

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**VITOR ABREU MARTINS**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
CONTROLE PARA SEGUIMENTO DE LINHAS DE  
TRANSMISSÃO UTILIZANDO UM VANT**

**VITÓRIA, ES  
2015**

VITOR ABREU MARTINS

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE  
CONTROLE PARA SEGUIMENTO DE LINHAS DE  
TRANSMISSÃO UTILIZANDO UM VANT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho

VITÓRIA, ES  
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

- M386i Martins, Vitor Abreu, 1989-  
Implementação de um sistema de controle para segmento de linhas de transmissão de um VANT / Vitor Abreu Martins. – 2015. 61 f. : il.
- Orientador: Mário Sarcinelli Filho.  
Coorientador: Eliete Maria de Oliveira Caldeira.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.
1. Visão por computador. 2. Linhas elétricas aéreas. 3. Robótica aérea. I. Sarcinelli Filho, Mário. II. Caldeira, Eliete Maria de Oliveira, 1971-. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

---

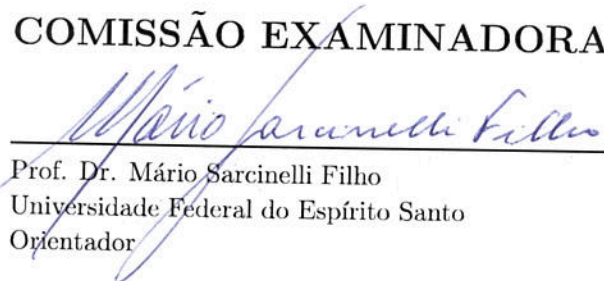
VITOR ABREU MARTINS


IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE  
PARA SEGUIMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
UTILIZANDO UM VANT


Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.


Aprovada em 30 de outubro de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Eliete Maria de Oliveira Caldeira  
Universidade Federal do Espírito Santo

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jorge Leonid Aching Samatelo  
Universidade Federal do Espírito Santo

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alexandre Santos Brandão  
Universidade Federal de Viçosa

*A todos que estiveram do meu lado nesse percurso  
em especial à minha família e amigos.*

## Agradecimentos

Aos meus pais Lauro Murillo Martins e Aparecida Faria de Abreu Martins, que sempre estiveram por perto para me cobrar e motivar a estudar, e por estarem sempre dispostos a me fazer querer dar o melhor de mim mesmo. A minhas irmãs, Ligia Abreu Martins e Laura Abreu Martins, que entre uma discussão besta e outra, estiveram por perto para me ajudar e me apoiar. Aos meus avós, que deram o melhor que tinham para me ver crescer, cada um da sua própria maneira e na época que foi mais preciso, em especial os dois que vão conseguir ler minha tese (mesmo sem entender nada), Luiz Pires Martins e Aéda Faria de Abreu.

A meu orientador, Prof. Dr. Mário Sarcinelli Filho, por me aceitar no grupo de pesquisa e me auxiliar com as dúvidas sobre o projeto, principalmente por motivar a acabar o mestrado logo, mesmo eu não cumprindo essa ordem.

À Profa. Dra. Eliete Maria de Oliveira Caldeira, que foi de grande ajuda em todo o projeto, e por cobrar e auxiliar na pior parte para mim, a escrita da Dissertação.

A meus grandes amigos, em especial Pedro Garcia Birro e Bruno Machado, por me aturarem por tantos anos e por sempre estarem lá quando precisei, independentemente do que fosse. Pelas várias aventuras e rocks juntos, embora alguns deles acabaram atrasando um pouco alguns trabalhos, mas nada que não pudesse ser contornado.

À escola de dança Djavan Ferreira que foi onde eu pude aliviar o stress diário e que sem isso seria muito mais difícil esses anos de mestrado. Agradeço também a todos os membros, professores, colegas bolsistas e alunos, que estiveram do meu lado e que se tornaram grandes amigos.

A Luana Borges Segantine, que foi deixada por último apenas por ordem cronológica, e que mesmo com pouco tempo de namoro foi de suma importância para o final do mestrado, incentivando, cobrando para eu acabar. Obrigado por estar do meu lado esse tempo.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>16</b>
1.1	Vistoria de Linhas de transmissão . . . . .	16
1.2	Robótica Aérea . . . . .	17
1.3	Técnicas Processamento de Imagens . . . . .	18
1.4	Motivação e Objetivos . . . . .	19
1.5	Objetivos Específicos . . . . .	20
1.6	Estrutura da Dissertação . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Visão Computacional</b>	<b>22</b>
2.1	Modelo <i>Pinhole</i> . . . . .	22
2.2	Detecção das Linhas . . . . .	22
2.3	Transformada de Hough . . . . .	25
2.4	Aquisição da Posição e Orientação Relativas do VANT . . . . .	27
2.5	Experimentos com a Transformada de Hough . . . . .	29
2.6	Seleção dos Segmentos de Retas Detectados . . . . .	31
2.7	Teste da Filtragem dos Segmentos de Reta . . . . .	33
2.8	Simulações e experimentos para encontrar a altura do VANT . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Controlador Dinâmico</b>	<b>36</b>
3.1	Caso de um Helicóptero . . . . .	36
3.2	Caso de um Quadrimotor . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Estratégia de Controle Desenvolvida</b>	<b>42</b>
4.1	Seguimento de Linha . . . . .	43
4.2	Posicionamento . . . . .	44
4.3	Ajuste de Guinada . . . . .	45

<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>46</b>
5.1	Simulação Utilizando Helicóptero . . . . .	46
5.2	Simulação Usando Quadrimotor . . . . .	50
5.3	Experimento com o Quadrimotor . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>58</b>



# Lista de Figuras

1.1	Inspeção de linha de transmissão de energia elétrica usando um helicóptero tripulado.	16
1.2	Seis graus de liberdade de um veículo de pás rotativas.	18
1.3	Resultados apresentados em [Li et al., 2010].	19
2.1	Modelo de câmera <i>Pinhole</i> .	23
2.2	Intervalos de ângulos.	23
2.3	Imagem na qual vai ser aplicado o método de Canny.	24
2.4	Resultado do processo de detecção de bordas usando algoritmo de Canny [Gong, ].	25
2.5	Representação dos pontos $(x_i, y_i)$ e $(x_j, y_j)$ nos planos $xy$ e $ab$ [Gonzales e Woods, 2001]	26
2.6	Representação dos pontos $(x_i, y_i)$ e $(x_j, y_j)$ nos planos $xy$ e $\rho\theta$ [Gonzales e Woods, 2001]	27
2.7	Células acumuladores do plano $\rho\theta$ [Gonzales e Woods, 2001].	27
2.8	Relação entre os eixos de coordenadas.	28
2.9	Transformada de Hough no ambiente desenvolvido.	29
2.10	Experimento para detectar os segmentos de reta das imagens capturadas pelo VANT.	30
2.11	Aplicação do filtro sobre os segmentos de reta detectados.	33
2.12	Simulação para calcular a altura através de visão.	34
2.13	Simulação para calcular a altura através de visão.	35
3.1	Modelo de seis graus de liberdade do helicóptero miniatura.	37
4.1	Diagrama de blocos do VANT com o sistema supervisorio desenvolvido.	42
4.2	Fluxograma adotado para o cumprimento da tarefa de seguimento de linhas de transmissão.	43
4.3	Aproximação do VANT à linha a ser seguida.	44
4.4	Dois segmentos de linhas detectados na mesma imagem.	45

5.1	Caminho a ser percorrido pelo helicóptero na simulação. . . . .	47
5.2	Gráficos correspondentes à simulação com o helicóptero. . . . .	48
5.3	Distância horizontal entre o helicóptero e a linha na simulação. . . . .	49
5.4	Caminho a ser percorrido pelo quadrimotor na simulação. . . . .	50
5.5	Gráficos correspondentes à simulação com o quadrimotor. . . . .	52
5.6	Distância horizontal entre o quadrimotor e a linha sendo seguida na simulação. . . . .	53
5.7	Caminho a ser percorrido pelo quadrimotor no experimento. . . . .	54
5.8	Gráficos correspondentes ao experimento com o quadrimotor. . . . .	55
5.9	Distância horizontal entre o quadrimotor e a linha sendo seguida no experimento. . . . .	56

# Lista de Tabelas

- 5.1 Parâmetros do modelo do helicóptero utilizado (os momentos de inércia estão em  $[kgm^2]$ ). 46

# Resumo

Este projeto tem como objetivo desenvolver um supervisor baseado em visão para um veículo aéreo não tripulado (VANT) miniatura, que envia parâmetros para o controlador dinâmico do VANT permitindo que o mesmo consiga acompanhar linhas de transmissão. O caminho a ser seguido pode ser interpretado como uma linha reta que eventualmente muda de direção (em relação ao plano  $xy$  no chão) e de altitude. Os parâmetros de entrada do controlador dinâmico do VANT dependem de qual das três etapas que o supervisor está (dentre as opções “Seguimento de Linha”, “Posicionamento” e “Ajuste de Guinada”) e do posicionamento tridimensional e da orientação do VANT em relação à linha de transmissão. Uma câmera à bordo do robô, apontada para baixo, é utilizada para identificar as linhas de transmissão através de processamento das imagens. As linhas de transmissão são detectadas como segmentos de reta nas imagens. Esses segmentos de reta são utilizados para encontrar o posicionamento tridimensional do VANT em relação à linha de transmissão, bem como para realizar a troca de etapas do supervisor. No projeto é apresentado o processo de visão utilizado e descrito como o VANT é localizado em relação à linha de transmissão. Também são apresentados os modelos dinâmicos dos veículos utilizados, helicóptero e quadrimotor, e os controladores dinâmicos utilizados pelo supervisor. Por fim, são mostrados exemplos de simulações e experimentos, onde os VANTs têm que percorrer um caminho semelhante ao da linha de transmissão. Os VANTs completaram os caminhos propostos, o que valida a estrutura proposta.

# Abstract

This work has as objective to develop a vision-based supervisory system to a miniaturized unmanned aerial vehicle (UAV), which sends parameters to the dynamic controller of the UAV, in order to allow it to follow a transmission line. The path to be followed is a straight line that eventually changes its direction (in terms of the XY plane, located in the ground) and its altitude. The input parameters of the dynamic controller of the UAV depend on the phase the supervisory system is in (the options are “Line Following”, “Positioning” and “Yaw Adjustment”) and on how the UAV is positioned and oriented with respect to the transmission line. A camera onboard the vehicle, pointed downwards, is used to identify the transmission lines through processing the images the UAV acquires. The transmission lines are detected as line segments in the image, which are used to get the 3D position of the UAV with respect to the line and to change the phase of the supervisory system as well. The work presents the visual subsystem and describes how the UAV is located with respect to the line. The dynamic models of the UAVs used, helicopter and quadrotor, and the dynamic controllers used are also presented. Finally, simulated examples and experiments are shown, where the UAV have to follow a path similar to a transmission line. The UAV completed the proposed path, which validate the proposed framework.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Vistoria de Linhas de transmissão

No Brasil, a eletricidade é gerada por hidrelétricas, termelétricas, parques eólicos e usinas nucleares. Para a maioria das plantas geradoras, devido a condições geográficas e de segurança, a energia gerada não é utilizada ou consumida no local de geração. Portanto, há a necessidade do uso de linhas de transmissão para transportar a energia gerada para a carga do consumidor [Rangel et al., 2009]. Atualmente, a inspeção de linhas de transmissão é realizada utilizando helicópteros tripulados voando próximos às linhas, e com um electricista que literalmente caminha sobre a linha de transmissão realizando inspeção visual e térmica, como pode ser visto na Figura 1.1. Portanto, esta é uma tarefa de alta periculosidade e bastante custosa [Lima II et al., ]. Como resultado, as empresas responsáveis pela transmissão de energia não monitoram continuamente as condições dos cabos e realizam inspeções de linhas de transmissão a grandes intervalos de tempo, 12 meses [ANEEL, ].

Uma alternativa para realizar a inspeção das linhas é utilizar veículos terrestres. Porém, esta é uma



Figura 1.1: Inspeção de linha de transmissão de energia elétrica usando um helicóptero tripulado.

solução limitada, em termos do que se pode inspecionar, e muitas vezes não pode ser utilizada, pois grande parte das linhas de transmissão está localizada em áreas de difícil acesso por terra. Em [Lima II et al., ] é proposta a utilização de um robô móvel que vai trabalhar sob a linha de transmissão, preso a ela por um conjunto de garras. O robô tem a forma semelhante à de uma lagarta, possuindo dois motores que aproximam a parte traseira da parte frontal, formando um U para superar possíveis obstáculos presentes na linha de transmissão (isoladores, por exemplo). Ainda em [Lima II et al., ], ensaios experimentais foram executados no voo em um ambiente montado em laboratório, e o robô conseguiu com sucesso transpor os obstáculos e realizar as medições da linha.

Uma opção recente é a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para realizar a inspeção, pois tais veículos podem voar relativamente próximos às linhas de transmissão sem risco para qualquer operador humano, provendo um método mais barato, mais flexível e sem risco de coletar os dados da linha, comparado com o atual [Rangel et al., 2009], além do fato dos VANTs serem mais rápidos que robôs que caminham sobre a linha [Lima II et al., ].

Em [Rangel et al., 2009] a inspeção da linha é realizada através de um avião miniatura não tripulado. O controle do VANT é realizado por um piloto embarcado que contém as rotas previamente estabelecidas por um sensor GPS. Também é proposta a utilização de uma estação em solo equipada com *laptop*, dispositivos que fornecem vídeo em tempo real, telemetria, placas de interface, controle de voo (*Joystick*) e dispositivos de visualização, os quais ficam acessíveis a um piloto para monitorar o VANT durante o trajeto. No final do projeto é realizado um experimento onde três pontos específicos são marcados por GPS, o piloto humano é responsável pela decolagem e pelo pouso da aeronave. Durante todo o percurso os dados sensoriais são enviados para a estação em solo para serem analisados.

Nessa dissertação é proposto solucionar o problema de inspeção de linhas transmissão utilizando um VANT dotado de uma câmera apontada para baixo. A solução proposta não requer o conhecimento prévio da localização das linhas de transmissão, ao contrário de [Rangel et al., 2009]. A linha é detectada ao longo da execução da tarefa de inspeção, permitindo assim posicionar o VANT em relação à ela.

## 1.2 Robótica Aérea

Os VANTs são divididos em dois grandes grupos: mais pesados que o ar e mais leves que o ar. O grupo dos mais pesados que o ar pode ser dividido em duas famílias, os VANTs de pás rotativas (helicópteros e multimotores) e os de asas fixas (aviões e planadores). Os veículos de pás rotativas apresentam como principal vantagem sobre os de asas fixas a mobilidade tridimensional, uma vez que conseguem decolar, planar e aterrissar sem a necessidade de movimentação longitudinal, além de poderem ser utilizados em ambientes de pequenas dimensões [Tournier et al., 2006], o que tem motivado seu uso em um número crescente de aplicações.

A manobrabilidade tridimensional dos veículos de asas rotativas pode ser vista na Figura 1.2, utilizando um helicóptero como exemplo. As suas variáveis de posição  $\xi_h$  e orientação  $\eta_h$  com relação a seu próprio sistema de referência também são mostradas na mesma figura, sendo que  $\xi_h = [x_h \ y_h \ z_h]^T \in \mathbb{R}^3$  representa os deslocamentos longitudinal, lateral e normal da aeronave, e  $\eta_h = [\phi_h \ \theta_h \ \psi_h]^T \in \mathbb{R}^3$  corresponde aos ângulos de rolagem, arfagem e guinada. O ângulo de guinada define a orientação do veículo, enquanto os ângulos de arfagem e de rolagem são responsáveis pelos movimentos frontais e laterais, respectivamente.

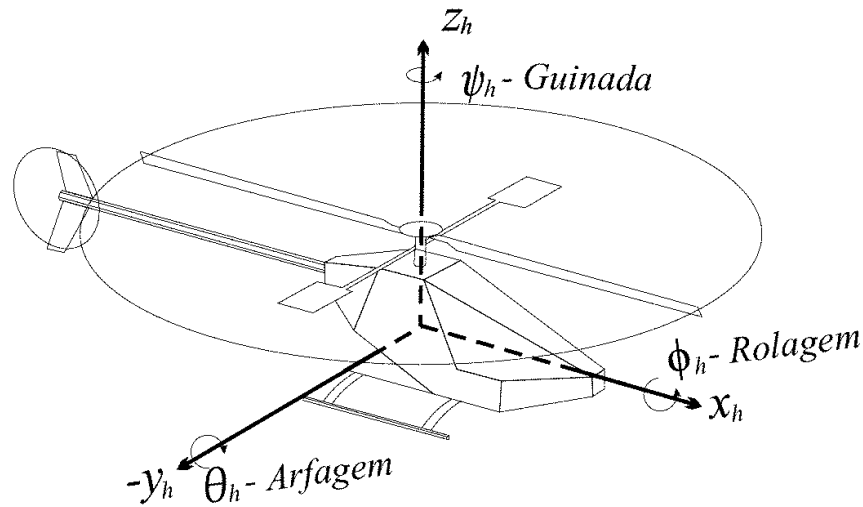


Figura 1.2: Seis graus de liberdade de um veículo de pás rotativas.

