
| VANTs Util.       | 2      | 2      |
| $t_{vo}$ (min)    | 8,76   | 8,72   |
|                   | 9,00   | 9,00   |

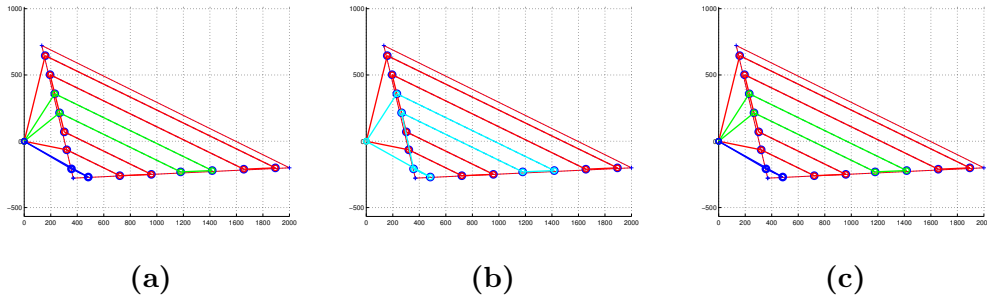
**Tabela 4.1:** Dados de simulação 1: minimização do maior custo, e simulação 2: heurística entre a minimização do maior custo e minimização da média dos custos ponderados por um fator  $\rho$

otimização do caminho de maior custo, que o algoritmo continue otimizando os outros caminhos também. Para resolver esse problema foi proposto uma heurística entre a minimização do maior custo e minimização da média dos custos, ponderados por um fator  $\rho$ , transformando a Equação (4.6) em:

$$\min_v \rho \text{Max}(v_k) + (1 - \rho) \text{Mean}(v_k) \quad (4.23)$$

Ao implementar essa mudança notou-se uma melhora no tempo de realização da missão, que pode ser verificado na Figura 4.8(b) e através da análise dos dados referentes à simulação 2 apresentados na Tabela 4.1. O caminho do VANT 2, em ciano continuou o mesmo, mas o VANT 1 teve seu custo de operação diminuído, efetivamente otimizando seu caminho.

A inclusão da heurística deu origem a outro problema. Na simulação 3 (Figura 4.9(a)), ao otimizar uma trajetória para cinco VANTs disponíveis, o otimizador entendeu que só havia necessidade de utilizar três dos VANTs. Executando novamente o algoritmo para três VANTs disponíveis, ao invés de sugerir o uso dos três, com o mesmo caminho planejado, foi sugerido o uso de apenas dois VANTs (Figura 4.9(b)), o que contraria o primeiro resultado



**Figura 4.9:** Resultados da otimização: (a) 5 VANTs disponíveis e  $\rho = 0.9$ . (b) 3 VANTs disponíveis e  $\rho = 0.9$ . (c) 3 VANTs disponíveis e  $\rho = 0.999$ .

|                   | Sim. 3 | Sim. 4 | Sim. 5 |
|-------------------|--------|--------|--------|
| VANTs Disp.       | 5      | 3      | 3      |
| $t_{setup}$ (min) |        | 3      |        |
| N                 |        | 15     |        |
| $t_{sim}$ (s)     | 122,39 | 88,20  | 82,00  |
| VANTs Util.       | 3      | 2      | 3      |
| $t_{voo}$ (min)   | 10,12  | 10,12  | 10,12  |
|                   | 9,58   | 10,42  | 9,58   |
|                   | 10,19  |        | 10,19  |

**Tabela 4.2:** Dados das simulações para diferentes heurísticas: Sim. 1:  $\rho = 0.9$ . Sim. 2  $\rho = 0.9$ . Sim. 3:  $\rho = 0.999$ .

(Tabela 4.2).

Nas simulações 3 e 4, o valor escolhido para ponderar entre os objetivos de minimização era  $\rho = 0,9$ . Após algumas tentativas, verificou-se que a alteração para  $\rho = 0,999$  resolvia o problema, fazendo a solução para três VANTs disponíveis (Simulação 5, Figura 4.9(c)) ser a mesma solução para 5 VANTs disponíveis (Simulação 3, Figura 4.9(a)).

Para confirmar os resultados obtidos através da utilização dessa heurística, foi criado um algoritmo que utiliza a função objetivo original, ou seja, minimizando o maior custo de operação dos VANTs, mas que é executado de forma iterativa. A cada iteração, o VANT de maior custo de operação e os

|                   | Sim. 6 | Sim. 7 |
|-------------------|--------|--------|
| VANTs Disp.       | 5      | 3      |
| $t_{setup}$ (min) |        | 3      |
| N                 |        | 15     |
| $t_{sim}$ (s)     | 195,69 | 49,43  |
| VANTs Util.       | 3      | 3      |
| $t_{vo0}$ (min)   | 10,12  | 10,12  |
|                   | 9,58   | 9,58   |
|                   | 10,19  | 10,19  |

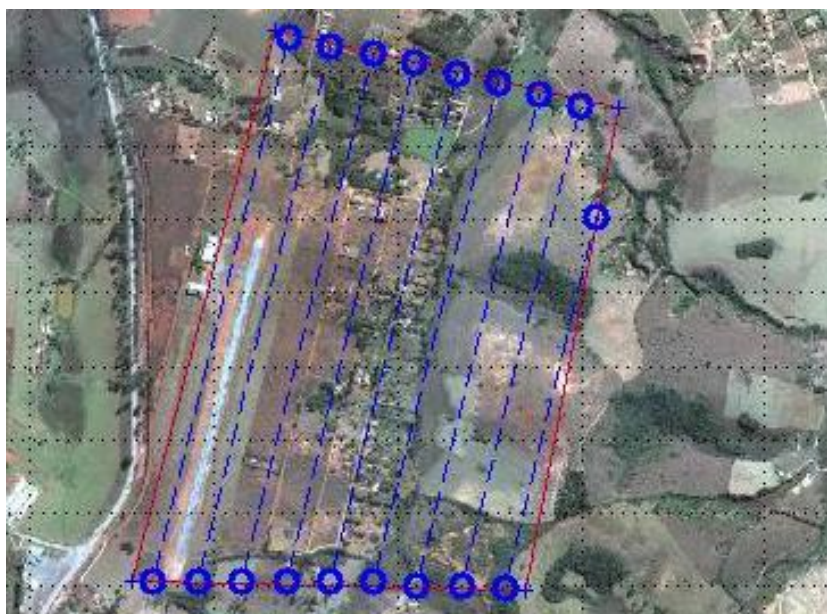
**Tabela 4.3:** Dados das simulações sem heurística e com iterações.

vértices atribuídos a ele são retirados dos conjuntos de VANTs e de vértices para uma nova execução do algoritmo. Esse processo é repetido até que não haja VANTs ou vértices para percorrer, o que significa que todos os caminhos terão sido otimizados. Os resultados mostrados na Tabela 4.3 comprovam a eficácia do método. Observe que os resultados das Simulações 6 e 7 são exatamente iguais àqueles referentes à Simulação 3 e 5, respectivamente.

Na próxima seção serão mostrados resultados de experimentos reais de cobertura com VANTs.

### 4.3 Experimentos

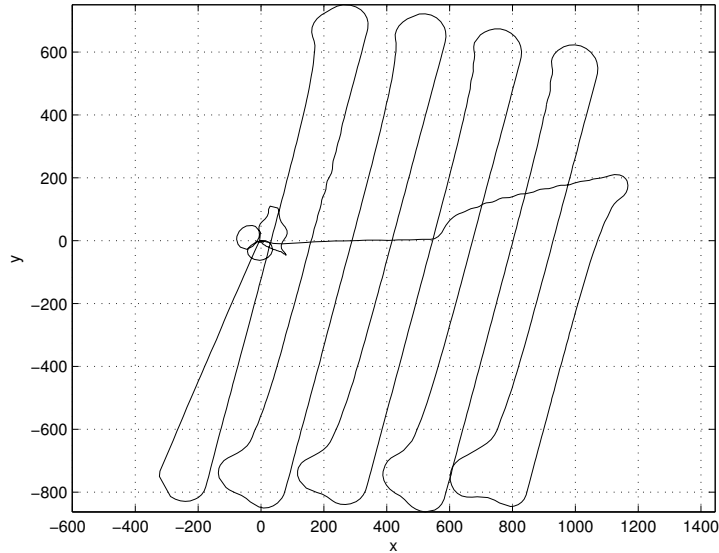
Nesta seção serão apresentados os resultados de experimentos realizados com VANTs na região do Aeroporto das Bandeirinhas, em Conselheiro Lafaiete. O objetivo dos testes foi validar o algoritmo de planejamento de caminho proposto o início deste capítulo, bem como verificar se a escolha da quantidade de VANTs para completar a missão foi adequada. Os testes ocorreram nos dias 26 de abril e 5 de maio de 2014 e tiveram a mesma área para cobertura (Figura 4.10). Maiores detalhes sobre o VANT podem ser encontrados no Apêndice A.