Devido às vantagens de utilizar os VANTs em tarefas de inspeção de grandes áreas ou regiões hostis, nas últimas décadas eles têm sido amplamente utilizados em diversas aplicações, tanto militares quanto civis. Exemplos dessas aplicações são agricultura de precisão, gerenciamento de riscos naturais, fotografia de grandes eventos e missões táticas em campos de combate, inspeção de linhas de transmissão, dentre tantas outras [Kendoul et al., 2010, Duan e Liu, 2010, Hsieh et al., 2007].

### 1.3 Técnicas Processamento de Imagens

O uso de técnicas de processamento de imagens é uma poderosa ferramenta na detecção de pontos, padrões ou caminhos, e está sendo empregada em várias estratégias de controle de robôs. Em [Cambron e Northrup, 2006] um braço robótico é calibrado e controlado com o auxílio de uma câmera fixa, usando redes neurais para converter as posições dos objetos para as coordenadas do robô. A associação de redes neurais com visão computacional para o controle de um braço robótico também é utilizada em [Zhao et al., 2006], agora para realizar o rastreamento de curvas.

Robôs aéreos também usufruem das vantagens da utilização de processamento de imagens, como em [Bourquardez et al., 2009], onde é utilizada projeção perspectiva das imagens de uma câmera a bordo do quadrimotor, apontada para baixo, para localizar o mesmo em relação a um padrão no chão, e, então, fazer o controle de posicionamento. Já em [Brandao et al., 2013] é proposta uma solução semelhante para obter o posicionamento e a orientação do veículo, porém é utilizado um controlador não-linear subatuado. Ali são utilizadas simulações para comprovar a efetividade do sistema de visão e do controlador proposto.

Os trabalhos citados foram realizados em ambientes controlados. Porém, em certas aplicações o robô precisa navegar por ambientes não controlados, o que torna a navegação autônoma para ambientes externos não estruturados um importante problema a ser pesquisado. A habilidade de reconhecer o ambiente navegável e desviar de obstáculos é uma componente crítica para navegação autônoma [Blas et al., 2008]. No mesmo artigo tal problema de reconhecimento do ambiente não é possível de ser resolvido apenas utilizando a cor da imagem. Então os autores utilizam um algoritmo que combina



cor e textura para resolvê-lo.

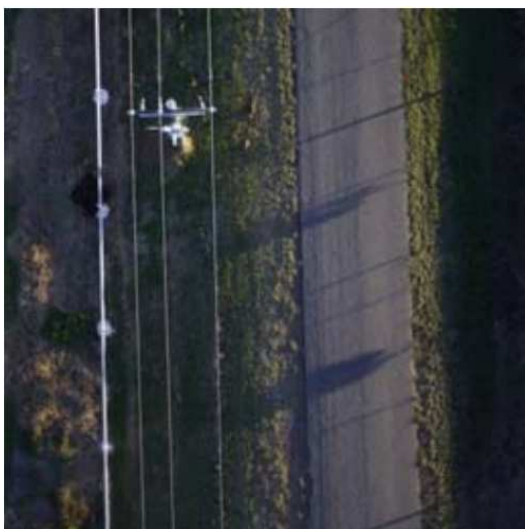
Em [Li et al., 2010] é proposto realizar a detecção de linhas de transmissão utilizando *Pulse-Coupled Neural Network* para separar linhas do fundo, seguido da transformada de Hough para detectar linhas. Entretanto, os autores também se utilizam do conhecimento prévio do padrão que as linhas de transmissão seguem, para diferenciá-las de outras linhas eventualmente detectadas nas imagens. Resultados são mostrados para validar o trabalho proposto, e são mostrados na Figura 1.3.

Em [Golightly e Jones, 2005] é proposta a utilização de um VANT para a inspeção de linhas de transmissão. A localização do VANT em relação às linhas de transmissão é obtida através de imagens capturadas por uma câmera sob o VANT. Para a detecção das linhas de transmissão na imagem é utilizada a transformada de Hough. Também é proposta a utilização de um módulo de GPS diferencial *Differential Global Positioning System* para suprir informação caso o VANT não identifique as linhas na imagem.

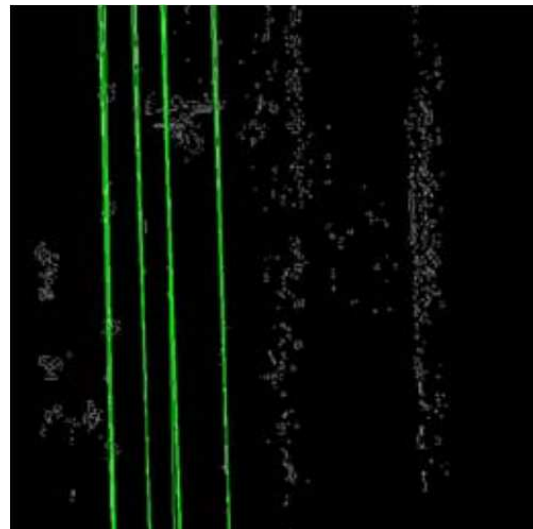
Nesse contexto, esta Dissertação apresenta uma proposta de solução para a tarefa de inspeção de linhas de transmissão, que é semelhante à apresentada em [Golightly e Jones, 2005], ou seja, utilizando uma câmera apontada para baixo embarcada em um VANT, para, através da transformada de Hough, determinar a localização do VANT em relação à linha. Mas tem como diferencial o desenvolvimento de um sistema supervisor que permite ao VANT corrigir sua orientação para as situações nas quais a linha de transmissão altera a sua direção (em postes ou torres de transmissão).

## 1.4 Motivação e Objetivos

Desde 2008 a UFES - Universidade Federal do Espírito Santo, realiza trabalhos com foco em VANTs, no seu Laboratório de Automação Inteligente (LAI). Inicialmente, os trabalhos foram realizados utilizando-se um helicóptero miniatura, com o desenvolvimento de um modelo dinâmico de corpo rígido para a aeronave, utilizando as equações de Euler-Lagrange, resultando em um modelo não-linear subatuado, e de um controlador também não-linear, utilizando a dinâmica inversa para realizar



(a) Imagem original utilizada em [Li et al., 2010].



(b) Linhas detectadas em [Li et al., 2010].

Figura 1.3: Resultados apresentados em [Li et al., 2010].

o controle de helicóptero [Brandao, 2013]. Em seguida um quadrimotor foi adquirido e foi desenvolvido um controlador não-linear de dinâmica inversa para seguimento de caminho ou posicionamento para o quadrimotor [Vago Santana et al., 2014]. A motivação inicial dessa Dissertação foi a utilização dos modelos e controladores já desenvolvidos na Universidade para alguma aplicação mais específica.

A segunda motivação é o problema já citado de vistoria de linhas de transmissão. Embora já existam pesquisas sendo realizadas, elas requerem informações não existentes ou com baixa precisão (localização dos postes de transmissão) ou velocidade baixa. Para solucionar esse problema, nesta Dissertação será desenvolvido um subsistema supervisor que envia os parâmetros adequados para controladores dinâmicos de um VANT. O objetivo do subsistema supervisor é fazer que o VANT siga a linha de transmissão, mantendo o mesmo alinhamento que a linha, a uma velocidade constante e a uma altura fixa em relação à linha. Caso a linha de transmissão troque de orientação, o que pode acontecer após um poste, o VANT deve parar sobre o ponto de encontro e ajustar a sua orientação, para que coincida com a orientação do próximo segmento de linha, para poder seguir tal novo segmento. O subsistema supervisor utiliza imagens provenientes de uma câmera sob o VANT, apontada para baixo, para determinar o posicionamento tridimensional do VANT em relação à linha de transmissão e para detectar os pontos onde a linha de transmissão troca de orientação, não sendo necessário, assim, qualquer informação prévia da localização das linhas de transmissão e dos postes (a não ser para a equipe de inspeção definir onde o VANT iniciará a tarefa de inspeção).

## 1.5 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. estudo de método para realizar detecção de linhas em uma imagem
2. estudo do modelo da câmera
3. estudo do modelo e dos controladores dinâmicos de helicópteros e quadrimotores
4. projeto do subsistema supervisor para realizar o seguimento de linhas de transmissão
5. realizar testes para validar o subsistema supervisor

## 1.6 Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação está estruturada da seguinte forma:

No Capítulo 2 é explicado todo o processamento de imagens que foi utilizado para obtenção da localização do VANT em relação à linha de transmissão a ser percorrida. Primeiramente é descrito o modelo de câmera utilizado, e em seguida é explicado como é realizada a detecção das linhas de transmissão na imagem. Por fim, são mostrados resultados de simulações e experimentos para validar o método de detecção das linhas escolhido.

No Capítulo 3 são apresentados os modelos e controladores dinâmicos utilizados para o VANT.

No Capítulo 4 é explicada a estratégia de controle proposta para o seguimento das linhas de transmissão.

---

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos resultados de simulação com o helicóptero e com o quadrimotor, e de experimentos com o quadrimotor.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas algumas conclusões, assim como são citados alguns pontos que poderiam ser alterados e algumas opções e sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Visão Computacional

Nesse projeto, serão utilizadas imagens de uma câmera embarcada para auxiliar na localização e orientação do helicóptero em relação às linhas de transmissão. Tais imagens podem também ser utilizadas na vistoria das linhas, encontrando possíveis falhas. As próximas seções desse capítulo irão explicar detalhadamente o modelo de câmera utilizado, o formato da imagem gerada pela câmera, e como as linhas são separadas do plano de fundo e encontradas nas imagens. Além disso, também será explicado como são encontradas a orientação e a posição do veículo em relação à linha. Por fim foram realizados simulações e experimentos para validar os processos de detecção das linhas e a localização do VANT em relação às mesmas.

### 2.1 Modelo *Pinhole*

Nesse projeto é utilizado o modelo mais especializado e mais simples de câmera, o modelo *Pinhole*. No modelo de câmera *Pinhole* é considerada a projeção central dos pontos do espaço em um plano, sendo o centro da projeção a origem das coordenadas Euclidianas, e o plano da imagem (ou plano focal) o plano  $Z = f$ , onde  $f$  é a distância focal da câmera. Pelo modelo *Pinhole*, um ponto  $\mathbf{X}$  do espaço tridimensional, com coordenadas  $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^\top$ , é mapeado no plano da imagem no ponto onde a linha que liga o ponto  $\mathbf{X}$  ao centro de projeção encontra o plano da imagem, como mostrado na Figura 2.1a. Por semelhança de triângulos é deduzido que as coordenadas do ponto  $\mathbf{x}$ , projeção do ponto  $P$  no plano da imagem, são dadas pela equação

$$\mathbf{x} = (x, y)^\top = (fX/Z, fY/Z)^\top \quad (2.1)$$

assim como visto na Figura 2.1b [Hartley e Zisserman, 2003]. A Equação 2.1 relaciona as coordenadas, em metros, de  $\mathbf{X}$ , com as coordenadas, em pixel, de  $\mathbf{x}$ , e será utilizada para encontrar a localização do VANT em relação à linha. As aplicações do modelo *Pinhole*, em especial da Equação 2.1, serão explicadas com maiores detalhes na Seção 2.4 desse capítulo.

### 2.2 Detecção das Linhas

Para realizar a detecção de linhas de transmissão na imagem é preciso um algoritmo de detecção de linhas na imagem. Existem diversos algoritmos capazes de realizar esta tarefa usando as derivadas

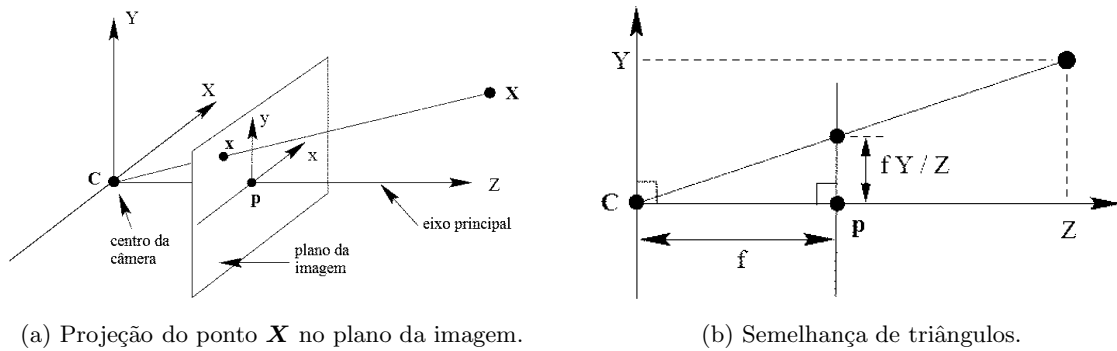


Figura 2.1: Modelo de câmara *Pinhole*.

do brilho da imagem (como o algoritmo de Soebel e o algoritmo de Canny), assim como outros que trabalham no domínio da frequência e se baseiam em *zero-crossings* na imagem transformada. Neste projeto escolheu-se utilizar o detector de bordas de Canny [Canny, 1986].

O primeiro passo do detector de bordas de Canny é suavizar a imagem, aplicando um filtro gaussiano. O filtro gaussiano é um filtro passa-baixas e é utilizado na imagem para eliminar os possíveis ruídos existentes. Como a maioria dos métodos de detecção de bordas é sensível a ruídos, é usual utilizar o filtro gaussiano antes de aplicar um método de detecção de bordas.

Em seguida é calculado o gradiente da imagem em cada pixel. O gradiente representa a taxa de variação da intensidade dos pixels na imagem, e é composto por uma magnitude ( $M(x, y)$ ), que é o valor da variação, e um ângulo ( $\alpha(x, y)$ ), que é a direção da variação. A direção da borda é ortogonal ao ângulo do gradiente. O cálculo do gradiente também é comumente encontrado em métodos de detecção de bordas, mas permite a existência de cristas largas em máximos locais. No terceiro passo do método é utilizada a supressão dos não máximos na imagem da magnitude do gradiente, para afinar as cristas largas. Nesse passo a orientação da borda é especificada por um número de orientações discretas. Por exemplo, no caso de uma região  $3 \times 3$  a orientação é limitada para quatro orientações discretas (horizontal,  $-45^\circ$ , vertical e  $+45^\circ$ ), conforme se pode ver na Figura 2.2. Ainda no terceiro passo, é encontrada a orientação discreta que está mais próxima de  $\alpha(x, y)$ . Se o valor de  $M(x, y)$  for inferior a algum dos pontos existentes nessa orientação, ele não é um ponto máximo, e é suprimido. Caso contrário, ele é mantido.

O último passo é a eliminação das bordas falsas, que é feita comparando-se os máximos obtidos no

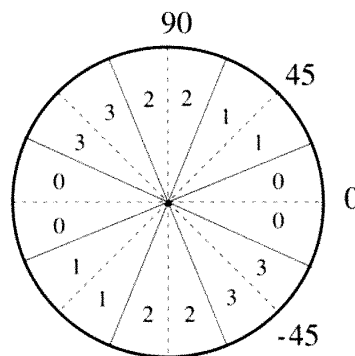


Figura 2.2: Intervalos de ângulos.

passo anterior com um limiar. Se o limiar for excedido, o pixel correspondente na imagem pertence a uma borda. É possível utilizar apenas um limiar, mas se ele for muito baixo, bordas falsas terão grande probabilidade de serem detectadas. Ao contrário, se o limiar for muito alto as bordas verdadeiras poderão ser suprimidas. No algoritmo de Canny, esse problema é resolvido utilizando a limiarização por histerese, ou seja, utilizam-se dois limiares, um baixo e um alto. Os dois limiares são utilizados da seguinte forma: primeiro é aplicado o limiar alto para eliminar todas as bordas falsas, e assim todas as bordas detectadas são tidas como bordas verdadeiras. Porém, por ser um limiar elevado, bordas comumente apresentarão falhas. Para preencher as falhas das bordas detectadas são utilizados os pontos que passarem pelo limiar baixo. Na prática, a limiarização por histerese é aplicada diretamente durante a supressão não máxima.

Resumindo, o detector de Canny é dividido em quatro etapas: suavizar a imagem com filtro gaussiano, calcular o gradiente da imagem, aplicar a supressão não máxima na imagem da magnitude do gradiente e usar a dupla limiarização. O resultado de cada uma das quatro etapas do método de Canny aplicados na imagem da Figura 2.3 pode ser visto na Figura 2.4. Após a primeira etapa, aplicar o filtro gaussiano (ver Figura 2.4a), a imagem fica mais suave e o ruído presente é reduzido. Na segunda etapa, aplicação do gradiente (ver Figura 2.4b), é possível perceber a detecção das bordas, mas ainda existem pontos na imagem resultante que não pertencem às bordas, e as bordas presentes, em sua maioria, são grossas. Na terceira etapa, supressão de não máximos (ver Figura 2.4c), as bordas têm apenas um pixel de largura, e embora grande parte dos pixels que não constituem bordas tenham sido eliminados, ainda estão presentes algumas bordas falsas. Por fim, no resultado final, após a limiarização por histerese com limiar duplo (ver Figura 2.4d), todos os pontos que sobraram pertencem a bordas da imagem.



Figura 2.3: Imagem na qual vai ser aplicado o método de Canny.



(a) Imagem após a aplicação do filtro gaussiano.



(b) Imagem após a aplicação do gradiente.



(c) Imagem após a aplicação da supressão de não máximos.



(d) Imagem após a aplicação da dupla limiarização.

Figura 2.4: Resultado do processo de detecção de bordas usando algoritmo de Canny [Gong, ].