**Figura 4.10:** Linhas de cobertura calculadas a partir de uma área selecionada para cobertura.

Os testes consistiram na cobertura de uma área à leste do aeroporto, de dimensões aproximadas de 900 metros de largura por 1600 metros de comprimento, totalizando uma área de cerca de 150 hectares. Os VANTs deveriam voar a 120 metros de altitude em relação ao solo e estavam equipados com uma câmera Canon Powershot ELPH130. O sensor dessa câmera tem resolução de 4608x3456 pixels, com 6,17 mm de comprimento por 4,55 mm de altura e sua lente tem distância focal  $f = 5,0\text{mm}$ . Utilizando a Equação (4.3) para calcular a abertura do campo de visão e obtém-se  $64,4^\circ$  no sentido horizontal e  $48,9^\circ$  na vertical. Assim, utilizando a Equação 4.1, com uma sobreposição de 30%, as linhas resultantes ficaram espaçadas cerca de 105 metros entre si.

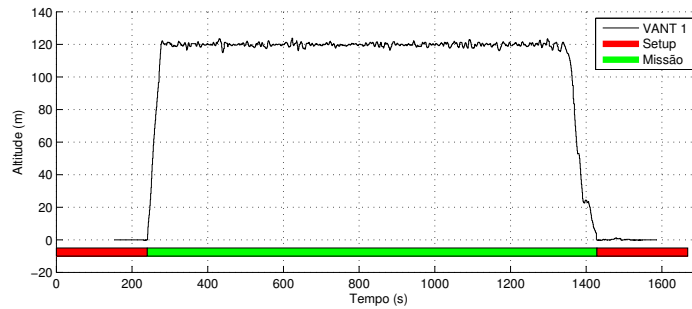
O primeiro teste foi realizado por um único VANT, com objetivo de se estabelecer uma referência do tempo necessário para cumprir a missão (Figura 4.11). O gráfico mostrado na Figura 4.12 serve para mostrar o tempo



**Figura 4.11:** Projecção no plano  $xy$  do caminho percorrido pelo VANT em uma missão solo de cobertura.

que o VANT está parado no solo, em *setup* e o tempo em que ele está efetivamente executando a missão. Este VANT completou a missão em aproximadamente 27,7 minutos, já levando em consideração o tempo de *setup* de 8 minutos. Na Figura 4.11 é possível notar em torno da base, no ponto  $(0, 0)$ , a trajetória realizada pelo VANT durante a decolagem e pouso. Após cada curva, nota-se um pequeno *overshoot* no trajeto feito pelo VANT, em razão da distância entre cada linha ser ligeiramente menor que o raio mínimo de curva do VANT, que é de 115 metros. Este raio mínimo tem este valor devido à limitação no ângulo de rolagem, que é de  $22.5^\circ$ . Essa limitação foi necessária devido à perdas do sinal Sistema de Posicionamento Global (GPS) durante a realização de curvas mais fechadas.

No segundo teste, foram disponibilizados dois VANTs para execução da missão. O algoritmo distribuiu sete linhas de cobertura para o VANT 2 e apenas duas linhas para o VANT 1, levando em consideração os oito minutos

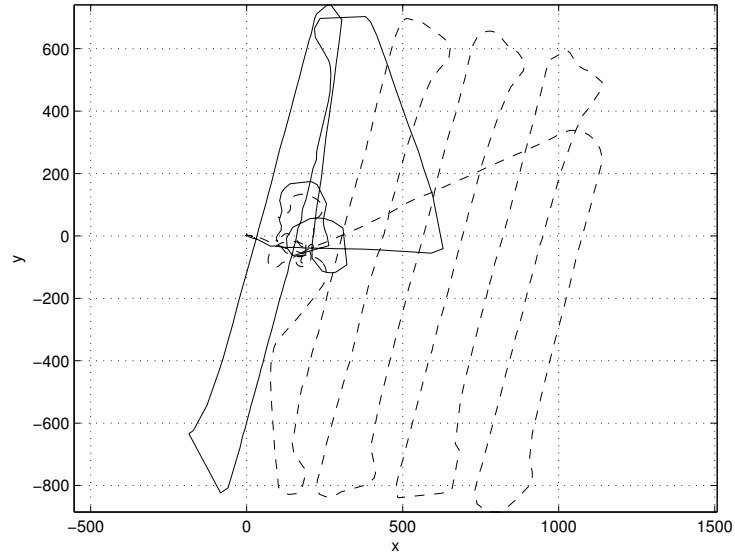


**Figura 4.12:** Altitude do VANT em função do tempo.

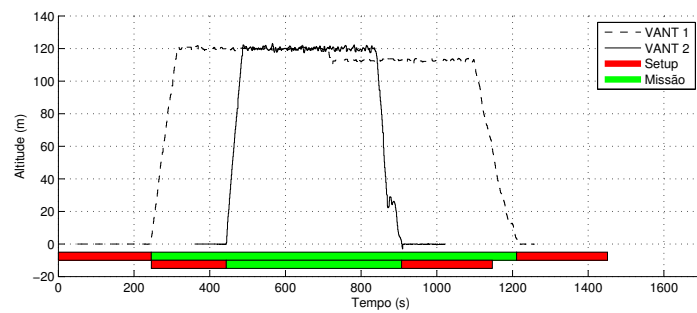
cumulativos de tempo de *setup* (Figura 4.13). O maior custo deste time foi o do VANT 1, que foi de 24,2 minutos, incluindo o *setup* (Figura 4.14). Houve apenas uma pequena vantagem de três minutos em relação à solução com apenas um VANT, que é muito pequena para justificar toda a preparação necessária para o voo de múltiplos VANTs simultaneamente.

Como pôde ser observado, apesar dos VANTs passarem a maior parte do tempo da missão voando reto e nivelados, próximo à extremidades das linhas, após a realização de uma curva, isso não ocorre, fazendo com que a câmera não aponte diretamente para baixo. Uma das formas de contornar este problema é aumentar o comprimento destas linhas na extremidade em que o VANT começa o procedimento de varredura, logo após terminar de percorrer outra linha. Assim, é possível garantir que quando o VANT estiver sobre a região de interesse, já terá terminado a curva e estará voando reto nivelado. Este procedimento não foi realizado nestes experimentos.

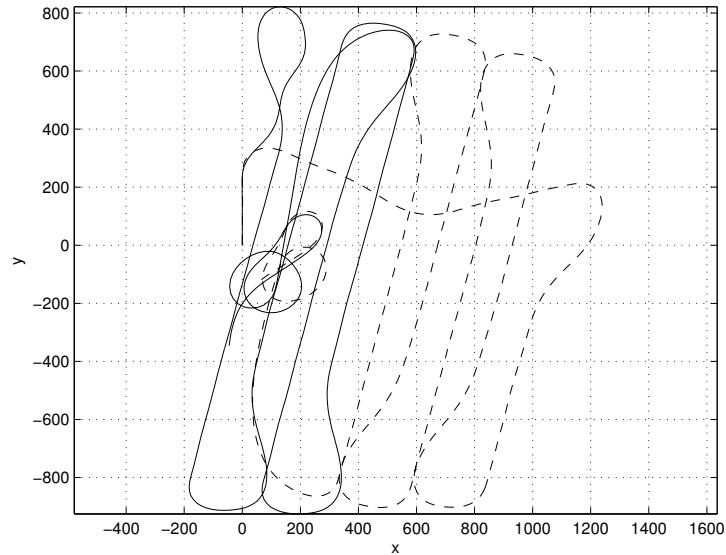
Por fim, no último teste, também foram disponibilizados dois VANTs para execução da missão (Figura 4.15). O algoritmo distribuiu cinco linhas de cobertura para o VANT 1 e quatro linhas para o VANT 2. Isso ocorreu por que o tempo de *setup* foi diminuído para dois minutos, referentes apenas ao tempo de levar e buscar cada VANT para seu local de lançamento (Figura 4.16). Os custos de operação neste experimento foram parecidos, sendo