### 2.3 Transformada de Hough

Numa imagem capturada pelo VANT a linha de transmissão se apresenta como vários conjuntos de segmentos de linhas, em que as linhas se aproximam ou se afastam, dependendo da diferença de altitude, segmentos de linha esses conectados em pontos específicos. Em outras palavras, uma linha de transmissão de energia elétrica pode ser entendida como um conjunto de caminhos retos, constituindo um caminho linear por partes, onde cada linha do conjunto pode aparecer mais próxima ou mais distante das outras, dependendo da altitude relativa. Com o método de Canny é possível detectar as bordas da imagem, e com isso, separar as linhas de transmissão do plano de fundo. Porém, o método de Canny não detecta apenas linhas, mas sim qualquer tipo de borda, podendo, assim, detectar outros pixels que não pertençam às linhas de transmissão. Para realizar a detecção das linhas de transmissão nas imagens resultantes do método de Canny, a transformada de Hough foi escolhida, por ser um

método efetivo para detecção de linhas retas em uma imagem, sendo muito utilizado na literatura, quando se trata de detectar linhas em imagens [Golightly e Jones, 2005, Li et al., 2010].

Conforme descrito em [Gonzales e Woods, 2001], para um ponto  $(x_i, y_i)$  no plano  $xy$  a equação das várias retas que passam por ele na forma inclinação-interseção é dada por  $(y_i = ax_i + b)$ , sendo que cada reta possui o seu respectivo valor de  $a$  e  $b$ . Entretanto, ao escrever a equação no plano  $ab$  (espaço de parâmetros),  $b = -ax_i + y_i$ , resulta em uma equação de uma única reta para o par fixo  $(x_i, y_i)$ . Um segundo ponto  $(x_j, y_j)$  também pode ser representado por uma reta no espaço de parâmetros, e caso não sejam paralelas, elas se cruzam em um ponto  $(a', b')$ , onde  $a'$  é a inclinação e  $b'$  a interseção da reta que passa tanto por  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  no plano  $xy$ , assim como é representado na Figura 2.5. Na verdade, todos os pontos pertencentes à reta do plano  $xy$  que passa por  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  se cruzam em  $(a', b')$  no espaço de parâmetros.

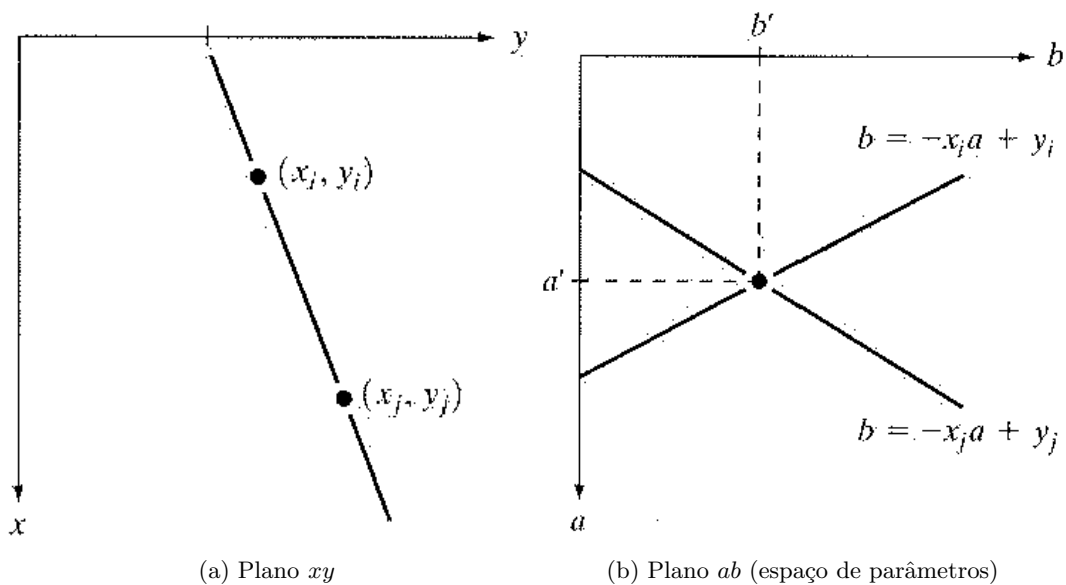


Figura 2.5: Representação dos pontos  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  nos planos  $xy$  e  $ab$  [Gonzales e Woods, 2001]

A representação no plano  $ab$  se torna difícil quando a reta se aproxima de uma reta vertical, uma vez que nesse caso o parâmetro  $a$  seria muito grande, se aproximando do infinito. Para contornar tal problema a reta é representada pela equação parametrizada

$$\rho = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (2.2)$$

sendo  $\rho$  a distância da reta para a origem do sistema de coordenadas e  $\theta$  a inclinação da reta, como visto na Figura 2.6a. A reta do plano  $ab$  passa a ser representada por senoides, assim como ilustrado na Figura 2.6b. Assim como no plano  $ab$ , quando duas senoides se interceptam no plano  $\rho\theta$ , o ponto de encontro corresponde a uma reta que passa por ambos os pontos, definida pelos coeficientes  $\rho$  e  $\theta$ . Os pontos de encontro com maior quantidade de senoides possuem os parâmetros  $\rho$  e  $\theta$  que têm maior probabilidade de existir uma reta na imagem. Logo, são escolhidos como sendo as retas da imagem original.

O processo descrito, de utilizar o espaço de parâmetros para representar as linhas, é geralmente referido como transformada de Hough. A vantagem computacional da transformada de Hough é que se pode subdividir o espaço de parâmetros  $\rho\theta$  em células acumuladoras, como mostrado na Figura 2.7,



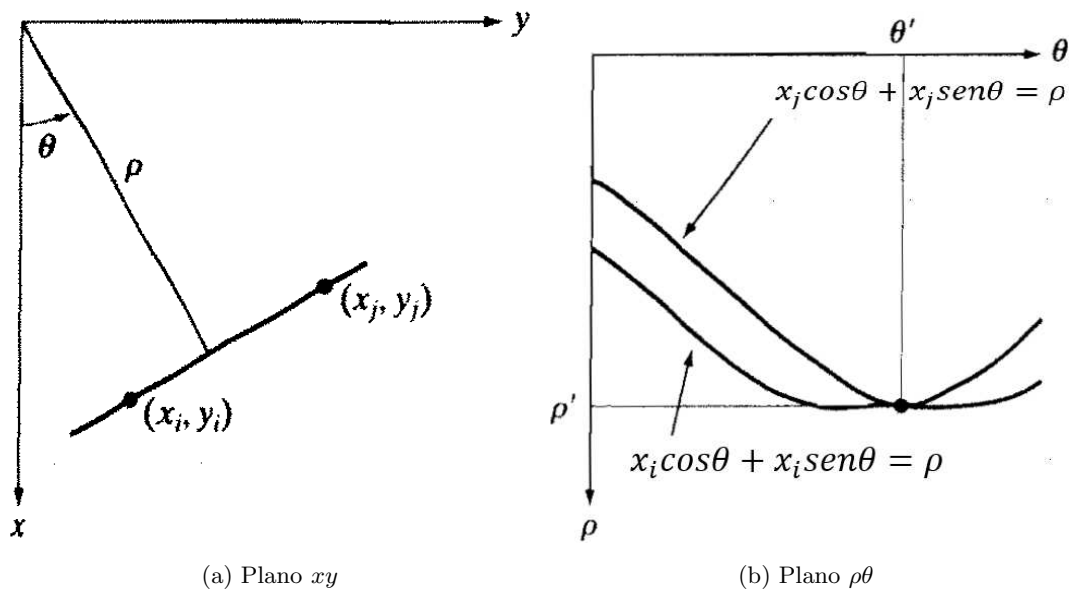


Figura 2.6: Representação dos pontos  $(x_i, y_i)$  e  $(x_j, y_j)$  nos planos  $xy$  e  $\rho\theta$  [Gonzales e Woods, 2001]

sendo que  $(\rho_{min}, \rho_{max})$  e  $(\theta_{min}, \theta_{max})$  são os intervalos esperados de parâmetros:  $-D > \rho > D$  e  $-90^\circ > \theta > 90^\circ$ , onde  $D$  é a distância máxima entre os cantos opostos da imagem. Quanto maior a quantidade de subdivisões no plano  $\rho\theta$ , maior a precisão da colinearidade desses pontos. Porém o processo se torna mais lento. Resultados de simulações e experimentos com a transformada de Hough são mostrados na Seção 2.5.

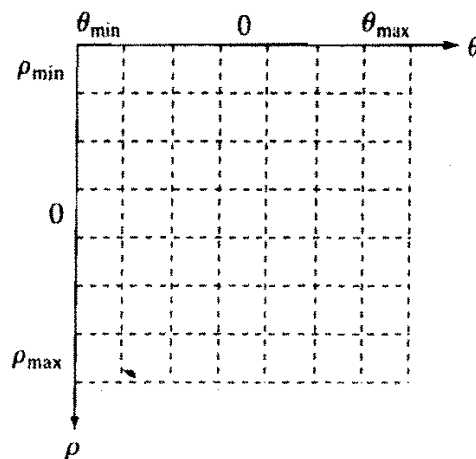


Figura 2.7: Células acumuladores do plano  $\rho\theta$  [Gonzales e Woods, 2001].

## 2.4 Aquisição da Posição e Orientação Relativas do VANT

Com as linhas corretamente representadas por segmentos de reta é possível encontrar a orientação e a posição do VANT em relação à linha a ser seguida. Na imagem capturada pela câmera o VANT se encontra no ponto central com o seu eixo  $x$  alinhado com o eixo  $y$  da imagem. Como uma linha de transmissão é formada por mais de um segmento de reta, primeiramente foi encontrada a linha média,



(a) Eixos de coordenadas.

(b) Foto capturada por uma câmera instalada embaixo do VANT.

Figura 2.8: Relação entre os eixos de coordenadas.

que é a linha que vai ser seguida pelo VANT. Para o cálculo da linha média é feita a média aritmética dos pontos dos outros segmentos de reta detectados.

Para encontrar a orientação do VANT em relação à linha de transmissão foi analisada a relação entre o eixo de coordenadas da câmera, o eixo de coordenadas do helicóptero e o eixo de coordenadas no referencial da linha de transmissão, todos mostrados na Figura 2.8. O eixo de coordenadas do helicóptero, em vermelho, está rotacionado do eixo da linha de transmissão, em azul, de um ângulo  $\alpha$ , sendo o ângulo  $\alpha$  o ângulo de guinada do helicóptero em relação à linha de transmissão. Já o eixo de coordenadas da câmera é o eixo do helicóptero rotacionado  $90^\circ$  à direita, pois o eixo  $Y$  da câmera coincide com o eixo  $X$  do helicóptero. Como a imagem da câmera está no eixo de coordenadas da própria câmera, pode-se encontrar o ângulo  $\alpha$  pela equação

$$\alpha = 90^\circ - \alpha_C \quad (2.3)$$

onde  $\alpha_C$  é o ângulo da linha na imagem (ver Figura 2.8b).

Pela imagem é encontrada a posição, em pixels, do VANT em relação à linha, calculando a distância do segmento de reta médio ao centro da imagem. Porém, para realizar o controle do VANT é preciso conhecer sua posição em relação à linha a ser seguida em coordenadas métricas. Assim como já havia sido dito, a Equação 2.1 relaciona as coordenadas em metros com as coordenadas em pixels. Porém tem-se apenas duas equações e três incógnitas, impossibilitando a aplicação direta da equação para encontrar a distância do VANT à linha.

Utilizando-se a distância em metros de uma linha à outra, que é um valor constante e conhecido, é possível encontrar a altura do robô relativa às linhas através da equação

$$Z = \frac{f \Delta D_L}{\Delta d_L} \quad (2.4)$$

onde  $D_L$  é a distância, em metros, entre as linhas de transmissão, e  $d_L$  é a distância em pixels entre os segmentos de reta detectados. Essa é uma equação aproximada, válida para quando as imagens são tiradas horizontalmente no meio das linhas e a câmera está virada diretamente para as linhas (ângulos de arfagem e de rolagem iguais a zero). Como o VANT vai operar em baixas velocidades e

nessa situação os ângulos de arfagem e de rolagem são pequenos, os ângulos vão ser assumidos como nulos, sendo possível utilizar a Equação 2.4. Com a coordenada  $Z$  calculada, a Equação 2.1 passa a ter duas equações para duas incógnitas e pode ser utilizada para encontrar a posição, em metros, do VANT em relação à linha.

## 2.5 Experimentos com a Transformada de Hough

Para verificar o funcionamento da transformada de Hough para a realização da tarefa de detecção das linhas de transmissão em uma imagem, foram realizadas simulações em um ambiente desenvolvido em Matlab<sup>®</sup> que simula uma câmera sob um veículo aéreo sobrevoando linhas de transmissão. Na simulação as linhas de transmissão foram representadas por dois segmentos de reta paralelos, e para a câmera foi utilizado o modelo *Pinhole* ideal, com foco de 10 *cm*. As imagens capturadas pela câmera foram salvas, e foi aplicado Canny e a transformada de Hough. As funções de Canny e de Hough utilizadas foram as já presente no Matlab<sup>®</sup>. O resultado da simulação pode ser verificado na Figura 2.9, onde a Figura 2.9a mostra uma imagem original capturada pela câmera simulada e a Figura 2.9b mostra o resultado do processo de detecção de linhas. Nela os segmentos de reta detectados pela transformada de Hough são superpostos à imagem original.

No resultado da simulação os segmentos de reta verdes são os segmentos de reta detectados pela transformada de Hough, os segmentos de reta vermelhos são os segmentos de reta médios, o  $x$  amarelo indica o início dos segmentos de reta e o  $x$  vermelho indica o fim dos segmentos de reta. Nas simulações a transformada de Hough conseguiu detectar com sucesso os segmentos de reta nas imagens que representavam as linhas de transmissão, detectando todas as linhas da imagem.

Em seguida foram realizados experimentos utilizando o quadrimotor AR.drone 2.0 do Laboratório de Automação Inteligente - LAI, da UFES. O AR.drone 2.0 já vem com uma câmera apontada para baixo, que foi utilizada no experimento. A câmera gera imagens coloridas, com resolução de  $320 \times 240$  pixels, a uma taxa de 60 *fps* (*frames* por segundo). As imagens são enviadas para um computador em terra via rede *Wi-fi*, a uma taxa de 30 *fps*, tendo a resolução ajustada para  $640 \times 360$ . Neste experimento, as imagens são salvas em forma de vídeos, para serem analisadas posteriormente, mas

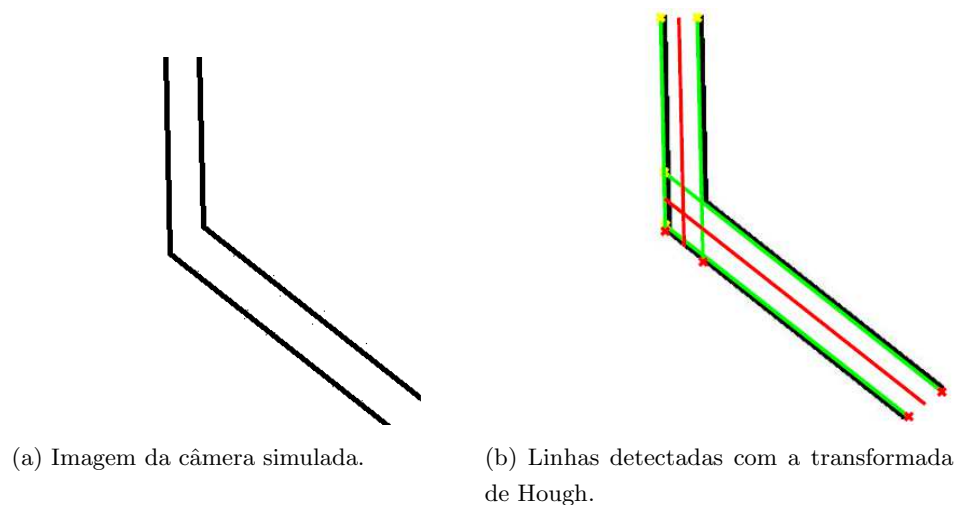


Figura 2.9: Transformada de Hough no ambiente desenvolvido.

o processamento também pode ser realizado durante o voo. Em cada *frame* do vídeo os métodos para detectar as linhas descritos anteriormente (detecção de bordas de Canny e transformada de Hough) foram aplicados utilizando as funções já presentes na biblioteca OpenCV. Nesse experimento o AR.drone 2.0 teve que voar com alturas e orientações variadas sobre linhas de formato variado, desenhadas no chão utilizando fitas de papel. As bordas das fitas de papel, no caso, representam as linhas a serem detectadas. Alguns exemplos dos resultados obtidos podem ser vistos na Figuras 2.10.