**Figura 4.13:** Projeção no plano  $xy$  do caminho percorrido pelos VANTs em uma missão de cobertura em cooperação.

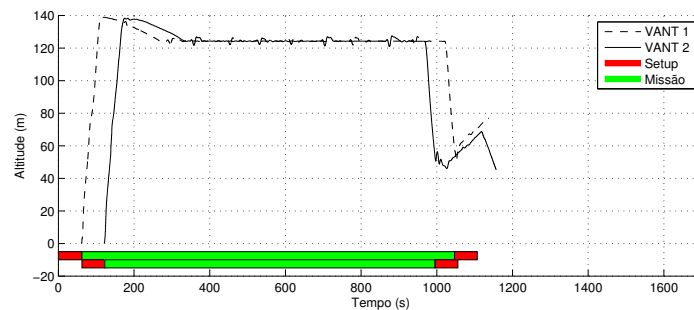


**Figura 4.14:** Altitude dos VANTs em função do tempo.



**Figura 4.15:** Projeção no plano  $xy$  do caminho percorrido pelos VANTs em uma missão de cobertura em cooperação.

que o maior deles foi de 18,4 minutos. Nesse caso houve uma vantagem ainda maior em relação ao custo obtido no experimento que usou apenas um VANT, que foi de 27,7 minutos. Para utilizar um tempo de *setup* pequeno, como foi mostrado nesse experimento, é necessário um número maior de pessoas empenhadas na preparação dos VANTs, de modo que as aeronaves possam decolar com uma pequena diferença de tempo entre elas.



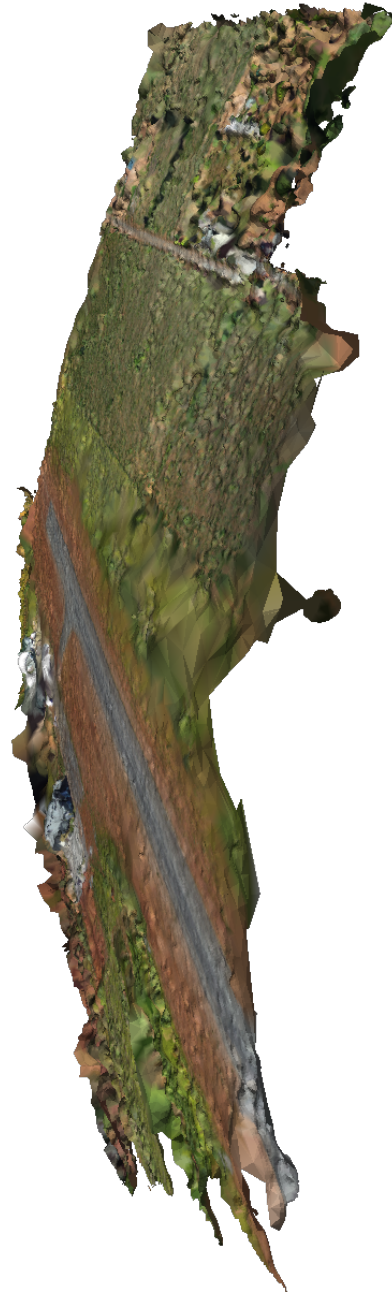
**Figura 4.16:** Altitude dos VANTs em função do tempo.

Como o propósito destes experimentos foi avaliar o tempo de operação em cada caso, não houve captura de imagens naquele momento. Mas previamente havia sido realizado um voo para captura de imagens, em condições um pouco diferentes daquelas apresentadas. Devido a utilização de uma câmera com maior ângulo de abertura e voo a 150 metros de altura, as linhas de cobertura ficaram mais distantes entre si. A área coberta também era menor, cerca de um quarto da área coberta nos experimentos anteriores. Foram capturadas mais de 400 imagens durante o voo, sendo que algumas delas foram descartadas por terem sido capturadas em momentos que o VANT estava em curvas ou com ângulo de rolagem alto (Figura 4.17). Após o processamento destas imagens em um conjunto de softwares (Bundler e CMVS/PMVS2) que constrói estruturas tridimensionais a partir de sequências de imagens, obteve-se o resultado mostrado na Figura 4.18 (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2006; FURUKAWA et al., 2010; FURUKAWA; PONCE, 2010).

Neste capítulo foi apresentada uma nova metodologia de planejamento de caminhos para VANTs em missões de cobertura de áreas. Essa metodologia é dividida em duas etapas que integram a decomposição da área e a solução de um problema de roteamento de veículos com janela de tempo. No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões deste trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.



**Figura 4.17:** Sequência de imagens capturadas por um VANT em um voo para cobertura de uma área próxima ao aeroporto da cidade de Conselheiro Lafaiete (Imagem rotacionada 90°).



**Figura 4.18:** Modelo tridimensional de superfície, obtido a partir das imagens capturadas durante o voo (Imagem rotacionada 90°).

# Capítulo 5

## Conclusões e Trabalhos Futuros

*O destino não é uma questão de acaso, é uma questão de escolha. Não é algo para ser esperado, mas algo para ser alcançado.*

William Jennings Bryan

Neste texto foram desenvolvidas, implementadas e experimentadas estratégias de navegação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para cobertura de fronteiras e áreas. Foram utilizadas abordagens via navegação de curvas implícitas em campos vetoriais e *waypoints*. Em relação à primeira metodologia, algoritmos propostos na literatura e que ainda não haviam sido experimentados em VANTs de asa fixa, foram implementados e testados com sucesso em uma aeronave real. No que tange a segunda técnica, foi proposta uma modificação no modelo do problema de roteamento de veículos para aplicação ao problema de cobertura de áreas. A principal contribuição desta nova modelagem foi a capacidade de decidir a quantidade adequada de veículos que devem ser utilizados para cumprir uma missão no menor tempo possível.

## 5.1 Cobertura de Estruturas Longilíneas

A utilização de campos vetoriais para guiagem é interessante sob diversos aspectos. O fato de ser uma abordagem que integra o planejamento do caminho à malha de controle simplifica as duas etapas e facilita a implementação, além de deixar o sistema mais robusto a pequenos erros de localização e atuação. Há ainda que se levar em consideração algumas melhorias a serem implementadas para sua utilização efetiva e difundida como forma de guiagem para o usuário final.

Uma destas melhorias consiste em um algoritmo para ajuste automático entre o raio de mínimo de curva em voo que o VANT consegue realizar e o caminho proposto através da curva implícita no campo vetorial. Nos experimentos realizados para este trabalho, houve a necessidade de se limitar o ângulo de rolamento do VANT em função de perdas de sinal GPS quando sua inclinação aumentava acima de  $22,5^\circ$ , devido a realização de curvas fechadas. Essa limitação impede que o VANT realize curvas que tenham raio menor que 115 metros. Então, seria interessante incluir no planejamento uma forma para alterar a função  $G(y)$  na Equação (3.7), de modo que ela seja definida totalmente em função do campo escolhido e sem a necessidade de intervenção do usuário ao trocar o campo utilizado para guiagem.

Outras variações interessantes e que não foram exploradas são a extensão para campos vetoriais de dimensões superiores e sua variância no tempo. Ao aumentar a dimensão do campo vetorial, é possível controlar a altura de voo do VANT. Já a utilização de campos vetoriais variantes no tempo permitiria o rastreamento de alvos móveis, algo que pode ser útil em aplicações de vigilância e monitoramento.

## 5.2 Cobertura de Áreas

A metodologia proposta para cobertura de áreas utilizando VANTs se mostrou prática e eficiente. A principal contribuição foi mostrar que o uso de um sistema com múltiplos VANTs deve ser muito bem avaliado antes de seu emprego. Para que o uso de mais de um VANT se justifique, é necessário que a área de interesse seja muito grande ou que a equipe de operações seja maior, de forma a reduzir o tempo de *setup*. Outro fator negativo, em detrimento ao uso de um número maior de VANTs, é o aumento da complexidade e custo total do sistema. Operar  $n$  VANTs exige igual quantidade de pilotos, pilotos automáticos, rádios, controles remotos, etc. Dependendo do ganho de tempo em relação a um VANT, pode ser que esse custo e complexidade adicional não valha a pena.

A melhoria de alguns pontos no algoritmo poderiam facilitar ainda mais sua popularização. Uma delas seria a possibilidade de realizar a cobertura em áreas não convexas. Para tornar isso possível, na etapa de decomposição da área seria necessário dividir a área não convexa em subáreas convexas e realizar o planejamento nestas áreas. Seria preciso também tratar a possibilidade da base não estar mais em apenas um lugar. Provavelmente, ao navegar entre as subáreas, o VANT iria começar em um ponto e ao terminar a subárea, iria para a próxima, só retornando para a base após a cobertura de todas as subáreas. Outra vantagem deste método seria a garantia de que o VANT não entraria em zonas proibidas ao voo. Elas poderiam ser modeladas como áreas proibidas dentro do polígono, que seriam excluídas com a divisão em subáreas convexas.

Não há restrições no algoritmo que tratem da relação entre a proximidade das linhas e o raio mínimo de curva do VANT. Seria interessante a

inclusão de uma restrição deste tipo, impedindo o algoritmo de calcular um caminho que passasse em sequência por duas linhas de cobertura que estivessem a uma distância menor que o raio mínimo de curva. Seria necessário também a incorporação de outro método de guiagem que guiasse o VANT em missões onde somente houvesse linhas próximas, de modo que essa adição ao algoritmo não tornasse algumas missões infactíveis. Ainda nessa linha de pensamento, pode haver um benefício considerável na qualidade das imagens obtidas durante a missão, caso a dinâmica do VANT fosse considerada na etapa de planejamento. Com curvas planejadas e mais suaves, poderia haver garantia de que o VANT estaria voando reto e nivelado enquanto estivesse nas linhas de cobertura.

A inclusão de um sistema que modifique a altura de voo, de modo que a altura em relação ao solo se mantenha aproximadamente constante, poderia beneficiar também na qualidade das imagens obtidas. Desse modo a resolução em centímetros por pixel obtida pelas imagens se manteria dentro de uma margem, minimizando distorções nos mapas gerados. Para implementar este sistema, seria necessário a obtenção a priori de um modelo digital de elevação (DEM) da área a ser coberta. Um corte transversal, alinhado com cada linha de cobertura, seria usado para calcular as correções de altitude que devem ocorrer nos intervalos entre as linhas. Assim, o VANT continuaria voando reto e nivelado sobre a região de interesse e faria movimentos circulares para modificar sua altitude de voo nas extremidades das linhas. Seriam necessárias modificações na matriz de custos para incorporação do esforço adicional das mudanças de altura. Isto se deve ao fato de que a manobra para mudança de altura faria o VANT percorrer uma distância maior do que a distância entre os dois vértices, calculada em um espaço com três dimensões. Esse método deve ser modificado para utilização em regiões que apresentem alteração muito

acentuada da elevação do solo. Nesse caso, há a possibilidade de que alguns pontos do solo possam ultrapassar a altura de voo, podendo causar uma colisão com o solo.

Aplicações em vigilância podem se beneficiar de uma modificação no algoritmo que permita a persistência do monitoramento. Isso deveria ser feito retirando a restrição de que cada *waypoint* só deve ser visitado apenas uma vez. Nessa aplicação realmente seria interessante a utilização de um time de VANTs, cada um deles percorrendo uma sub-região ou todos eles igualmente espaçados no mesmo caminho, pois a frequência de atualização de imagens seria tão grande quanto seu número.

Além destas sugestões, há inúmeras outras que poderiam contribuir para o desenvolvimento de Sistemas de Veículos Aéreos Não Tripulados (SISVANTs), pois este é um campo de pesquisa é muito amplo e interdisciplinar. Em breve, veículos aéreos não tripulados estarão legalmente nos espaços aéreos ao redor do mundo e também no Brasil, sendo utilizados por grupos civis, ajudando a salvar vidas, aumentando a eficiência da agricultura e promovendo outros benefícios ainda não imaginados. Com este trabalho, espera-se ter contribuído um pouco para a difusão do conhecimento relacionado a estes sistemas, facilitando seu uso e aplicação.

# Referências Bibliográficas

AHMADZADEH, A. et al. Multi-UAV Cooperative Surveillance with Spatio-Temporal Specifications. In: *Proceedings of the 45th Conference on Decision and Control*. San Diego, USA: IEEE, 2006. p. 5293–5298.

ANAC. *Instrução Suplementar IS-21-002 Rev. A*. Brasília, Brasil, 2012.

ARKIN, E. M.; HASSIN, R. Approximation algorithms for the geometric covering salesman problem. *Discrete Applied Mathematics*, v. 55, n. 3, p. 197–218, dez. 1994.

ATOMICS, G. *General Atomics MQ-9 Reaper*. 2014. ([http://www.drone-report.com/News/2014/Feb/25/images/General\\_Atomics\\_MQ-9\\_Reaper.jpg](http://www.drone-report.com/News/2014/Feb/25/images/General_Atomics_MQ-9_Reaper.jpg)). Visitado em Março, 2014.

AUSTIN, R. *Unmanned Aircraft Systems*. 1st. ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

AVELLAR, G. S. C. et al. On the development of a small hand-held multi-UAV platform for surveillance and monitoring. In: *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. Atlanta, USA: IEEE, 2013. p. 405–412.

CAMPOS, M. F. M. et al. Sidevaan: Simulação e Desenvolvimento de Veículos Aéreos Autônomos e Não-Tripulados. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Florianópolis, SC, Brasil: SBA, 2007.

CAO, Z. L.; HUANG, Y.; HALL, E. L. Region filling operations with random obstacle avoidance for mobile robots. *Journal of Robotic Systems*, v. 5, n. 2, p. 87–102, abr. 1988.

CECCARELLI, N. et al. Collective circular motion of multi-vehicle systems. *Automatica*, Elsevier Ltd, v. 44, n. 12, p. 3025–3035, dez. 2008.

- CHAIMOWICZ, L.; MICHAEL, N.; KUMAR, V. Controlling Swarms of Robots Using Interpolated Implicit Functions. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005. p. 2487–2492.
- CHOSSET, H. Coverage for robotics—A survey of recent results. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, v. 31, n. 1-4, p. 113–126, 2001.
- CHOSSET, H.; PIGNON, P. Coverage path planning: The boustrophedon cellular decomposition. In: *International Conference on Field and Service Robotics*. [S.l.]: Springer, 1998. p. 203–209.
- CHOSSET, H. M. et al. *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. 1st. ed. Cambridge, USA: MIT Press, 2005.
- CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P. Exact Algorithms For The Vehicle Routing Problem , Based On Spanning Tree And Shortest Path Relaxations. *Mathematical Programming*, v. 20, p. 255–282, 1981.
- CONNOLLY, C. I.; BURNS, J. B.; WEISS, R. Path Planning Using Laplace’s Equation. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Cincinnati, USA: IEEE, 1990. p. 2102–2106.
- COX, T. H.; SOMERS, I.; FRATELLO, D. J. *Earth Observations and the Role of UAVs: A Capabilities Assessment*. Edwards AFB, USA, 2006.
- ERAST, N. *NASA ERAST Program*. 2014. <[http://en.wikipedia.org/wiki/NASA\\_ERAST\\_Program](http://en.wikipedia.org/wiki/NASA_ERAST_Program)>. Visitado em Março, 2014.
- FAHLSTROM, P. G.; GLEASON, T. J. *Introduction to UAV Systems*. 4th. ed. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- FREW, E. W.; LAWRENCE, D. Tracking Expanding Star Curves Using Guidance Vector Fields. In: *American Control Conference*. Montréal, Canada: IEEE, 2012. p. 1749–1754.
- FREW, E. W. et al. Lyapunov Guidance Vector Fields for Unmanned Aircraft Applications. In: *American Control Conference*. New York City, USA: IEEE, 2007. p. 371–376.
- FURUKAWA, Y. et al. Towards Internet-scale Multi-view Stereo. In: *Proceedings of the 23rd Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, USA: IEEE, 2010. p. 1434–1441.

- FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 32, n. 8, p. 1362–1376, ago. 2010.
- GALCERAN, E.; CARRERAS, M. A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, Elsevier B.V., v. 61, n. 12, p. 1258–1276, dez. 2013.
- GONÇALVES, M. M.; PIMENTA, L. C. A.; PEREIRA, G. A. S. Coverage of curves in 3D with swarms of nonholonomic aerial robots. In: *18th IFAC World Congress*. Milano, Italy: IFAC, 2011. p. 10367–10372.
- GONÇALVES, V. M. et al. Navegação de robôs utilizando curvas implícitas. *Revista Controle & Automação*, v. 21, n. 1, p. 43–57, 2010a.
- GONÇALVES, V. M. et al. Vector Fields for Robot Navigation Along Time-Varying Curves in n-Dimensions. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 26, n. 4, p. 647–659, ago. 2010b.
- GRUMMAN, N. *Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk*. 2014. [http://en.wikipedia.org/wiki/Northrop\\_Grumman\\_RQ-4\\_Global\\_Hawk](http://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_RQ-4_Global_Hawk). Visitado em Março, 2014.
- HSIEH, M.-Y. A.; KUMAR, V. Pattern generation with multiple robots. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, USA: IEEE, 2006. p. 2442–2447.
- HSIEH, M.-Y. A.; LOIZOU, S.; KUMAR, V. Stabilization of Multiple Robots on Stable Orbits via Local Sensing. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE, 2007. p. 2312–2317.
- HUANG, W. H. Optimal line-sweep-based decompositions for coverage algorithms. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Seoul, Korea: IEEE, 2001. v. 1, p. 27–32.
- ISCOLD, P.; PEREIRA, G. A. S.; TORRES, L. A. B. Development of a Hand-Launched Small UAV for Ground Reconnaissance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 46, n. 1, p. 335–348, jan. 2010.
- JENKINS, D.; VASIGH, B. *The Economic Impact of unmanned Aircraft Systems Integration in The United States*. Arlington, USA, 2013.

- JESUS, T. A. et al. On the Coordination of Constrained Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 24, n. 5, p. 585–600, jul. 2013.
- KEANE, J. F.; CARR, S. S. A Brief History of Early Unmanned Aircraft. *John Hopkins APL Technical Digest*, v. 32, n. 3, p. 558–571, 2013.
- KETTERING, C. *Kettering Bug*. 2014. [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering\\_Bug.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering_Bug.html). Visitado em Março, 2014.
- KHATIB, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. St. Louis, USA: IEEE, 1985. v. 2, p. 500–505.
- KING, E. et al. Coordination and control experiments on a multi-vehicle testbed. In: *Proceedings of the American Control Conference*. Boston, USA: IEEE, 2004. v. 6, p. 5315–5320.
- LAWRENCE, D. A.; FREW, E. W.; PISANO, W. J. Lyapunov Vector Fields for Autonomous Unmanned Aircraft Flight Control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, v. 31, n. 5, p. 1220–1229, set. 2008.
- LÖFBERG, J. Yalmip: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: *Proceedings of the Computer Aided Control System Design Conference*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2004. Disponível em: <http://users.isy.liu.se/johanl/yalmip>.
- MASOUD, A. A. A harmonic potential field approach with a probabilistic space descriptor for planning in non-divisible environments. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan: IEEE, 2009. p. 3774–3779.
- MAZA, I.; OLLERO, A. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. In: *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. [S.l.]: Springer Japan, 2007. cap. Part V, p. 221–230.
- OPTIMIZATION, I. G. *Gurobi Optimizer Reference Manual*. 2014. Disponível em: <http://www.gurobi.com>.
- PALACIN, J. et al. Measuring Coverage Performances of a Floor Cleaning Mobile Robot Using a Vision System. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain: IEEE, 2005. p. 4236–4241.

- PEREIRA, G. A. S. et al. Robot Navigation in Multi-terrain Outdoor Environments. *The International Journal of Robotics Research*, v. 28, n. 6, p. 685–700, 2009.
- PIMENTA, L. C. et al. Decentralized controllers for perimeter surveillance with teams of aerial robots. *Advanced Robotics*, v. 27, n. 9, p. 697–709, jun. 2013.
- PIMENTA, L. C. A. et al. Fluids in Electrostatic Fields: An Analogy for Multirobot Control. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 43, n. 4, p. 1765–1768, abr. 2007.
- PIMENTA, L. C. A.; PEREIRA, G. A. S.; MESQUITA, R. C. Fully continuous vector fields for mobile robot navigation on sequences of discrete triangular regions. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Roma, Italy: IEEE, 2007. p. 1992–1997.
- PIMENTA, L. C. a. et al. Swarm Coordination Based on Smoothed Particle Hydrodynamics Technique. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 29, n. 2, p. 383–399, abr. 2013.
- PUBLICLAB. *Infragram*. 2014. <<http://publiclab.org/wiki/infragram-media>>. Visitado em Maio, 2014.
- RANGEL, R. K.; KIENITZ, K. H.; BRANDÃO, M. P. Development of a multi-purpose portable electrical UAV system, fixed & rotative wing. In: *Aerospace Conference*. Big Sky, USA: IEEE, 2011. p. 1–9.
- RIMON, E.; KODITSCHKEK, D. E. “Exact robot navigation using artificial potential functions. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 8, n. 5, p. 501–518, 1992.
- SERVICES, A. P. *Fukushima Power Plant Disaster Area*. 2014. <<http://www.yamazaki-k.co.jp/airphoto/service.html>>. Visitado em Fevereiro, 2013.
- SHERMER, T. Recent results in art galleries (geometry). *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 9, p. 1384–1399, 1992.
- SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, 25, n. 3, p. 835–846, JUL 2006.

- SPERRY-CURTIS. *Sperry Flying Bomb*. 2014. (<http://www.designation-systems.net/dusrm/app4/sperry-fb.html>). Visitado em Março, 2014.
- TECHNOLOGY, C. C. *Piccolo Autopilots*. 2014. (<http://www.cloudcaptech.com/piccolo-system.shtm>). Visitado em Maio, 2014.
- TEO, R.; JANG, J. S.; TOMLIN, C. Automated multiple UAV flight - the Stanford Dragonfly UAV program. In: *43rd Conference on Decision and Control*. Atlantis, Bahamas: IEEE, 2004. v. 4, p. 4268–4273.
- TISDALE, J. et al. The software architecture of the Berkeley UAV Platform. In: *Proceedings of the International Conference on Control Applications*. Munich, Germany: IEEE, 2006. p. 1420–1425.
- VARGAS, L. A. T. de; ISCOLD, P. A fast aerodynamic procedure for a complete aircraft design using the know airfoil characteristics. *SAE Technical Papers*, 2006.
- XU, A.; VIRIYASUTHEE, C.; REKLEITIS, I. Optimal complete terrain coverage using an Unmanned Aerial Vehicle. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Shangai, China: IEEE, 2011. p. 2513–2519.
- XU, L.; STENTZ, A. An efficient algorithm for environmental coverage with multiple robots. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Shangai, China: IEEE, 2011. p. 4950–4955.
- ZHANG, L.; LAVALLE, S. M.; MANOCHA, D. Global vector field computation for feedback motion planning. In: *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan: IEEE, 2009. p. 477–482.