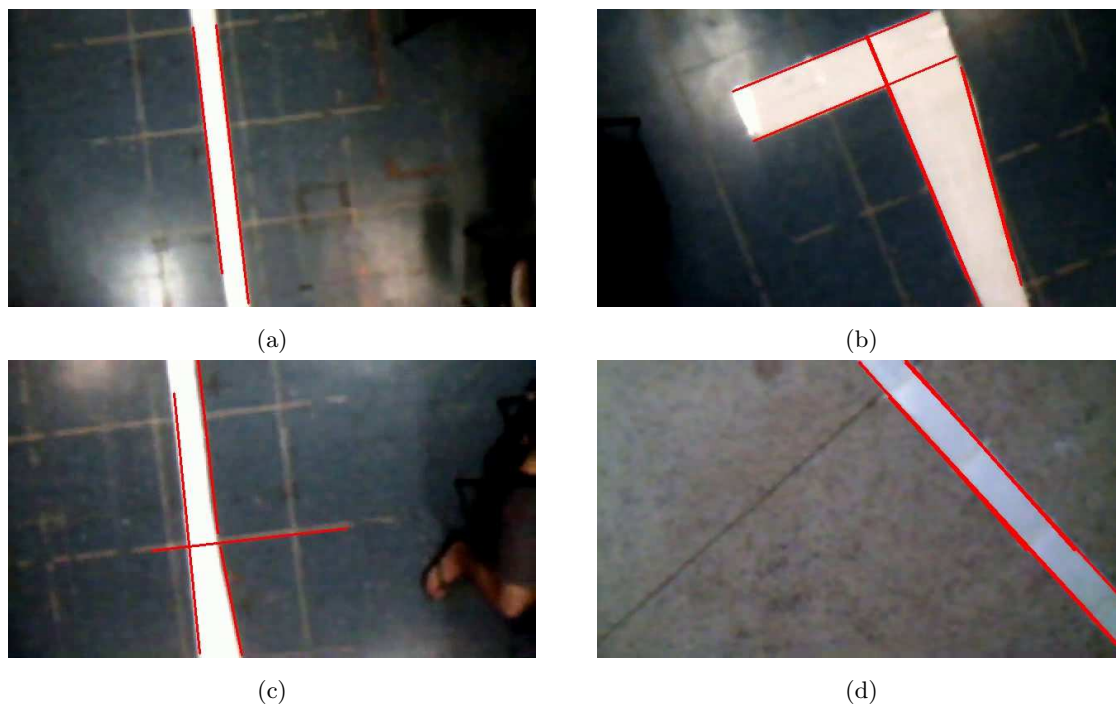


Figura 2.10: Experimento para detectar os segmentos de reta das imagens capturadas pelo VANT.

Na Figura 2.10a as linhas a serem detectadas eram formadas por apenas dois segmentos de reta paralelas, e o resultado obtido foi a detecção destes dois segmentos de reta que pertenciam à linha. Já na Figura 2.10b as linhas a serem detectadas sofriam uma troca de inclinação de  $90^\circ$  entre elas. Além disso, os segmentos de reta que tinham seu ângulo próximo de  $90^\circ$  não eram paralelas entre si, representando uma possível variação de altitude das linhas de transmissão. Novamente todas as linhas foram detectadas, e nenhum segmento de reta que não pertencesse às linhas de transmissão foi detectado, mas uma mesma linha foi representada por mais de um segmento de reta. Na figura seguinte, 2.10c, as linhas a serem detectadas tinham uma parte paralela, mas após certo ponto elas se afastavam, novamente representando uma diferença de altitude nas linhas de transmissão. Como resultado, uma das linhas foi detectada corretamente, com apenas um segmento de reta representando aquela linha, enquanto outra linha foi detectada como dois segmentos de reta. Além disso, nessa imagem uma reta que não pertencia às linhas de transmissão também foi detectada. Por fim, na Figura 2.10d as linhas a serem detectadas se assemelhavam com a primeira imagem, 2.10a, porém o experimento foi realizado em um piso de textura diferente. Mesmo com essa troca de textura de piso as linhas foram detectadas, mas uma das linhas foi detectada como mais de um segmento de reta.

Como resultado final, em todas as imagens as linhas foram encontradas corretamente, porém em algumas delas também foram detectados segmentos de reta que não pertencem às linhas de transmissão, como na Figura 2.10c, ou mais de um segmento de reta foi detectada para a mesma linha de transmissão, como nas Figuras 2.10b, 2.10c e 2.10d. Para solucionar essas detecções erradas foi

desenvolvido um classificador que seleciona segmentos de reta que pertençam às linhas de transmissão utilizando o padrão das linhas de transmissão.

## 2.6 Seleção dos Segmentos de Retas Detectados

Como nesse trabalho a aquisição de imagens é realizada em ambiente não estruturado, alguns erros podem ocorrer na detecção das retas pertencentes às linhas de transmissão, assim como mostrado na Figura 2.10. Sendo o padrão das linhas de transmissão conhecido, é possível criar um classificador que analise os segmentos de reta encontrados pela transformada de Hough e que retorne apenas um segmento de reta para cada linha de transmissão da imagem, semelhante ao trabalho apresentado em [Li et al., 2010]. O padrão das linhas de transmissão é que elas aparecem nas imagens como um número fixo de segmentos de reta, e cada segmento de reta possui inclinação próxima dos outros segmentos de reta, e deve estar a uma certa distância dos outros. Essa distância, em pixels, depende da altura relativa da câmera em relação às linhas. São dois os principais erros presentes na Figura 2.10, a saber, a aparição de segmentos de reta que não pertencem às linhas e mais de um segmento de reta ser detectado para a mesma linha de transmissão. Assim, um filtro foi desenvolvido de forma a juntar os vários segmentos de reta que representam a mesma linha de transmissão e eliminar as linhas avulsas que não pertencem a nenhuma linha de transmissão.

Para verificar se dois ou mais segmentos de reta pertencem à mesma linha na imagem são analisados todos os segmentos de reta, comparando cada um com os restantes e verificando se ele possui um parceiro com ângulo parecido, e que esteja próximo o suficiente para ser interpretado como apenas um segmento de reta. Para realizar a comparação, os segmentos de reta analisados são prolongados, para que os resultados sejam retas que tenham começo em uma extremidade da imagem e término na outra extremidade. Isso é realizado para o caso de ocorrer uma descontinuidade, e para que uma linha, representada por dois ou mais segmentos de reta separados, possa ser corretamente corrigida para apenas um segmento de reta final. Quando um par de segmentos de reta cumpre os requisitos para serem considerados como pertencendo à mesma linha, ele é fundido em apenas um segmento de reta resultante, sendo que os pontos do segmento de reta resultante são calculados através da média aritmética dos pontos do par de segmentos de reta anteriores.

Para verificar se o segmento de reta tem o mesmo número de parceiros que uma linha de transmissão, novamente são analisados todos os segmentos de reta, verificando se cada um deles possui o número correto de parceiros com ângulo próximo. Os segmentos de reta que não têm a quantidade correta de parceiros são eliminados, enquanto os que apresentam o número correto de parceiros são tidos como corretos. Esse passo é feito após o primeiro para evitar que a presença de segmentos de reta repetidos resultem em um número errado de parceiros para a reta analisada. Os passos do filtro são melhor mostrados no Algoritmo 1.

**Algoritmo 1:** Filtro para a seleção do resultado de Hough**Entrada:** Segmentos de reta detectados por Hough (*linhas*)**Saída:** Segmentos de reta pertencentes às linhas de transmissão (*linhasC*)**início**

inicialização;

*linha1* recebe *linhas*(1);*linha2* recebe *linhas*(1);**repita****repita****se** *linha1* diferente de *linha2* **então****se** ângulo de *linha1* próximo ângulo *linha2* **então****se** reta de *linha1* próxima da reta de *linha2* **então***linha1* recebe média de *linha1* e *linha2*;*linha2* é eliminada de *linhas*;**fim****fim****fim***linha2* recebe a linha seguinte;**até** última linha;*linha1* recebe a linha seguinte;*linha2* recebe *linhas*(1);**até** última linha;*linha1* recebe *linhas*(1);*linha2* recebe *linhas*(1);**repita****repita****se** *linha1* diferente de *linha2* **então****se** ângulo de *linha1* próximo ângulo *linha2* **então****se** reta de *linha1* a certa distância da reta de *linha2* **então**acrescenta 1 em parceiras de *linha1*;**fim****fim****fim***linha2* recebe a linha seguinte;**até** última linha;**se** número certo de parceiras de *linha1* **então***linhasC* recebe *linha1*;**fim***linha1* recebe a linha seguinte;*linha2* recebe *linhas*(1);**até** última linha;**fim**

Na Seção 2.7 serão mostrados os resultados obtidos com a aplicação de tal filtro.

## 2.7 Teste da Filtragem dos Segmentos de Reta

O filtro foi aplicado sobre as imagens capturadas pelo AR.drone 2.0, e o resultado correspondente às Figuras 2.10 pode ser visto na Figura 2.11. Os parâmetros do filtro, como distância entre retas e diferença entre ângulos considerados próximos, foram escolhidos de forma empírica.

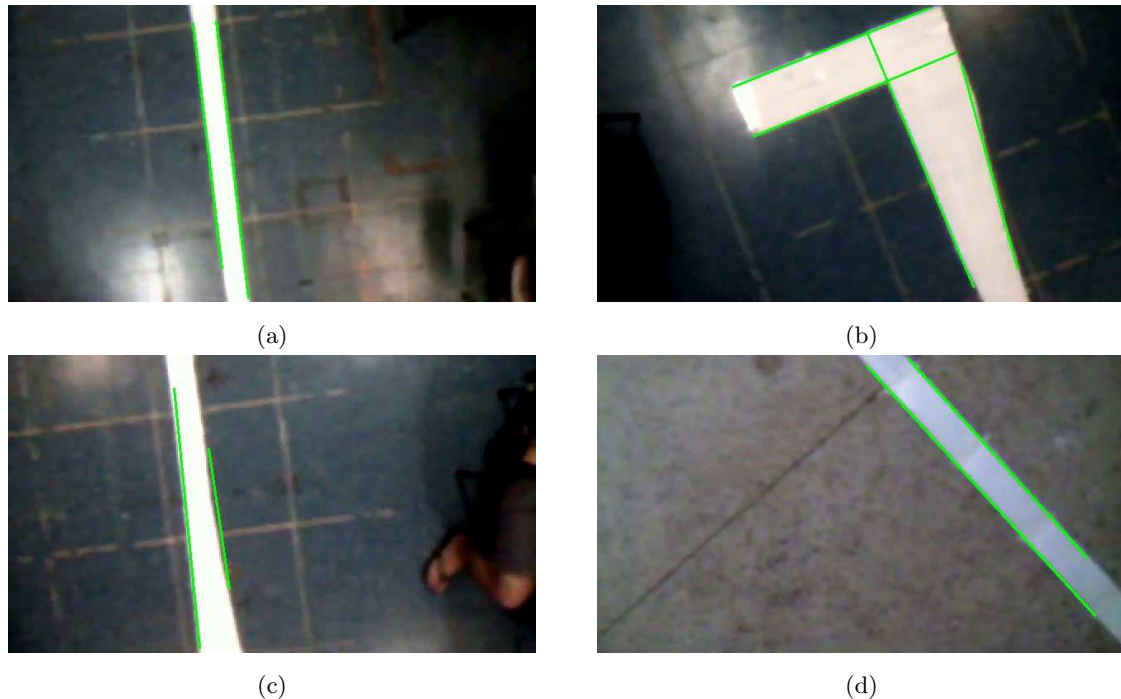


Figura 2.11: Aplicação do filtro sobre os segmentos de reta detectados.

Ao aplicar o filtro na Figura 2.10a, o resultado desejado é que os segmentos de reta não sofram nenhuma alteração, porque nessa figura o resultado já é o ideal, cada linha é representada por apenas um segmento de reta e nenhuma reta que não pertence às linhas de transmissão foi detectada. Na Figura 2.11a pode-se verificar que o resultado obtido pelo filtro foi o desejado. Na Figura 2.10b era esperado que os vários segmentos de reta que representavam a mesma linha fossem unidos em apenas um segmento de reta, e que os outros segmentos de reta não sofressem alterações. Como verificado na Figura 2.11b, o resultado do filtro foi que todas as linhas foram representadas por apenas um segmento de reta, ou seja, os segmentos de reta que representavam a mesma linha foram unidos. Já na Figura 2.10c, além de unir os segmentos de reta que representavam a mesma linha, também era preciso que o segmento de reta que havia sido detectado erroneamente fosse excluído. Na Figura 2.11c pode-se verificar que os dois segmentos de reta foram corretamente unidos em apenas um, o qual tinha sua inclinação próxima à da linha a ser seguida, e que o segmento de reta distinto foi excluído com sucesso. Por fim, a Figura 2.11d mostra o resultado já esperado, uma vez que a textura do piso onde é feito o experimento não influencia no resultado do filtro. Pelas imagens pode-se perceber que o filtro conseguiu eliminar todos os falsos segmentos de reta, bem como juntar os vários segmentos de reta que pertenciam à mesma linha.

Como resultado final todas as linhas no chão foram representadas por apenas um segmento de reta, e todas os segmentos de reta representavam apenas uma linha.

## 2.8 Simulações e experimentos para encontrar a altura do VANT

Tendo o sistema de detecção de linhas sido verificado, foram realizadas algumas simulações para validar a Equação 2.4. Nas simulações foi utilizado o mesmo ambiente anterior, uma câmera montada embaixo de um VANT sobrevoando no centro de linhas de transmissão. A câmera simulada é a mesma da simulação anterior, seguindo o modelo *Pinhole* ideal com foco de 10 *cm*. A simulação consistiu em variar a altitude do VANT de 1m a 2m, e calcular sua distância em relação às linhas através das distâncias entre os segmentos de reta detectados pela transformada de Hough. Os resultados podem ser vistos na Figura 2.12.

Pelos gráficos mostrados na Figura 2.12, é possível perceber que a simulação foi um sucesso, uma vez que a altura medida utilizando a largura da linha seguiu fielmente a altura real da câmera, como se vê na Figura 2.12a. Além disso, o produto da largura em pixels pela altura, que são os valores que variam na simulação, ficou bem próximo do produto da largura em metros pelo foco da câmera, valores constantes durante toda a simulação (ver Figura 2.12b). Pode-se perceber na primeira imagem que devido à baixa resolução das imagens coletadas pela câmera na simulação ocorreram pequenos erros entre a largura e a altitude real. Esse erro se torna mais evidente quando a câmera está em altitudes mais elevadas.

Com os bons resultados obtidos durante as simulações, novamente foram realizados experimentos utilizando o quadrimotor AR.drone 2.0. Nos experimentos foi utilizada a mesma linha usada anteriormente, e o quadrimotor teve que realizar movimentos análogos à simulação, se elevando até uma determinada altura e depois descendo até uma outra altura. Nesses experimentos a altitude do quadrimotor foi medida através de um sensor à base de ultrassom disponível a bordo do mesmo, e os movimentos de ascensão e descenso foram controlados por um computador externo. Os resultados de um dos experimento podem ser vistos na Figura 2.13. Assim como visto na Figura 2.13a, o quadrimotor começou o experimento na altitude de 70 *cm*, foi elevado até a altitude de 180 *cm*, e em seguida foi levado à altitude de 100 *cm*. Pela Figura 2.13b é possível perceber que o produto da altura medida

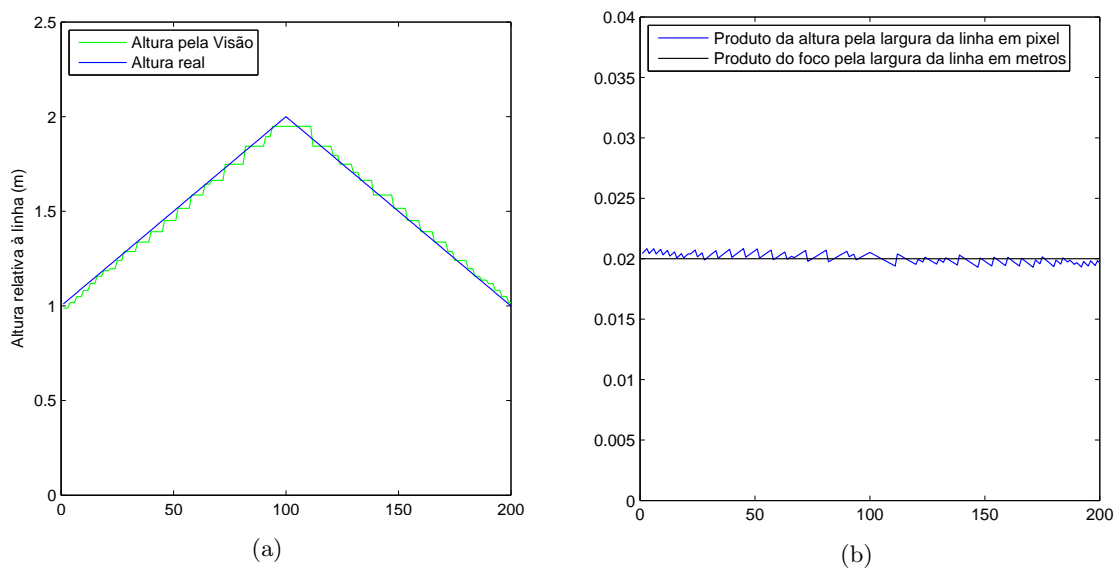


Figura 2.12: Simulação para calcular a altura através de visão.