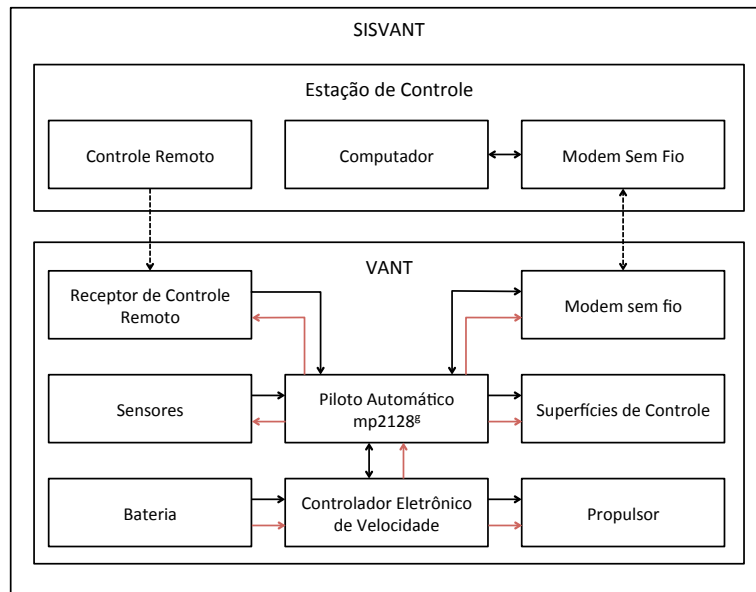
# Apêndice A

## Plataforma de Testes

Nas próximas seções serão detalhadas a plataforma utilizada para realização dos testes das metodologias apresentadas nos Capítulos 3 e 4. A Seção A.1 tratará das características construtivas do Sistema de Veículos Aéreos Não Tripulados (SISVANT) e a Seção A.2.2 apresentará maiores detalhes sobre a utilização do software de controle e planejamento Micropilot Horizon<sup>mp</sup> e o Matlab.

### A.1 SISVANT

Nesta seção será apresentado o SISVANT utilizado nos experimentos das metodologias apresentadas nos Capítulos 3 e 4. Esse SISVANT é composto pelo Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), estação de controle de solo e link de comunicação. Cada um destes subsistemas possui uma série de outros subsistemas, que serão detalhados em suas respectivas seções. Na Figura A.1 pode-se ter uma visão ampla de como todos os subsistemas estão conectados e trocam informações. As setas negras representam a troca de dados, sendo que nas setas pontilhadas o enlace é sem fios. As setas vermelhas representam as ligações elétricas para alimentação dos componentes.



**Figura A.1:** Arquitetura do SISVANT utilizado neste trabalho. Setas negras representam conexões de dados e setas vermelhas representam a alimentação elétrica dos componentes.

### A.1.1 Veículo Aéreo Não Tripulado

O VANT utilizado para realização de testes deste trabalho é um protótipo fabricado pelo Centro de Estudos Aeronáuticos (CEA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (Figura 1.5). É equipado com piloto automático, modem sem fio, receptor de controle remoto e demais equipamentos eletrônicos como servos, motor e bateria. Sua autonomia é de cerca de trinta e cinco minutos de voo, sendo capaz de cobrir uma distância, em linha reta de aproximadamente trinta quilômetros. O VANT pode levar uma câmera de até trezentos gramas.

#### Fuselagem

Com o objetivo de tornar o desenvolvimento e operação mais simples, optou-se pelo uso de uma plataforma do tipo asa voadora. Este tipo de asa

não possui leme e seus ailerons e profundos são combinados em uma superfície de controle chamada elevon. Para os testes preliminares, uma versão modificada do modelo *Zagi* foi desenvolvido como protótipo, onde a envergadura foi aumentada para manter a carga alar dentro de um limite prático de modo a garantir uma boa qualidade de voo. O perfil de uma asa voadora não é escalonável, devido ao fato de que a posição do Centro de Gravidade (CG) da fuselagem não é proporcional à sua envergadura. Normalmente, o CG se desloca para trás quando a envergadura aumenta, assim, o ângulo de enflechamento deve ser modificado para manter o CG em uma posição apropriada. Essa posição foi escolhida de modo a manter o ângulo de arfagem neutro na velocidade de cruzeiro da aeronave, o que garante o menor arrasto.

Como o propósito dessa aeronave é a cobertura e monitoramento de áreas, a velocidade de cruzeiro escolhida deve ser aquela que garante o maior tempo de voo. Normalmente, ela está muito próxima da velocidade de estol, onde o controle da aeronave torna mais difícil especialmente em condições de voo turbulentas. Para garantir uma melhor condição de controle e ainda assim possibilitar voos de longa duração, o enflechamento foi ajustado para a melhor velocidade de planeio. Nesta configuração ainda é possível voar em baixas velocidades, mas a deflexão das superfícies de controle não será nula, o que causaria aumento do arrasto. A configuração da asa foi testada para verificar as margens de estabilidade utilizando um método não linear de vórtice-lattice desenvolvido por pesquisadores do CEA (VARGAS; ISCOLD, 2006). A Figura A.2 mostra a evolução dos protótipos até o design final.

O protótipo é fabricado utilizando blocos de isopor P3 ou P4, cortado com fio quente e coberto com fitas plásticas de polipropileno e colado com cola contato. As cavidades necessárias para embarcar os componentes eletrônicos e piloto automático foram cortados utilizando uma máquina de



**Figura A.2:** Evolução da fuselagem dos VANTs desenvolvidos para suporte desse projeto. Ao fundo estão três modelos da *Zagi* original, em seguida há dois modelos de envergadura aumentada e enflechamento alterado, e por fim o modelo final da fuselagem, em fibra de vidro.

Comando Numérico Computadorizado (CNC). Foi verificado nos primeiros testes de voo que a aeronave apresentava vibrações em baixas velocidades devido à falta de rigidez do material utilizado na construção, ao tamanho da envergadura e à concentração de peso na raiz da asa. Assim fez-se necessária a instalação de longarinas de fibra de carbono unidirecional nas partes superior e inferior da asa.

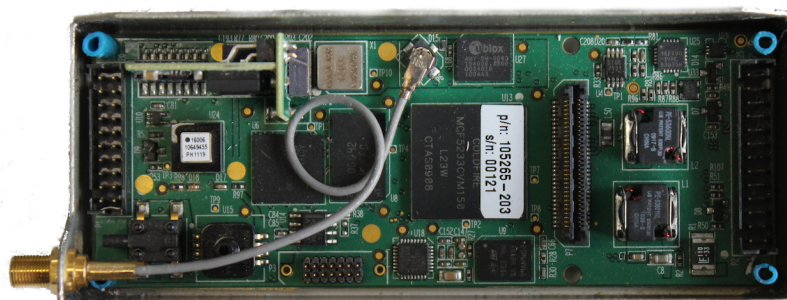
Após verificar o sucesso dessa plataforma nos testes de voo, a versão final começou a ser desenvolvida, com o objetivo de suprimir ou minimizar alguns problemas apresentados no protótipo. Uma nova asa, com um alongamento maior foi desenvolvida, apresentando características aerodinâmicas melhoradas. O processo de fabricação mudou com as asas e fuselagem sendo construídas a partir de moldes feitos em madeira pela máquina CNC. O material utilizado passou a ser fibra de vidro reforçado com fibra de carbono

e espuma de Policloreto de Vinil (PVC) rígida. Apesar do processo de fabricação ter ficado mais lento em relação à versão anterior, a qualidade do acabamento da superfície da asa melhorou, causando uma melhoria significativa nas características aerodinâmicas. Apesar disso, o problema de vibração voltou a acontecer, devido a falta de rigidez da longarina da asa, o que não prejudicou o voo devido ao auxílio do piloto automático. Para resolver o problema, foram instaladas duas *wing fences*, que são parecidos com *winglets* mas posicionados no meio das asas, próximas aos elevons, impedindo-os de estolar em curvas de baixa velocidade e melhorando as condições de voo e com redução marginal na performance.

### **Piloto Automático e outros Componentes**

O piloto automático instalado na fuselagem e utilizado nos testes deste trabalho é o modelo 2128<sup>g</sup>, fabricado pela empresa canadense Micropilot (Figura A.3). É um produto que pesa apenas 28 gramas, mas é capaz de tornar a operação de um VANT totalmente autônoma, da decolagem ao pouso. Para isso, ele conta com sensores necessários para medição inercial integrados a placa de circuito: acelerômetros, girômetros, magnetômetros, barômetro, pressão diferencial e receptor do Sistema de Posicionamento Global (GPS). Há ainda o suporte para conexão de outros sensores, como ultrassom para medição de altura sobre o solo, que é muito útil para aumento da precisão na medição de altura em relação ao solo durante o pouso autônomo. É possível acessar e modificar os valores de todos os ganhos dos controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID), inclusive durante o voo, além do acesso à variáveis de estado e configuração. O sistema conta ainda com o registro dos dados dos sensores e atuadores para acesso e análise posteriores.