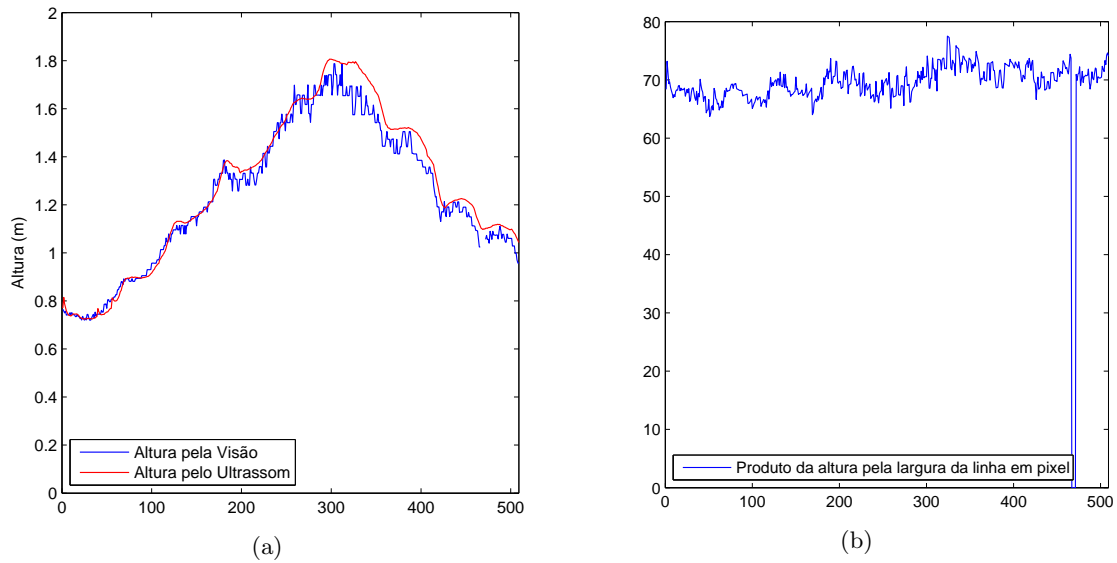


Figura 2.13: Simulação para calcular a altura através de visão.

pelo sensor à base de ultrassom pela largura da linha em pixels foi praticamente constante, e que mesmo perdendo a linha, o que acontece perto do final do experimento (representado pelo valor zero), o produto retorna para o valor esperado ao recuperar a visão da linha. O produto do foco da câmera pela largura da linha em metros, valores que são constantes, foram encontrados empiricamente, tomando-se a média aritmética dos valores obtidos nos experimentos. A Figura 2.13b compara a altitude em metros encontrada utilizando visão e a altitude medida pelo sensor à base de ultrassom. Note-se que as duas medidas de altitude são muito próximas, o que leva à conclusão que o experimento foi um sucesso.

Tendo a altura relativa, é possível encontrar os outros parâmetros do veículo através da Equação 2.1. Para simplificação dos cálculos, foi assumido que os ângulos de arfagem e rolagem do veículo são nulos, o que é verdade quando os VANTs utilizados operam sem realizar movimentos agressivos.

## Capítulo 3

# Controlador Dinâmico

Para a realização de um voo autônomo, é necessário juntar-se a modelagem do veículo e um controlador. Para o entendimento do funcionamento do sistema como um todo, este capítulo apresenta o modelo do quadrimotor e do helicóptero. Nesse projeto são utilizados dois modelos e os controladores dinâmicos desenvolvidos no mesmo grupo de pesquisa, um para helicópteros, descrito em [Brandao, 2013], e outro para quadrimotores do modelo AR.drone 2.0, descrito em [Vago Santana et al., 2014]. Em [Brandao, 2013] é proposto um modelo dinâmico de corpo rígido do helicóptero utilizando as equações de Euler-Lagrange, resultando em um modelo não-linear subatuado. Para realizar o controle, em [Brandao, 2013] é proposto um controlador também não-linear, utilizando a dinâmica inversa. Já em [Vago Santana et al., 2014] é proposto um controlador não-linear de dinâmica inversa para seguimento de trajetória ou posicionamento para o AR.drone 2.0. Ambos os controladores são capazes de realizar as tarefas de posicionamento do VANT e de seguimento de linha. Nas próximas seções serão melhor explicados os modelos e controladores utilizados nesse projeto.

### 3.1 Caso de um Helicóptero

A representação do modelo dinâmico de um VANT utilizada em [Brandao, 2013] é baseada na formulação de Euler-Lagrange, onde a aeronave (representada como um corpo rígido sujeito à ação de forças e torques externos) pode ser descrita pela função Lagrangiano  $L$ , a qual representa a diferença entre a energia cinética total  $K$  e a energia potencial total  $U$ ,

$$L = K - U \quad (3.1)$$

As variáveis usadas para descrever a postura da aeronave são mostradas na Figura 3.1. Ali  $\xi_h = [x_h \ y_h \ z_h]^T \in \mathbb{R}^3$  corresponde aos deslocamentos longitudinal, lateral e normal da aeronave no referencial inercial  $\langle e \rangle$ , e  $\eta_h = [\phi_h \ \theta_h \ \psi_h]^T \in \mathbb{R}^3$  corresponde aos ângulos de rolagem, arfagem e guinada, definidos com base no referencial espacial  $\langle s \rangle$ , que é um referencial paralelo ao referencial inercial  $\langle e \rangle$ , mas com origem no centro de gravidade do helicóptero, assim como o referencial do helicóptero  $\langle h \rangle$ . Utilizando as variáveis na Equação 3.1,

$$L = K - U = \frac{1}{2}m\dot{\xi}^T\dot{\xi} + \frac{1}{2}\Omega^T\mathbf{I}\Omega - mgz, \quad (3.2)$$

onde  $m$  é a massa total do veículo e  $g$  é a aceleração gravitacional.  $\Omega \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  e  $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  representam o vetor de velocidade angular do veículo em  $\langle h \rangle$  e a matriz de inércia do corpo rígido, definidos, respectivamente, por,

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\text{sen}\theta \\ 0 & \cos\phi & \text{sen}\phi \cos\theta \\ 0 & -\text{sen}\phi & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Para que o modelo dinâmico seja obtido,  $L$  deve satisfazer a restrição de Euler-Lagrange, dada por

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

onde  $\mathbf{f}$  e  $\boldsymbol{\tau}$  representam as forças e torques aplicados ao sistema, dados, respectivamente, por

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_{\phi_h} \\ \tau_{\theta_h} \\ \tau_{\psi_h} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Substituindo a Equação 3.2 na Equação 3.5 tem-se como resultado

$$\begin{bmatrix} m\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_r(\eta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\xi} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_r(\eta, \dot{\eta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}(g) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

onde  $m$  é a massa total do veículo,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  é a matriz identidade,  $\mathbf{M}_r(\eta)$  representa a matriz de inércia rotacional,  $\mathbf{C}_r(\eta, \dot{\eta})$  representa a matriz de Coriolis e forças

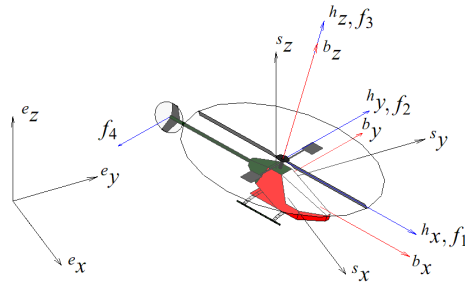


Figura 3.1: Modelo de seis graus de liberdade do helicóptero miniatura.

centrípetas rotacionais e  $\mathbf{G}(g)$  é o vetor de aceleração gravitacional. Para o helicóptero  $\mathbf{f}$  e  $\tau$  podem ser representados por

$$\mathbf{f} = \mathcal{R}^{-1} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 - f_4 \\ f_3 \end{bmatrix} \text{ e } \tau = \begin{bmatrix} -l_h f_2 \\ l_h f_1 \\ l_t f_4 \end{bmatrix},$$

respectivamente, onde  $\mathcal{R}$  é a matriz de rotação, considerando os ângulos de Euler. As forças  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  estão relacionadas com as componentes de propulsão do rotor principal, associadas, respectivamente, aos controles do cíclico longitudinal, do cíclico lateral e do coletivo do helicóptero. Já  $f_4$  é a força de propulsão produzida pelo rotor de cauda, para compensar o efeito anti-torque do rotor principal e alterar o ângulo de guinada (no referencial da aeronave). Essas forças é que são as entradas (abstratas) de controle, que serão geradas pelo controlador projetado com base no modelo de alto nível em (3.8). Quanto às constantes  $l_h$  e  $l_t$ , elas são, respectivamente, as distâncias do rotor principal e do rotor de cauda para o centro de gravidade (ponto de controle) do helicóptero.

Segundo [Amidi et al., 1998], experimentos realizados com restrições físicas de graus de liberdade não revelam aspectos relevantes do problema de controle de veículos aéreos não tripulados. Segundo os autores, tais limitações físicas resultam em simplificações excessivas do problema. Por isso essa dissertação escolheu trabalhar com o controlador proposto em [Brandao, 2013], uma vez que ele não apresenta restrição de movimentos do VANT.

Representando (3.8) na forma subatuada tem-se que

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{pp} & \mathbf{M}_{pa} \\ \mathbf{M}_{ap} & \mathbf{M}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_p \\ \ddot{\mathbf{q}}_a \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{pp} & \mathbf{C}_{pa} \\ \mathbf{C}_{ap} & \mathbf{C}_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_p \\ \dot{\mathbf{q}}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_p \\ \mathbf{G}_a \end{bmatrix}}_{=\begin{bmatrix} \mathbf{E}_a & \mathbf{E}_p \end{bmatrix}^T} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_p \\ \mathbf{f}_a \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

onde  $\mathbf{q}_a = [z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$  são os graus de liberdade diretamente atuados e  $\mathbf{q}_p = [x \ y]^T$  são os graus de liberdade indiretamente atuados. O sinal de controle escolhido para o sistema é

$$\mathbf{f}_a = (\mathbf{M}_{aa} - \mathbf{M}_{ap}\mathbf{M}_{pp}^{-1}\mathbf{M}_{pa})\boldsymbol{\eta}_a + \mathbf{E}_a - \mathbf{M}_{ap}\mathbf{M}_{pp}^{-1}\mathbf{E}_p,$$

onde  $\boldsymbol{\eta}_a = \ddot{\mathbf{q}}_{ad} + \mathbf{K}_{a1} \tanh(\mathbf{K}_{a2})\dot{\tilde{\mathbf{q}}}_a + \mathbf{K}_{a1} \tanh(\mathbf{K}_{a2})\tilde{\mathbf{q}}_a$  é a entrada de controle adicional,  $\tilde{\mathbf{q}}_a = \mathbf{q}_{ad} - \mathbf{q}_a$  indica o erro de seguimento das variáveis, sendo que  $q_{ad}$  são as variáveis desejadas, e  $\mathbf{K}_{ai} \in \mathbb{R}^4$  são as matrizes de ganho, todas diagonais positivas. O sinal de controle para as variáveis não atuadas/passivas é dado por  $\boldsymbol{\eta}_p = \ddot{\mathbf{q}}_{pd} + \mathbf{K}_{p1} \tanh(\mathbf{K}_{p2})\dot{\tilde{\mathbf{q}}}_p + \mathbf{K}_{p3} \tanh(\mathbf{K}_{p4})\tilde{\mathbf{q}}_p$ , onde  $\tilde{\mathbf{q}}_p = \mathbf{q}_{pd} - \mathbf{q}_p$ , indica o erro de seguimento das variáveis,  $q_{pd}$  são as variáveis desejadas, e  $\mathbf{K}_{pi} \in \mathbb{R}^2$  são as matrizes de ganho, mais uma vez diagonais positivas. O uso da tangente hiperbólica se deve à necessidade de um método analítico de saturação para as ações de controle. Esta função permite a suavização da saturação, e é apropriada para uso em equações de controle não-linear.

Em [Brandao, 2013] é provada a estabilidade do controlador utilizando a teoria de Lyapunov. Como os ângulos  $\phi$  e  $\theta$  têm relação direta com os movimentos de rolagem e de arfagem, em [Brandao, 2013] é demonstrada a relação desses ângulos com as acelerações  $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$  tridimensionais e o ângulo de guinada ( $\psi$ ). Com essa relação é possível realizar o controle do helicóptero enviando o vetor de parâmetros desejados  $X_d = [x_d \ y_d \ z_d \ \psi_d]^T$ , deixando  $\phi_d$  e  $\theta_d$  para serem encontrados em função dos elementos de  $X_d$ .

O controlador pode ser utilizado para realizar o controle de posição, com  $X_d$  constante, onde o helicóptero seria levado a uma posição fixa com um certo ângulo de guinada, e iria terminar o trajeto com velocidade nula. O controlador também pode ser utilizado para realizar o controle de seguimento de trajetória, com o  $X_d$  variável no tempo, onde o helicóptero teria que seguir uma posição variável no tempo. O modelo e o controlador desenvolvidos em [Brandao, 2013] já foram utilizados em outros trabalhos na UFES, como em [Pizetta, 2013] e em [Santana, 2011].

### 3.2 Caso de um Quadrimotor

Já a modelagem apresentada em [Vago Santana et al., 2014] foi desenvolvida para um quadrimotor do modelo AR.drone 2.0, considerando os controladores internos de tal modelo, já presente em seu *firmware*. Tais controladores representam o modelo dinâmico de um quadrimotor pelas equações [Kim et al., 2010]

$$\begin{cases} m\ddot{x} = (\cos\psi \operatorname{sen}\phi + \cos\psi \cos\phi \operatorname{sen}\theta)u_1 \\ m\ddot{y} = (-\cos\psi \operatorname{sen}\phi + \operatorname{sen}\psi \cos\phi \operatorname{sen}\theta)u_1 \\ m\ddot{z} = (\cos\phi \cos\theta)u_1 - mg \\ I_{xx}\ddot{\phi} = u_2 - (I_{zz} - I_{yy})\dot{\theta}\dot{\psi} \\ I_{yy}\ddot{\theta} = u_3 - (I_{xx} - I_{zz})\dot{\phi}\dot{\psi} \\ I_{zz}\ddot{\psi} = u_4, \end{cases} \quad (3.10)$$

onde  $m$  representa a massa,  $g$  a aceleração da gravidade e  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  e  $I_{zz}$  são os momentos de inércia. Adicionalmente, os sinais  $u_1, \dots, u_4$ , são parâmetros de controle correspondentes a forças e torques gerados pelos propulsores do quadrimotor. Apesar de não ser possível acessar os parâmetros do modelo presente no *firmware*, é possível analisar a resposta do AR.drone 2.0 com base nos controladores internos já presentes, ao invés de trabalhar com uma dinâmica complexa, como foi feito em [Vago Santana et al., 2014, Falcon et al., 2013, Hernandez et al., 2013, Krajník et al., 2011]. Nesse contexto, em [Vago Santana et al., 2014] foi desenvolvido um modelo para representar a dinâmica do AR.drone 2.0 em seu próprio eixo de coordenadas, com o centro de massa como ponto de interesse para o controle, descrito pelas equações

$$\begin{cases} \dot{v}_x = \mathbf{K}_1 u_{v_x} - \mathbf{K}_2 v_x \\ \dot{v}_y = \mathbf{K}_3 u_{v_y} - \mathbf{K}_4 v_y \\ \dot{z} = \mathbf{K}_5 u_z - \mathbf{K}_6 \dot{z} \\ \dot{\psi} = \mathbf{K}_7 u_{\dot{\psi}} - \mathbf{K}_8 \dot{\psi}, \end{cases} \quad (3.11)$$

onde  $\dot{v}_x$  e  $\dot{v}_y$  representam acelerações lineares em relação aos eixos  $x$  e  $y$  no referencial do quadrimotor, enquanto  $\dot{z}$  representa a aceleração linear com respeito ao eixo  $z$  e  $\dot{\psi}$  representa a aceleração angular com respeito ao eixo  $z$  no referencial inercial, devido ao *firmware* já compensar a influência dos ângulos  $\theta$  e  $\phi$ . Os parâmetros  $\mathbf{K}_1, \dots, \mathbf{K}_8$  são constantes de proporcionalidade a serem identificadas experimentalmente.  $u_{v_x}$ ,  $u_{v_y}$ ,  $u_z$  e  $u_{\dot{\psi}}$  são os comandos de movimento do AR.drone 2.0. Tais comandos são normalizados, e cada elemento do vetor de sinais de controle  $\mathbf{u} = [u_z \ u_{\dot{\psi}} \ u_{v_x} \ u_{v_y}] \in [-1, +1]$ , sendo que  $u_z$  representa um comando de velocidade de deslocamento linear sobre o eixo  $z$ ;  $u_{\dot{\psi}}$  representa um comando de velocidade angular em torno do eixo  $z$ ;  $u_{v_y}$  representa um comando de inclinação em relação a  $e_x$ , o que indiretamente representa um comando de velocidade linear relacionado ao eixo

$s_y$ , por isso que é chamado de  $u_{v_y}$ ;  $u_{v_x}$  representa um comando de inclinação em relação a  $e_y$ , o que indiretamente representa um comando de velocidade linear relacionado ao eixo  $s_x$  por isso que é chamado de  $u_{v_x}$ . O modelo utilizado não é uma representação completa da dinâmica do quadrimotor, porém é uma aproximação suficiente, o que é comprovado em [Vago Santana et al., 2014], onde se compara dados experimentais coletados em voo com dados simulados com o modelo.