O VANT é alimentado por uma bateria de Polímero de Lítio (LiPo) de 3



**Figura A.3:** Piloto automático mp2128<sup>g</sup>.

células em série, totalizando 11,1V de tensão nominal. A carga total da bateria é de 4350mAh, podendo liberar picos de corrente de mais de 80A. A bateria é conectada diretamente ao Controlador Eletrônico de Velocidade (ESC). Este, por sua vez, tem um conversor de corrente contínua que diminui e regula a tensão de 5V para alimentação do piloto automático e outros sistemas. O ESC recebe o sinal de controle do motor e com ele, transforma a tensão de alimentação da bateria em uma tensão senoidal trifásica, de amplitude e frequência variáveis, para acionamento do motor que é do tipo síncrono, com índice de velocidade de 1042rpm/V. O piloto automático, utiliza a tensão convertida pelo ESC para alimentar o modem sem fio, receptor do controle remoto e servos.

### A.1.2 Estação de Controle no Solo

A Estação de Controle de Solo (ECS) é responsável pela troca de informações com o VANT ou grupo de VANTs durante todas as etapas da missão. A ECS é composta por um computador, modem sem fio e controle remoto. No computador é executado o software, chamado Horizon<sup>mp</sup>, para exibição de informações relacionadas ao voo, como horizonte artificial, localização em um mapa, tensão da bateria, velocidade em relação ao ar e ao



**Figura A.4:** Estação de Controle no Solo, composta por computador, modem sem fio e controle remoto.

solo. Além disso, esse software é utilizado para a programação e simulação da missão, configuração dos VANTs e leitura e análise de dados após os voos. Em caso de operação prolongada, é possível alimentar estes sistemas com um inversor, alimentado pela bateria ou alternador de um automóvel.

### Computador

O Horizon<sup>mp</sup> possui algumas funcionalidades interessantes. Com ele é possível controlar até 125 VANTs simultaneamente utilizando apenas uma porta COM do computador. Apesar disso, durante os testes não foi possível utilizar essa funcionalidade da forma como foi divulgada pelo fabricante, precisando de dois modems conectados a duas portas COM. Outra funcionalidade é a possibilidade de compartilhar o controle dos VANTs com outras ECS, o que é particularmente interessante em inspeções de linhas de transmissão, gasodutos e monitoramento de fronteiras, pois o raio de alcance do VANT não fica limitado à metade de sua autonomia total. Por fim, é possível configurar a comunicação entre o Horizon<sup>mp</sup> e o software Matlab Simulink.

A comunicação é realizada por meio do uso de um pacote que adiciona novas funções ao software. Esta forma de controle foi explorada nos testes realizados no Capítulo 3 e será explicada em detalhes na Seção A.2.2.

Por medidas de segurança, não é recomendável utilizar o piloto automático em modo autônomo sem que um controle remoto esteja disponível durante toda a missão. O controle remoto utilizado é o modelo DX7, fabricado pela Spektrum. Apesar de possuir sete canais, apenas 4 são utilizados, sendo eles motor, aileron, profundor e chave de controle manual ou automático.

### **Modem Sem Fio**

O enlace de comunicação entre os VANTs e a ECS é fornecido através da conexão entre modems sem fio XTend, fabricados pela Digi. Estes modems operam na frequência de 900MHz, tem potência de transmissão de até 1W e transmitem dados a uma taxa de 115200 bits por segundo. A comunicação entre o modem e o computador ou entre o modem e o piloto automático se dá através do protocolo RS-232.

## **A.2 Operação do Micropilot 2128<sup>G</sup>**

A operação de um SISVANT é uma tarefa complexa, por causa da integração de todos os seus subsistemas. Algumas vezes, a simples ligação ou desligamento de um deles fora da ordem especificada é suficiente para impedir o funcionamento de todo o restante, ou causar seu acionamento inesperado, podendo causar acidentes graves. O texto a seguir não tem como objetivo ensinar conceitos básicos a respeito do piloto automático Micropilot 2128<sup>G</sup> ou do software Horizon<sup>mp</sup>, que podem ser obtidos nos manuais de operação destes. O objetivo é apenas detalhar uma rotina de procedimentos que funciona

na prática para operação do sistema com sucesso.

## A.2.1 Sequência para Operação dos Equipamentos

### Pré-Voo

Em geral, os procedimentos pré-voo acontecem em duas etapas. Na primeira delas, são testados o enlace de comunicação e controle remoto. Além disso, as configurações de voo podem ser feitas neste momento. A primeira sequência é a seguinte:

1. Ligar o computador e executar os softwares que serão utilizados durante o voo.
2. Ligar o modem sem fio. Testar o funcionamento do mesmo com o software X-Tend. Caso não funcione, repita o procedimento.
3. Ligar o controle remoto, checando antes se posição da chave seletora do comando manual-automático está na posição automático e se o comando de motor está na posição neutra.
4. Ligar o VANT.

Na primeira vez que o VANT, é ligado após um deslocamento longo, o tempo necessário para que o receptor GPS localize os satélites no espaço é um pouco mais longo, chegando a durar até cinco minutos. Enquanto essa espera necessária ocorre, é possível aproveitar o tempo transmitindo para o VANT suas configurações e o plano de voo da missão. É recomendável mover o VANT, girando-o nos eixos  $x$  e  $y$ , e observando se os comandos do piloto automático para as superfícies de controle estão configurados corretamente. Somente quando o sinal GPS fica disponível, é possível acionar os comandos manuais das superfícies de controle, o que deve ser feito para verificar

se os comandos não estão invertidos. Uma vez que todas estas verificações foram realizadas, o VANT pode ser desligado e caso necessário, ter sua bateria trocada. É recomendável disponibilizar uma bateria apenas para estas verificações pré-voo.

Uma vez que todas as verificações tenham sido realizadas, a segunda etapa será o procedimento final para decolagem. Neste ponto, todos os subsistemas da estação de solo já estarão ligados e a comunicação já terá sido testada. A sequência de tarefas é a seguinte:

1. Ligar o VANT.
2. No software Horizon<sup>mp</sup>, estabelecer a conexão com o VANT, clicando no botão *Connect*.
3. Esperar o receptor do GPS estabelecer conexão com os satélites.
4. Quando o GPS estiver *online*, clicar no botão *Arm* no software Horizon<sup>mp</sup>. Esta ação deixa o VANT preparado e aguardando o lançamento.
5. Certificar-se que o VANT está no modo autônomo e realizar o lançamento.

Assim, o VANT estará no ar e se tudo acontecer conforme o planejamento, realizará sua missão com sucesso.

### **Durante o Voo**

Enquanto a missão acontece, é muito importante que quando possível, o piloto acompanhe visualmente o VANT, monitorando-o constantemente para que, na ocorrência de algum imprevisto, assuma o controle e o traga para o pouso na base. O papel do operador do VANT é monitorar as variáveis de voo e informar ao piloto no caso de alguma irregularidade. As principais

variáveis são velocidade, altura e tensão da bateria. Para que a telemetria chegue até a estação de solo, o enlace de rádio deve ser de qualidade.

Normalmente não há problemas em voos realizados com apenas um VANT, mas em voos com um grupo de dois ou mais VANTs, aumenta a possibilidade de colisão dos pacotes de dados, aumentando a frequência de falhas no sinal. Essa perda momentânea não caracteriza um problema sério, pois o VANT é capaz de voar sem comunicação com a estação de solo, apesar disto não ser recomendável. Essa diferença na qualidade do sinal e dos dados de telemetria recebidos é perceptível nas figuras 4.11 e 4.13. Na primeira, apenas um VANT foi utilizado na missão, o que resultou em uma taxa de envio dos dados satisfatória, evidenciada pela suavidade das linhas. Na segunda figura, dois VANTs foram utilizados para completar a missão. Como houve uma frequência maior de colisões de pacotes e perdas de sinal, as linhas que representam as trajetórias não são suaves, o que mostra que em alguns momentos, a estação de solo ficava sem atualizações daquele VANT.

Uma vez terminada a missão, o VANT irá retornar a base e iniciar o circuito de pouso no local especificado no plano de voo.

### **Pós-Voo**

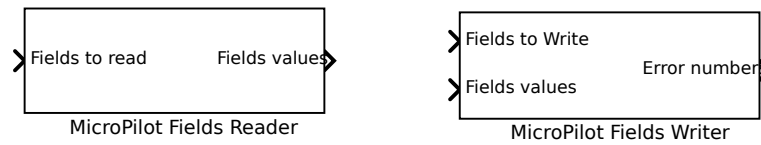
Após a realização do voo, a sequência de desligamento dos sistemas irá depender se o usuário desejar, ou não, ter acesso ao *datalog*. O *datalog* é uma ferramenta importante para entender tudo que aconteceu durante o voo, principalmente se houver falhas. Na eventual necessidade de pedir ajuda ao suporte do fabricante, sempre será necessário o envio de pelo menos três arquivos; *datalog*, configurações do VANT e plano de voo. Assim, caso seja necessária a transferência do *datalog*, a sequência de tarefas pós voo é a seguinte:

1. Desconectar o software Horizon<sup>mp</sup> apertando o botão *Disconnect* e fechar o software. Esse passo é necessário pois a porta COM não pode ser utilizada por dois softwares diferentes simultaneamente.
2. Conectar fisicamente, através de um cabo, a porta serial do computador com a porta COM do piloto automático. Esse passo não é obrigatório, mas como o volume de dados é muito grande, a conexão física é recomendada para uma transferência mais rápida.
3. Abrir o software *Datalog Viewer* e iniciar o procedimento de transferência do *datalog*.
4. Desconectar e reconectar a bateria do VANT. A transferência dos dados deve começar alguns instantes depois.
5. Finalizada a transferência, pode-se desligar o VANT.
6. Desligar controle remoto, modem e computador.

No caso do *datalog* não ser necessário, apenas os passos 1, 5 e 6 devem ser executados. Em todo caso, é muito importante observar que o controle remoto só é desligado após o desligamento do VANT. Isso deve ser feito sempre, pois alguns controles, ao serem desligados, podem mandar um sinal corrompido que pode ser interpretado pelo receptor do VANT como um sinal de acionamento do motor. Caso isso aconteça, será preciso desligar rapidamente a bateria do VANT para evitar acidentes e danos aos equipamentos.

### A.2.2 Integração Horizon<sup>mp</sup>-Matlab

Para implementação e execução de estratégias de navegação mais complexas, inclusive aquelas envolvendo cooperação de VANTs, é preciso ter acesso



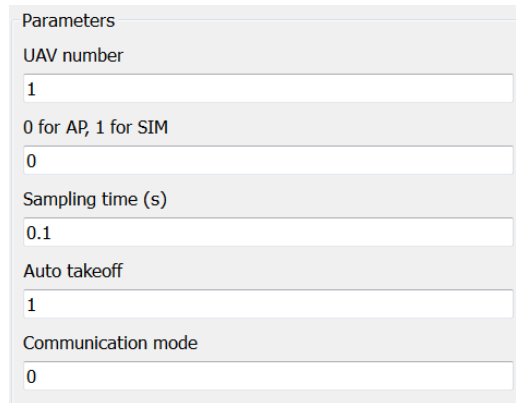
**Figura A.5:** Blocos da *toolbox* para Simulink fornecida pela fabricante do piloto automático.

à comunicação dos VANTs com a estação de solo através do software que estiver executando os algoritmos de controle. Existe uma *toolbox* para Matlab que serve de interface entre estes algoritmos e o software Horizon<sup>mp</sup>. Essa *toolbox* foi fornecida pela própria Micropilot e se chama *Matlab Simulink Interface*. Assim é possível controlar um VANT em experimentos reais ou simulados a partir de algoritmos executados pelo Matlab. Essa *toolbox* foi utilizada para realização de todos os experimentos mostrados no Capítulo 3.

A *toolbox* consiste em um conjunto de blocos que dão acesso a informações de telemetria e a possibilidade de modificar variáveis durante os experimentos. Dentre todos os blocos disponíveis, apenas dois foram utilizados neste texto, *MicroPilot Fields Reader* e *MicroPilot Fields Writer* (Figura A.5).

O bloco *MicroPilot Fields Reader* é usado para obter informações do piloto automático durante o voo. Essas informações podem ser de qualquer tipo, como configurações, ganhos de controladores, variáveis de estado, dados brutos de sensores, etc. A entrada de dados para esse bloco é um vetor com os códigos numéricos de até quinze variáveis desejadas. A saída é também um vetor de até quinze posições, contendo as informações solicitadas. As variáveis obtidas com esse bloco geralmente não estão no sistema internacional de unidades e deve ser convertidas antes do uso.

O bloco *MicroPilot Fields Writer* é usado para fornecer informações e dados para o piloto automático. Nem todas as variáveis que podem ser acessadas com o bloco anterior podem receber dados com a utilização deste bloco,

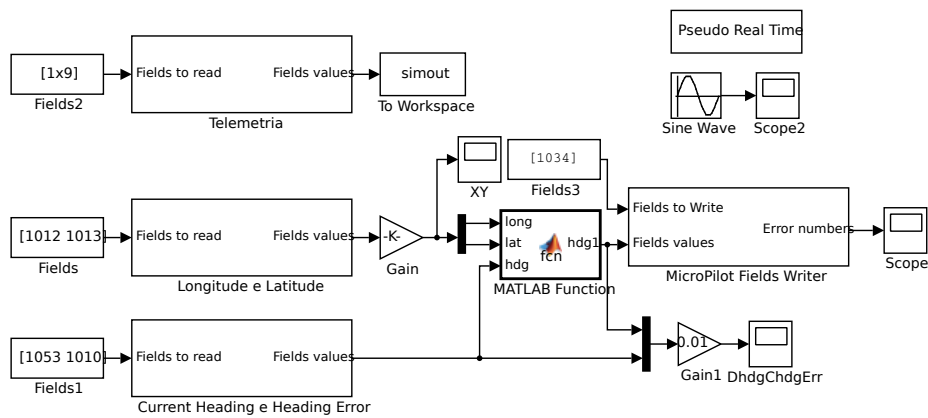


| Parameter           | Value |
|---------------------|-------|
| UAV number          | 1     |
| 0 for AP, 1 for SIM | 0     |
| Sampling time (s)   | 0.1   |
| Auto takeoff        | 1     |
| Communication mode  | 0     |

**Figura A.6:** Janela de configuração dos blocos *MicroPilot Fields Reader* e *MicroPilot Fields Writer*.

por exemplo, variáveis que armazenam valores de sensores. A entrada de dados deste bloco são dois vetores de até quinze posições. No primeiro vetor serão fornecidos os códigos numéricos das variáveis onde se deseja escrever os dados e no segundo, os valores destas variáveis. Novamente, será preciso converter os valores das variáveis para o sistema de unidades utilizado pelo piloto automático.

Os dois blocos tem janelas de configurações iguais (Figura A.6). É possível configurar com qual VANT aquele bloco irá comunicar, através de uma numeração, no campo *UAV number*. O segundo campo, que não tem nome, serve para informar se o bloco irá se comunicar com o Horizon, valor 0, ou se a irá realizar uma simulação no próprio Simulink, valor 1. No caso da comunicação com o Horizon, o bloco não sabe se o software está simulando ou se está se comunicando com um VANT pela porta serial do computador. Portanto é possível utilizar esta *toolbox* tanto em experimentos com VANTs, quanto em simulações realizadas com o Horizon<sup>mp</sup>. O último parâmetro corresponde ao tempo de amostragem que geralmente é maior ou igual a um décimo de segundo. Há ainda dois parâmetros, de configuração que não devem ser modificados.



**Figura A.7:** Modelo criado no Matlab Simulink para os experimentos do Capítulo 3.

A utilização destes blocos é compatível com qualquer outro bloco do Simulink. A associação deles com um bloco capaz de executar uma função programada pelo usuário foi empregada para execução dos algoritmos dos experimentos realizados no Capítulo 3. Dois blocos *MicroPilot Fields Reader* foram utilizados para leitura das variáveis de posição e orientação, para uso pelo algoritmo, e um terceiro para salvar dados de telemetria no *workspace* do Matlab. A razão para utilização de dois blocos para leitura de variáveis é que isso facilita na conversão de unidades, por causa do agrupamento de variáveis do mesmo tipo. Os dados então eram utilizados no algoritmo para cálculo do ângulo de guinada desejado, que em seguida era enviado de volta para o piloto automático, com o uso do bloco *MicroPilot Fields Writer*. O processo se repetia a cada instante de amostragem configurado nos blocos.