Ainda em [Vago Santana et al., 2014] é proposto um controlador não-linear de dinâmica inversa capaz de realizar o posicionamento e o seguimento de trajetória com um AR.drone 2.0. Ou seja, um controlador capaz de levar o quadrimotor da posição e orientação  $\mathbf{X} = [x, y, z, \psi]$  para os valores desejados  $\mathbf{X}_d = [x_d, y_d, z_d, \psi_d]$ , onde  $\mathbf{X}_d$  pode ser uma função no tempo, caracterizando um seguimento de trajetória, ou uma constante, caracterizando posicionamento. O modelo do quadrimotor, Equação 3.11, agora no referencial global, torna-se

$$\ddot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}_1 \cdot \mathbf{U} - \mathbf{f}_2 \dot{\mathbf{X}}, \quad (3.12)$$

onde

$$\ddot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_{v_x} \\ u_{v_y} \\ u_z \\ u_{\psi} \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{z} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

$$\mathbf{f}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 \cos \psi & -\mathbf{K}_3 \sin \psi & 0 & 0 \\ \mathbf{K}_1 \sin \psi & -\mathbf{K}_3 \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_7 \end{bmatrix}, \mathbf{f}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_2 \cos \psi & -\mathbf{K}_4 \sin \psi & 0 & 0 \\ \mathbf{K}_2 \sin \psi & -\mathbf{K}_4 \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_8 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Partindo da Equação 3.12 a lei de controle adotada é

$$\mathbf{U} = \mathbf{f}_1^{-1} \cdot (\boldsymbol{\nu} + \mathbf{f}_2 \cdot \dot{\mathbf{X}}), \quad (3.15)$$

onde

$$\boldsymbol{\nu} = \ddot{\mathbf{X}}_d + \boldsymbol{\kappa}_p \cdot \tilde{\mathbf{X}} + \boldsymbol{\kappa}_d \cdot \dot{\tilde{\mathbf{X}}}, \quad (3.16)$$

sendo

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X} = [x_d - x \quad y_d - y \quad z_d - z \quad \psi_d - \psi]^T, \quad (3.17)$$

o erro de seguimento, e sendo as matrizes de ganho

$$\boldsymbol{\kappa}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{p_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{p_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_{p_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_{p_\psi} \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

e

$$\boldsymbol{\kappa}_d = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{d_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{d_y} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_{d_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{K}_{d_\psi} \end{bmatrix}^T \quad (3.19)$$

---

matrizes diagonais com valores sempre positivos e não nulos.

Em [Vago Santana et al., 2014] também é provada a estabilidade do controlador utilizando a teoria de Lyapunov. Um detalhe é que tal controlador pode ser utilizado para realizar o controle de posição, com  $\mathbf{X}_d$  constante, onde o quadrimotor seria levado a uma posição fixa com um certo ângulo de guinada, e iria terminar o trajeto com velocidades nulas, assim como para realizar o controle de seguimento de trajetória, com  $\mathbf{X}_d$  variável no tempo, onde o quadrimotor teria que seguir uma posição variável no tempo. Note-se, por fim, que o modelo e o controlador desenvolvidos em [Vago Santana et al., 2014] também já foram utilizados em outros trabalhos na UFES, como aqueles em [Santos et al., 2015b] e em [Santos et al., 2015a].

## Capítulo 4

# Estratégia de Controle Desenvolvida

Os controladores dinâmicos desenvolvidos em [Brandao, 2013] e [Vago Santana et al., 2014] podem ser utilizados para cumprir tarefas variadas, como por exemplo posicionamento do robô e seguimento de trajetórias. Porém, uma linha de transmissão não é formada apenas por um segmento de linha, mas por vários segmentos de linha conectados em pontos desconhecidos a priori, e que devem ser identificados enquanto o VANT utilizado segue a linha. O avanço gerado nesse projeto foi desenvolver uma estratégia de controle que, utilizando a informação do processamento das imagens da câmera, o posicionamento e a orientação do VANT em relação às linhas de transmissão e a quantidade de linhas de transmissão presentes nas imagens, envie os parâmetros de entrada para os controladores dinâmicos, e tais controladores dinâmicos levem o VANT para os valores desejados, fazendo com que ele consiga seguir as linhas de transmissão com sucesso. O diagrama de blocos da Figura 4.1 mostra o sistema proposto completo, sendo que  $X_l$  representa a posição e a orientação do VANT em relação às linhas,  $X_d$  representa sua posição tridimensional, sua orientação e sua velocidade frontal desejados,  $U$  contém os sinais de controle enviados pelo controlador ao VANT, e  $X_e$  representa a posição e a orientação do VANT no referencial global. O sistema supervisor sempre tenta manter a velocidade lateral do VANT em zero, enquanto os ângulos de arfagem e guinada desejados vão ser definidos pelos controladores dinâmicos utilizados.

Sabendo que as linhas de transmissão seguem o padrão de conjuntos de segmentos de reta conectados em pontos específicos que podem ter altitude variada, para resolver o problema de seguir as linhas o processo foi dividido em três partes, conforme se vê na Figura 4.2: “Seguimento de Linha”, onde o VANT deve voar no meio das linhas com a mesma orientação das mesmas, mantendo uma velocidade

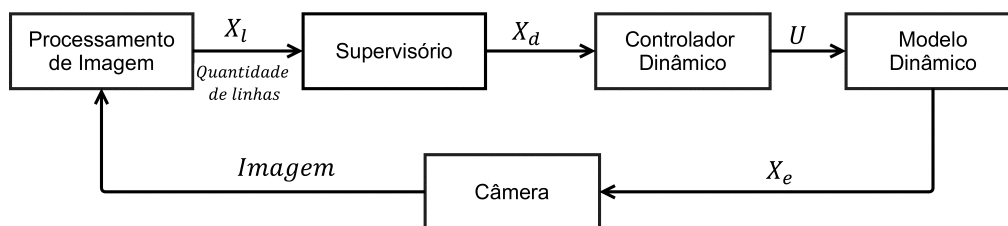


Figura 4.1: Diagrama de blocos do VANT com o sistema supervisor desenvolvido.



e altitude constantes em relação às linhas; “Posicionamento”, na qual o VANT deve pairar sobre o ponto de encontro entre as duas linhas (poste); e por fim “Ajuste de Guinada”, onde o VANT deve girar em torno do seu eixo  $Z$  para igualar a sua orientação à orientação do novo segmento de linha a ser seguido. O procedimento de troca de etapas pelo sistema supervisorio desenvolvido pode ser visto na Figura 4.2, sendo que cada etapa do referido sistema será melhor explicada na sequência deste capítulo. Vale ressaltar que a troca de etapas do supervisorio não desestabiliza os controladores. Isso é justificado porque, do ponto de vista dos controladores, a troca de etapas é interpretada apenas como troca de parâmetros. Além disto, estas trocas não acontecem de maneira intensa, apenas ao encontrar um poste que define o início de uma nova linha com outra inclinação.

## 4.1 Seguimento de Linha

O sistema é iniciado na etapa de “Seguimento de Linha”, na qual o VANT tem que seguir o segmento de linha detectado com velocidade e altitude relativa constantes e com ângulo de guinada igual à direção da linha. Durante toda essa etapa, a velocidade frontal deve ser constante, e o posicionamento horizontal não será diretamente controlado. Para corrigir um possível deslocamento lateral, ou seja, no caso do VANT estar deslocado lateralmente em relação à linha, ele deverá se aproximar da linha variando o seu ângulo de guinada. O ângulo de guinada a ser estabelecido como referência é obtido partindo-se do ponto da linha média mais próximo do VANT ( $P1$ ), conforme ilustra a Figura 4.3. Em seguida é encontrado um ponto  $P2$ , a certa distância de  $P1$ , também pertencente à linha média (tomando cuidado para que  $P2$  esteja à frente de  $P1$ ). O ângulo que o VANT deve seguir é o ângulo entre sua posição atual e  $P2$ , ou seja, o ângulo  $\phi_d$  mostrado na Figura 4.3. Este procedimento é repetido a cada ciclo de amostragem, de forma que a distância em relação à linha tende a zero, levando  $\tan(\phi_d)$  também a zero, resultando no robô seguindo a linha com o mesmo ângulo dela. O processo pode ser mais suave ou mais brusco, escolhendo, respectivamente, um ponto  $P2$  mais próximo ou mais distante de  $P1$ . Outra possibilidade seria o VANT seguir a linha no sentido contrário, ou seja, navegando para trás (o que é possível com um VANT de asas rotativas). Note-se que o sentido de seguimento da linha depende apenas de onde está o ponto  $P2$ , à frente ou atrás de  $P1$ .

Se enquanto estiver nessa etapa existirem dois conjuntos de segmentos de linhas na imagem, ou seja, a linha de transmissão alterou a sua direção, é verificado se o segmento de linha que não estiver sendo seguido está à frente ou atrás do VANT. Caso esteja à frente, trata-se de um segmento novo,

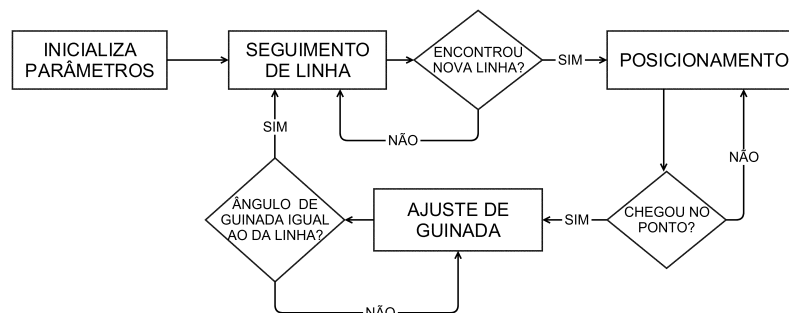


Figura 4.2: Fluxograma adotado para o cumprimento da tarefa de seguimento de linhas de transmissão.

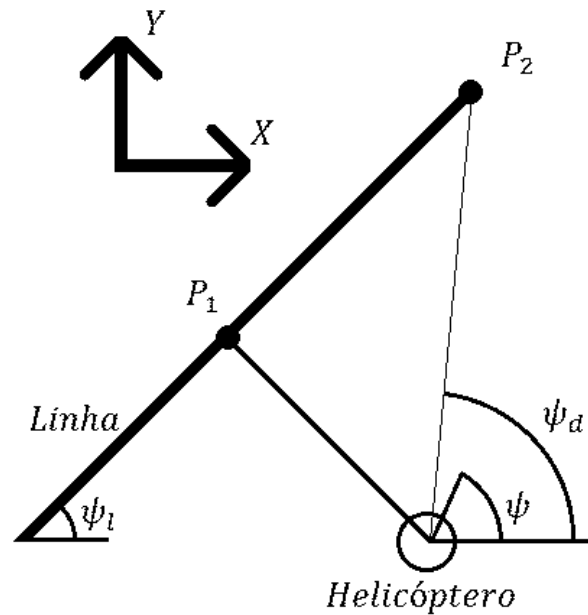


Figura 4.3: Aproximação do VANT à linha a ser seguida.

e o sistema vai para a etapa “Posicionamento”. Caso esteja atrás, trata-se de um segmento que já foi percorrido, e o sistema permanece em “Seguimento de Linha”. Tal diferença de imagem pode ser verificada na Figura 4.4. Na Figura 4.4a o VANT se encontra antes do ponto de encontro e o sistema supervisorio deve trocar a etapa para “Posicionamento”. Já na Figura 4.4b o VANT se encontra após o ponto de encontro, e o sistema supervisorio deve permanecer na mesma etapa de “Seguimento de Linha”.

Para verificar qual segmento está ou não sendo seguido, os ângulos dos segmentos são comparados com a orientação do VANT, e a reta que tiver a inclinação mais próxima da orientação do VANT é tida como a linha atual. Isso é feito assumindo que as linhas de transmissão só trocam de inclinação após um tempo suficientemente grande para que o VANT já esteja com a sua orientação próxima da linha sendo seguida. É importante fazer essa verificação para evitar que o VANT acabe confundindo os segmentos, e volte a seguir o segmento anterior, ficando preso em apenas uma interseção da linha de transmissão, sem completar o percurso.

## 4.2 Posicionamento

Na imagem aparecerão duas linhas com inclinações diferentes, quando o VANT estiver próximo de uma torre de suporte de linha de transmissão, se a direção do novo segmento de reta for diferente daquela do segmento anterior. Caso a nova linha detectada esteja à frente do VANT, o sistema de controle muda para a tarefa “Posicionamento”, e o robô passa a ser comandado para parar sobre o ponto de encontro das duas linhas detectadas. Nessa parte, as coordenadas do ponto comum às linhas são encontradas e enviadas como referência para o controlador da dinâmica do VANT, que o leva para o ponto desejado. Durante essa etapa a velocidade frontal do VANT deve ser reduzida ao longo do tempo, até ele parar completamente sobre o ponto de encontro dos dois segmentos de reta. A velocidade frontal não será controlada diretamente, e o posicionamento horizontal desejado será

sobre o ponto de encontro das linhas. Nesse caso, o ângulo de guinada não leva em consideração o ponto de encontro e é calculado da mesma forma que durante a etapa “Seguimento de Linha”. Isto é feito desta forma porque como o ponto vai estar muito próximo do VANT qualquer erro ao calcular a posição do ponto de encontro ou de posicionamento do VANT resultaria numa grande variação do ângulo desejado. Mais ainda, como o ponto de encontro se localiza sobre a linha, seguindo a linha não resultará num grande erro de posicionamento.

Caso algum dos dois segmentos não seja detectado enquanto o VANT não alcançar o ponto de destino, o sistema considera o ponto anteriormente calculado como ponto destino.

### 4.3 Ajuste de Guinada

Quando o VANT se posiciona sobre o ponto de encontro das linhas, o sistema muda a tarefa para “Ajuste de Guinada”. Nessa etapa o robô não pode alterar a sua posição e tem que girar em torno do próprio eixo  $Z$ , de forma a ajustar seu ângulo de guinada para se orientar na mesma direção do novo segmento de reta a ser seguido. A velocidade frontal desejada é nula, e o posicionamento tridimensional desejado é o posicionamento do robô.

Durante toda a segunda etapa, “Posicionamento”, o ângulo da nova linha é salvo, sendo atualizado a cada etapa em que duas linhas são detectadas. Para salvar os ângulos das linhas é utilizado, além das imagens, um magnetômetro, presente no quadrotor e no helicóptero, para encontrar a inclinação das linhas em um referencial global. A inclinação no eixo global de cada linha é utilizada para evitar que as linhas na imagem sejam confundidas, ou seja, que o VANT faça o percurso contrário, e assim fique preso em um só segmento de reta, sem passar para os seguintes. Ao passar para a terceira etapa “Ajuste de Guinada”, o ângulo salvo passa a ser a nova referência para o ângulo de guinada do VANT. A terceira etapa é finalizada quando o VANT tem seu ângulo de guinada igual à orientação do próximo segmento de linha, e então o sistema volta para a primeira etapa, passando a seguir o novo segmento de reta.



(a) Ponto de encontro na frente do VANT.

(b) Ponto de encontro atrás do VANT.

Figura 4.4: Dois segmentos de linhas detectados na mesma imagem.

# Capítulo 5

## Resultados

Para validar a estratégia de controle desenvolvida nesse projeto foram realizadas simulações utilizando o modelo de um quadrimotor e de um helicóptero, separadamente. Foi desenvolvido um ambiente em Matlab©, no qual são utilizados os modelos e controladores dinâmicos dos VANTs citados no Capítulo 3. No ambiente o sistema supervisorio utiliza as imagens da câmera, também simulada pelo modelo *pinhole*, para adquirir o posicionamento e a orientação do VANT em relação à linha e, assim, definir os parâmetros de entrada dos controladores dinâmicos. Mais detalhes e resultados das simulações e de experimentos reais realizados serão mostrados na sequência deste capítulo.

### 5.1 Simulação Utilizando Helicóptero

Na primeira simulação foi utilizado um modelo preciso do helicóptero, levando em consideração a matriz de inércia completa e as saturações físicas das entradas de controle de alto nível. Os parâmetros do helicóptero, mostrados na Tabela 5.1, foram obtidos de [Alperin et al., 2008], onde um modelo em CAD do mini-helicóptero T-Rex 450 SE, da ALIGN©, o mesmo utilizado neste trabalho, é apresentado.

Tabela 5.1: Parâmetros do modelo do helicóptero utilizado (os momentos de inércia estão em  $[kgm^2]$ ).

$m = 0.6169[kg]$	$l_h = 0.05[m]$	$l_t = 0.30[m]$
$I_{xx} = 1.981 \cdot 10^{-3}$	$I_{yy} = 10.591 \cdot 10^{-3}$	$I_{yy} = 9.2855 \cdot 10^{-3}$
$I_{xy} = -2.663 \cdot 10^{-4}$	$I_{xz} = -6.087 \cdot 10^{-4}$	$I_{yz} = -0.059 \cdot 10^{-4}$

A câmera na simulação segue o modelo *Pinhole* ideal com um foco de 10 *cm*, capturando uma imagem a cada 0,3 *s*, e apresenta um atraso correspondente a duas imagens.

O caminho a ser seguido pelo helicóptero durante a simulação é mostrado na Figura 5.1. Ele é definido por três linhas, e se inicia com as linhas paralelas ao eixo *y*, a 2 *m* de altitude, se elevando até 4 *m*. Ao alcançar os 4 *m* de altitude, a linha tem sua inclinação alterada em 90° para a direita, seguindo paralela ao eixo *x*, descendo até estar a 2 *m* do chão, onde termina. Esse caminho foi escolhido por apresentar os dois movimentos verticais requeridos pelo helicóptero, subir e descer, e poder verificar se o helicóptero para sobre o ponto de encontro e consegue ajustar a sua orientação para seguir a nova linha.

O helicóptero deve seguir a linha do meio, tendo a orientação semelhante à sua orientação, permanecendo 1 *m* acima dela, e durante a etapa “Seguimento de Linha” a velocidade de avanço

do helicóptero deve ser de  $20 \text{ cm/s}$ . No início da simulação o helicóptero estava pairando deslocado horizontalmente de  $0,5 \text{ m}$  das linhas,  $0,9 \text{ m}$  acima da linha, como se vê na Figura 5.1. O ângulo de guinada do helicóptero coincide com a inclinação da linha a ser seguida, paralela ao eixo  $y$ . Essas condições iniciais foram escolhidas para verificar se o helicóptero iria corrigir os seus deslocamentos vertical e horizontal em relação à linha.

A Figura 5.1 também mostra o caminho efetivamente seguido pelo helicóptero durante a simulação (linhas tracejadas vermelhas). Percebe-se que o helicóptero conseguiu completar o caminho com sucesso, mantendo-se sempre aproximadamente  $1 \text{ m}$  acima da linha. Durante o início da simulação o helicóptero se aproximou da linha, e em seguida permaneceu sobre a linha média durante quase todo o percurso. Apenas quando começou a seguir a nova linha é que ele se afastou um pouco, mas logo voltou para a posição desejada. Para a altitude ele teve uma grande variação na sua altura para ficar na posição desejada, e em seguida ficou apenas ajustando a altitude para seguir a variação da altura da linha.

Os gráficos da Figura 5.2 mostram com maiores detalhes os dados de voo do helicóptero. Nesses gráficos as linhas contínuas representam os valores medidos, as linhas tracejadas correspondem aos valores desejados, e as linhas pontilhadas verticais representam trocas de etapas do sistema supervisório. Analisando a Figura 5.2a pode-se perceber que no início da simulação ocorre uma variação no ângulo de guinada, mesmo ele já coincidindo com o da linha a ser seguida. Isso se deve ao fato de ser preciso alterar a orientação do helicóptero para que ele consiga se posicionar sobre a linha, assim como explicado na Seção 4.1. Após o helicóptero ser direcionado para a linha, seu ângulo de guinada passa a ser ajustado para se igualar à direção da linha, o que acontece por volta de  $20 \text{ s}$  da simulação. Uma vez que o helicóptero está sobre a linha e com sua inclinação coincidente com a da mesma, o seu ângulo de guinada permanece constante até ele ter que se ajustar para seguir uma nova linha, após a segunda linha vertical. Após o encontro, devido a estar mais próximo da linha que no início da simulação, o ângulo de guinada não teve que sofrer grandes alterações, e sua variação quase não é perceptível.

Na Figura 5.2b é mostrada com maiores detalhes a altura real do helicóptero em relação à linha (linha em azul), em comparação com a altura desejada ( $1 \text{ m}$ ), mostrada em linha preta. Assim como

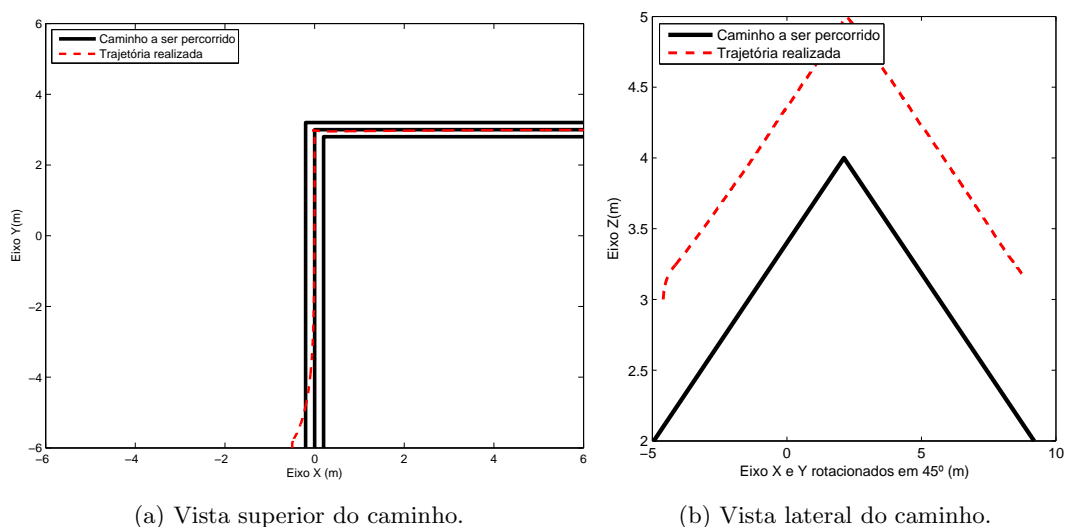


Figura 5.1: Caminho a ser percorrido pelo helicóptero na simulação.

já havia sido notado na Figura 5.2b, o helicóptero completou o caminho sobrevoando a linha a uma altitude muito próxima de  $1\text{ m}$ , apresentando apenas um pequeno erro estacionário, ao redor de  $5\text{ cm}$ . Tal erro é devido ao fato da altitude da linha ser variável, e nos parâmetros do controlador isso não é considerado, o que leva a um atraso temporal entre a medida de altura e a ação para subir ou descer o helicóptero, ajustando-se à linha, ficando abaixo do desejado enquanto a linha sobe, e acima quando a linha desce. Mas mesmo com esse erro, o helicóptero completou o percurso sempre a uma altura muito próxima da desejada, assim como mostra a Figura 5.1b.

A Figura 5.2c permite a análise da velocidade de avanço, e nela se percebe que o controlador conseguiu levar a velocidade de avanço para o valor desejado ( $20\text{ cm/s}$ ) durante a etapa “Seguimento de Linha”. Ao trocar de etapa, após a detecção da segunda linha na imagem, a velocidade de avanço cai a zero, e então o helicóptero altera a sua orientação para coincidir com a da próxima linha. Após estar

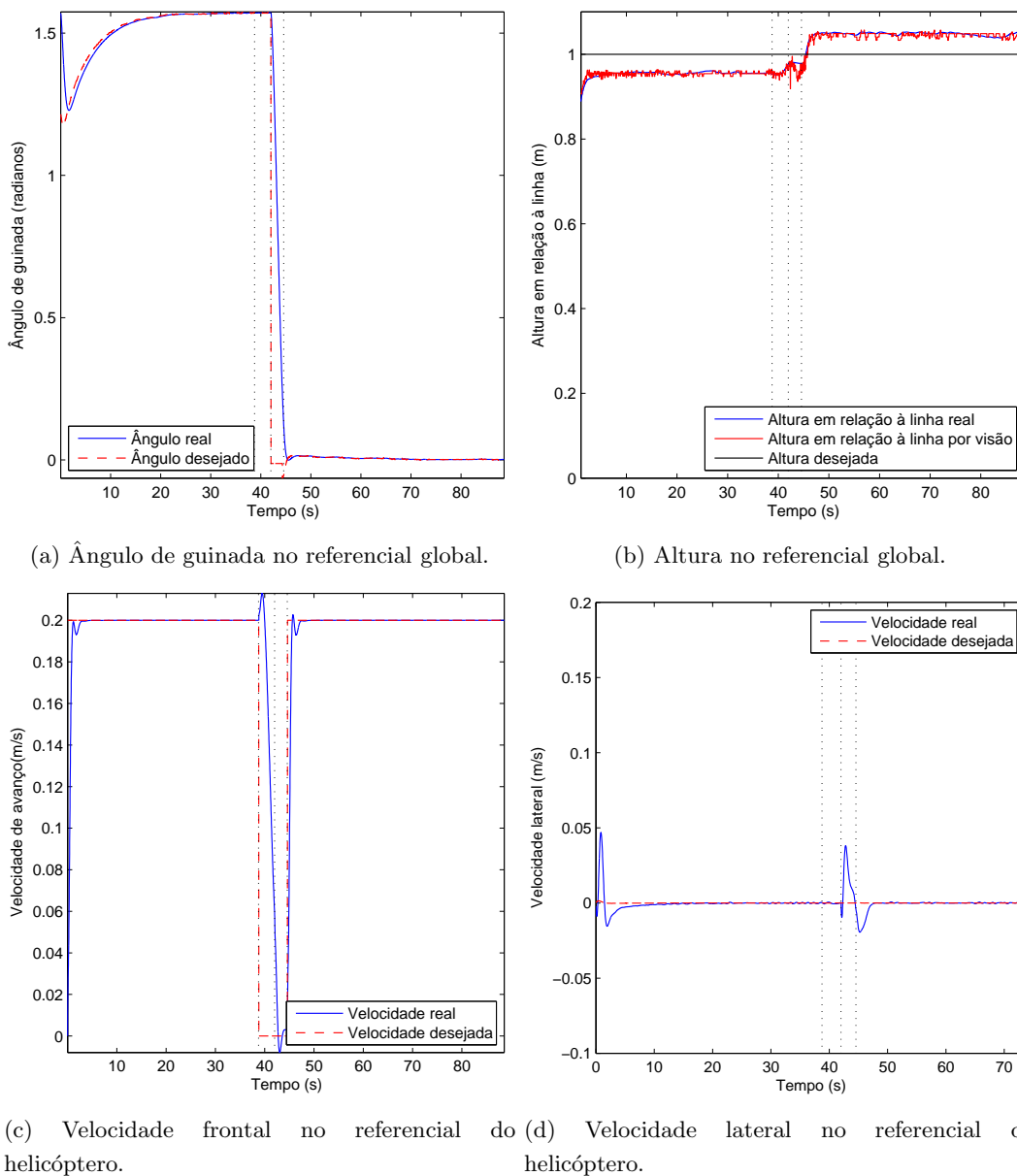


Figura 5.2: Gráficos correspondentes à simulação com o helicóptero.

com a sua orientação semelhante à da linha, a velocidade é levada novamente para o valor de  $20 \text{ cm/s}$  para que o helicóptero siga o segundo segmento de linha. Já a Figura 5.2d mostra a velocidade lateral do helicóptero, e nela se percebe que durante toda a simulação a velocidade lateral do helicóptero permaneceu próxima de zero, como desejado.

Por fim, a Figura 5.3 mostra a distância horizontal entre o helicóptero e a linha média. Assim como já havia sido reparado na Figura 5.1a, durante o percurso o helicóptero se aproximou da linha até ficar sobre a linha média. No final da segunda etapa, posicionar o helicóptero sobre o ponto de encontro, o helicóptero acabou parando um pouco antes da linha, o que pode ser percebido analisando a Figura 5.1a, onde se vê que a linha da trajetória do helicóptero fica antes da nova linha média. Com isso o gráfico da Figura 5.3 apresenta uma variação quando o sistema volta para a etapa “Seguimento de Linha”. Porém esse deslocamento é logo corrigido, e o helicóptero volta a seguir a linha média, para completar o percurso com sucesso, como mostram as Figuras 5.3 e 5.1a.

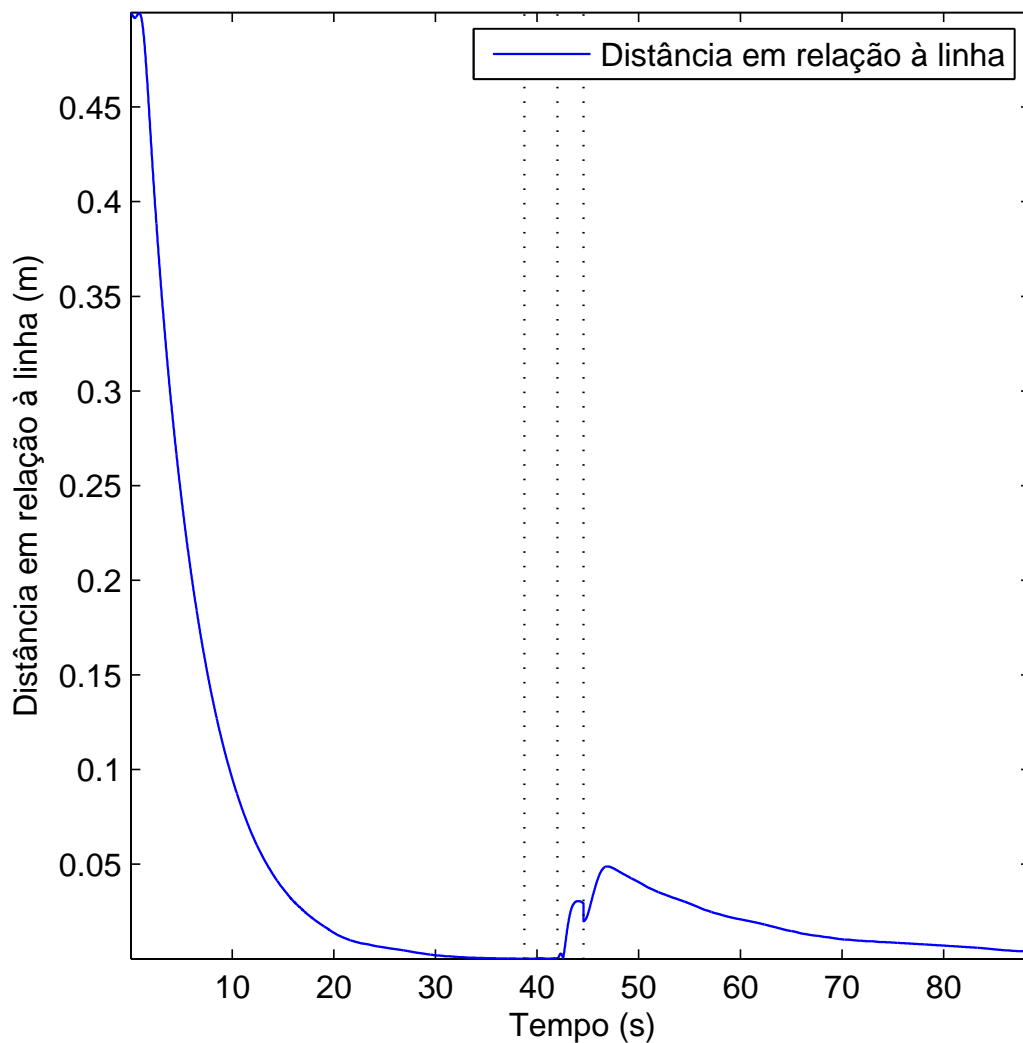


Figura 5.3: Distância horizontal entre o helicóptero e a linha na simulação.

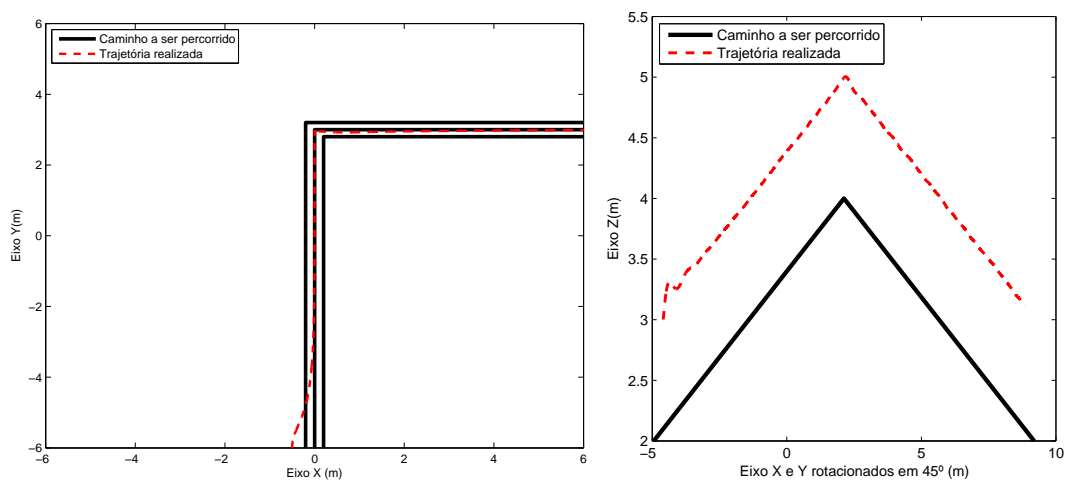
## 5.2 Simulação Usando Quadrimotor

Em seguida foi realizada uma simulação utilizando-se um quadrimotor do tipo AR.drone 2.0. Nessa simulação foi utilizado o modelo descrito em [Vago Santana et al., 2014], com os parâmetros do modelo fornecidos pelo autor. A câmera na simulação foi a mesma que a utilizada anteriormente, uma câmera com modelo *Pinhole* ideal com um foco de 10 *cm*, que captura uma imagem a cada 0,3 *s* e apresenta um atraso correspondente a duas imagens.

O caminho a ser seguido pelo quadrimotor durante a simulação é o mesmo da simulação com o helicóptero, e é mostrado na Figura 5.4. O caminho é definido por três linhas, e se inicia com as linhas paralelas ao eixo *y*, a 2 *m* de altitude, se elevando até 4 *m*. Ao alcançar os 4 *m* de altitude a linha tem sua inclinação alterada em 90° para a direita, seguindo paralela ao eixo *x*, descendo até estar a 2 *m* do chão, onde termina. Esse caminho foi escolhido pelos mesmos motivos anteriormente citados, e também para permitir comparar os resultados com a simulação do helicóptero.

A tarefa a ser executada continua sendo seguir a linha do meio, com orientação semelhante à direção da linha, permanecendo 1 *m* acima dela. Mais ainda, durante a etapa “Seguimento de Linha” a velocidade de avanço do quadrimotor deve ser de 20 *cm/s*. O quadrimotor iniciou a simulação de forma análoga ao helicóptero na simulação anterior, pairando deslocado horizontalmente de 0,5 *m* das linhas, a 0,9 *m* acima delas, como se vê na Figura 5.4. O ângulo de guinada do quadrimotor coincide com a direção da linha a ser seguida, paralela ao eixo *y*, sendo que essas condições iniciais foram escolhidas para verificar se o quadrimotor iria corrigir o seu deslocamento vertical e horizontal em relação à linha.

A Figura 5.4 também mostra o caminho percorrido pelo quadrimotor durante a simulação (linhas tracejadas vermelhas). Pode-se perceber que, assim como o helicóptero, o quadrimotor conseguiu completar o caminho com sucesso, e sempre permanecendo próximo de 1 *m* acima da linha. Durante o início da simulação o quadrimotor se aproximou da linha, e em seguida permaneceu sobre a linha média durante quase todo o percurso. Apenas quando começou a seguir a nova linha ele se afastou um pouco, mas logo voltou para a posição desejada. No que se refere à altitude ele teve uma grande variação na sua altura, para atingir a posição desejada, e em seguida ficou apenas ajustando a altitude



(a) Vista superior do caminho.

(b) Vista lateral do caminho.

Figura 5.4: Caminho a ser percorrido pelo quadrimotor na simulação.



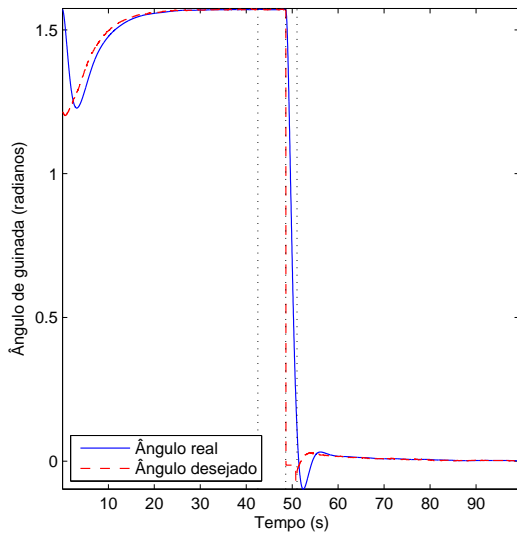
para seguir a variação da altura da linha. Isso pode ser entendido, levando-se em conta que quando manobra para ajustar a guinada o quadrimotor perde altitude, e tem que compensar gerando mais propulsão.

Os gráficos da Figura 5.5 mostram com maiores detalhes os dados de voo do quadrimotor. Nesses gráficos as linhas contínuas representam os valores medidos, as linhas tracejadas correspondem aos valores desejados, e as linhas pontilhadas verticais representam trocas de etapas do controlador. Analisando a Figura 5.5a pode-se perceber que no início da simulação ocorre uma variação no ângulo de guinada, mesmo ele já coincidindo com o da linha a ser seguida. Isso se deve ao fato de ser preciso alterar a orientação do quadrimotor para que ele consiga se posicionar sobre a linha, assim como explicado em 4.1. Após o quadrimotor ser direcionado para a linha, seu ângulo de guinada passa a ser ajustado para se igualar à direção da linha, o que acontece por volta dos 20 s da simulação. Uma vez que o quadrimotor está sobre a linha e com sua orientação coincidente com a da linha, o seu ângulo de guinada permanece constante até ele ter que se ajustar para seguir a nova linha, após a segunda linha vertical. Após o encontro, devido a estar mais próximo da linha que no início da simulação, o ângulo de guinada teve que sofrer alterações menores, e é corrigido após 10 s do início da segunda etapa “Seguimento de Linha”.

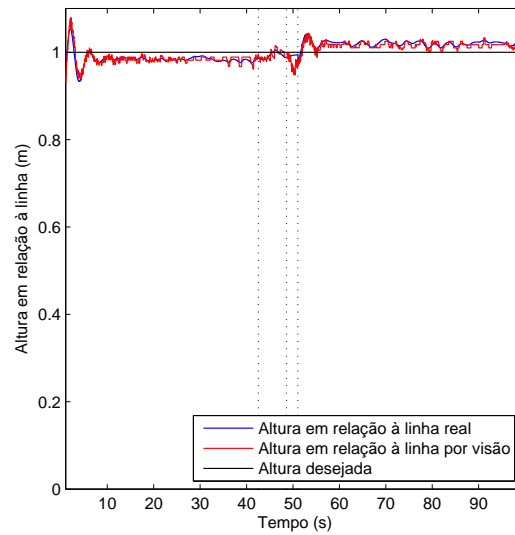
Na Figura 5.5b é mostrada, com maiores detalhes, a altitude real do quadrimotor em relação à linha, no traçado em azul, em comparação com a altura desejada (1 m), correspondente à linha preta. Assim como já havia sido notado na Figura 5.5b, o quadrimotor completou o caminho sobrevoando a linha a uma altitude muito próxima de 1 m, apresentando apenas um pequeno erro estacionário, de cerca de 2 cm, sendo esse erro menor que o do helicóptero. Tal erro é devido ao fato da altitude da linha ser variável, e nos parâmetros do controlador isso não é considerado, o que leva a um atraso temporal entre a medida de altura e a ação para subir ou descer o helicóptero, ajustando-se à linha, ficando abaixo do desejado enquanto a linha sobe, e acima quando a linha desce. Mas mesmo com esse erro, o quadrimotor completou o percurso sempre a uma altitude muito próxima da desejada, como mostra a Figura 5.4b.

A Figura 5.5c permite a análise da velocidade de avanço, e nela se percebe que o controlador conseguiu levar a velocidade de avanço para o valor desejado (20 cm/s) durante a etapa “Seguimento de Linha”. Ao trocar de etapa, quando da detecção da segunda linha na imagem, a velocidade de avanço cai a zero, e então o veículo altera a sua orientação para coincidir com a da próxima linha. Após estar com a sua orientação ajustada à da linha, a velocidade é levada novamente para 20 cm/s, para o seguimento do segundo segmento de linha. Já a Figura 5.5d mostra a velocidade lateral do quadrimotor. Nela é fácil perceber que durante toda a simulação a velocidade lateral do quadrimotor permaneceu próxima de zero, como desejado.

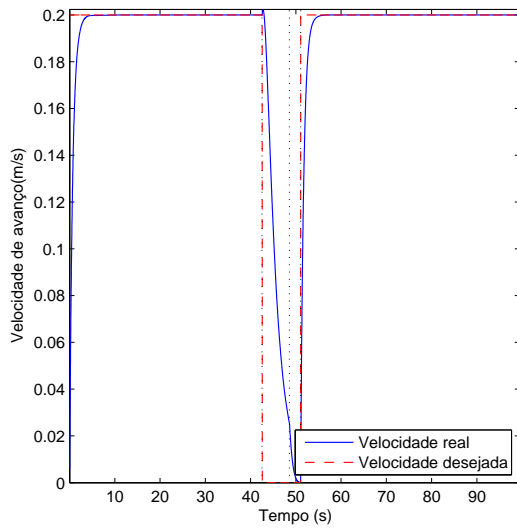
Por fim, a Figura 5.6 mostra a distância horizontal entre o quadrimotor e a linha média. Assim como já havia sido reparado na Figura 5.4a, durante o percurso o quadrimotor se aproximou da linha até ficar sobre a linha média. No final da segunda etapa, posicionar o quadrimotor sobre o ponto de encontro, o quadrimotor acabou parando um pouco antes da linha, o que pode ser percebido analisando a Figura 5.4a, em que a linha correspondente ao percurso do quadrimotor fica antes da nova linha média. Com isso o gráfico da Figura 5.6 apresenta uma variação quando volta para a etapa “Seguimento de linha”. Porém esse deslocamento é logo corrigido, e o quadrimotor consegue voltar a seguir sobre a linha média e completar o percurso com sucesso, como mostram as Figuras 5.6 e 5.4a.



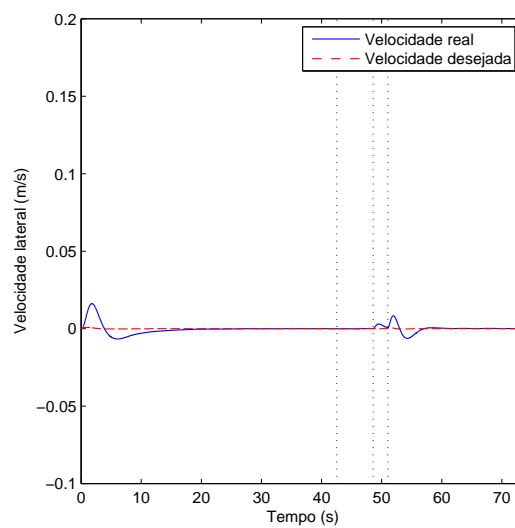
(a) Ângulo de guinada no referencial global.



(b) Altitude no referencial global.



(c) Velocidade frontal no referencial do quadrimotor.



(d) Velocidade lateral no referencial do quadrimotor.

Figura 5.5: Gráficos correspondentes à simulação com o quadrimotor.

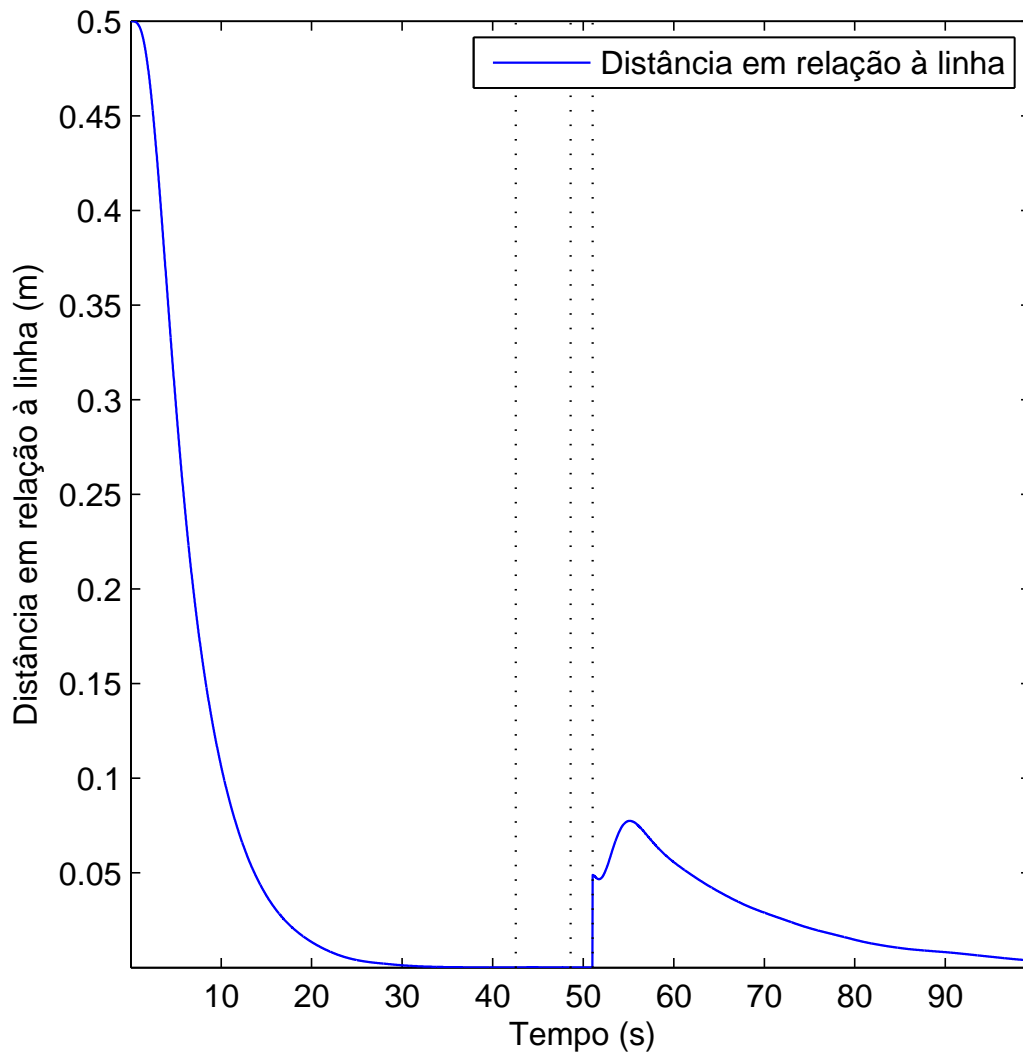


Figura 5.6: Distância horizontal entre o quadrimotor e a linha sendo seguida na simulação.

### 5.3 Experimento com o Quadrimotor

A partir do resultado da simulação usando o quadrimotor, foi realizado um experimento com o AR.drone 2.0. Nesse experimento um caminho a ser seguido pelo quadrimotor foi desenhado no chão, utilizando fitas de papel, sendo que as bordas do papel representam as linhas a serem seguidas. O caminho a ser seguido pelo quadrimotor durante o experimento é semelhante ao das simulações, e é mostrado na Figura 5.7. O caminho é definido por duas linhas, e se inicia com as linhas paralelas ao eixo  $y$ . Após  $4,9\text{ m}$  a linha tem sua inclinação alterada em  $90^\circ$  para a direita, seguindo paralela ao eixo  $x$  por mais  $6,1\text{ m}$ . Um aclave e um declive da linha foram representados no experimento por uma variação na largura do caminho, sendo que na troca de inclinação a linha tem a sua largura dobrada, e no final do caminho a sua largura original. Essa variação de largura é interpretada pelo quadrimotor como uma variação de  $1,5\text{ m}$  de altura. Esse caminho foi escolhido pelos mesmos motivos anteriormente citados, e também para permitir comparar os resultados experimentais com as simulações.

A tarefa continua sendo seguir a linha do meio, tendo a orientação semelhante à direção da linha, permanecendo a  $1,5\text{ m}$  acima dela. A variação da altura desejada, que nas simulações era de  $1\text{ m}$ ,

é devido ao pequeno ângulo de abertura da câmera presente no AR.drone 2.0. Durante a etapa “Seguimento de Linha” a velocidade de avanço do quadrimotor deve ser de  $20\text{ cm/s}$ . O quadrimotor iniciou o experimento no chão, sobre o início do caminho, foi colocado em voo manualmente, e após se estabilizar foi iniciado o programa que realiza o controle do quadrimotor para realizar o seguimento de linha. O ângulo de guinada do quadrimotor coincide com a direção da linha a ser seguida, paralela ao eixo  $y$ , e a altura é metade da altura desejada,  $0,75\text{ cm}$  do chão, condições iniciais essas que foram escolhidas para verificar se o quadrimotor iria completar o caminho com o mínimo de controle humano (apenas decolar e pousar).

O AR.drone 2.0 possui uma característica que não foi incorporada no modelo, o fato do controlador interno conseguir forçar a parada e manter o quadrimotor parado quando os sinais de controle de velocidade tridimensional são nulos. Tal característica será utilizada na etapa “Ajuste de Guinada” para evitar que ele saia do ponto de encontro. Com isso, durante essa etapa o controle de altitude também não será realizado e o quadrimotor ficará parado sobre o mesmo ponto. Ou seja, durante a etapa “Ajuste de Guinada” apenas será controlado o ângulo de guinada. Além disso, como no sistema de controle proposto para o quadrimotor não deve realizar movimentos laterais, durante todo o experimento o sinal de controle de movimento lateral do quadrimotor será nulo.

Os gráficos da Figura 5.8 mostram com detalhes os dados de voo do quadrimotor durante o experimento. Nesses gráficos as linhas contínuas representam os valores medidos, as linhas tracejadas em vermelho correspondem aos valores desejados, e as linhas pontilhadas verticais representam as trocas de etapas do controlador. Os valores de velocidade foram medidos pelos sensores internos do próprio AR.drone 2.0, enquanto o ângulo e a altura foram medidos através das imagens da câmera.

A Figura 5.8a mostra o ângulo de guinada do quadrimotor em relação à linha a ser seguida. No início tal ângulo é calculado em relação à primeira parte do caminho, paralela ao eixo  $y$ , e a partir da etapa “Ajuste de Guinada” passa a ser calculado em relação à segunda parte do caminho, paralela ao eixo  $x$ . Essa variação de referencial é representada no gráfico pela variação brusca de  $0^\circ$  para  $90^\circ$  quando a etapa “Ajuste de Guinada” se inicia. Analisando esse gráfico, pode-se perceber que durante



Figura 5.7: Caminho a ser percorrido pelo quadrimotor no experimento.

a primeira parte do percurso o ângulo foi próximo de zero e quase não sofreu variações. Isso se deve ao fato que durante o experimento o quadrimotor iniciou seu voo próximo da linha, e portanto não teve que realizar uma grande variação de ângulo para corrigir o seu posicionamento em relação à linha a ser seguida, ao contrário do que ocorreu nas simulações. Na etapa “Ajuste de Guinada” o ângulo é ajustado para seguir a nova linha, e tem seu valor reduzido de  $90^\circ$  a  $0^\circ$ . Após o ajustar o ângulo, devido a estar mais afastado da linha que no início da simulação, por causa de variações indesejadas das velocidades, o ângulo de guinada teve que sofrer alterações maiores.

A Figura 5.8b mostra a altitude em relação à linha a ser seguida, medida pela visão, traçada em azul, em comparação com a altura desejada ( $1,5\text{ m}$ ), correspondente à linha preta, e com a altura medida pelo ultrassom, representada pela linha verde. Pode-se perceber que no início o quadrimotor alcançou a altura desejada e se manteve próximo a ela durante todo o percurso. Durante a etapa “Ajuste de Guinada” a altura não foi medida pelas imagens, mas o sensor à base de ultrassom a bordo

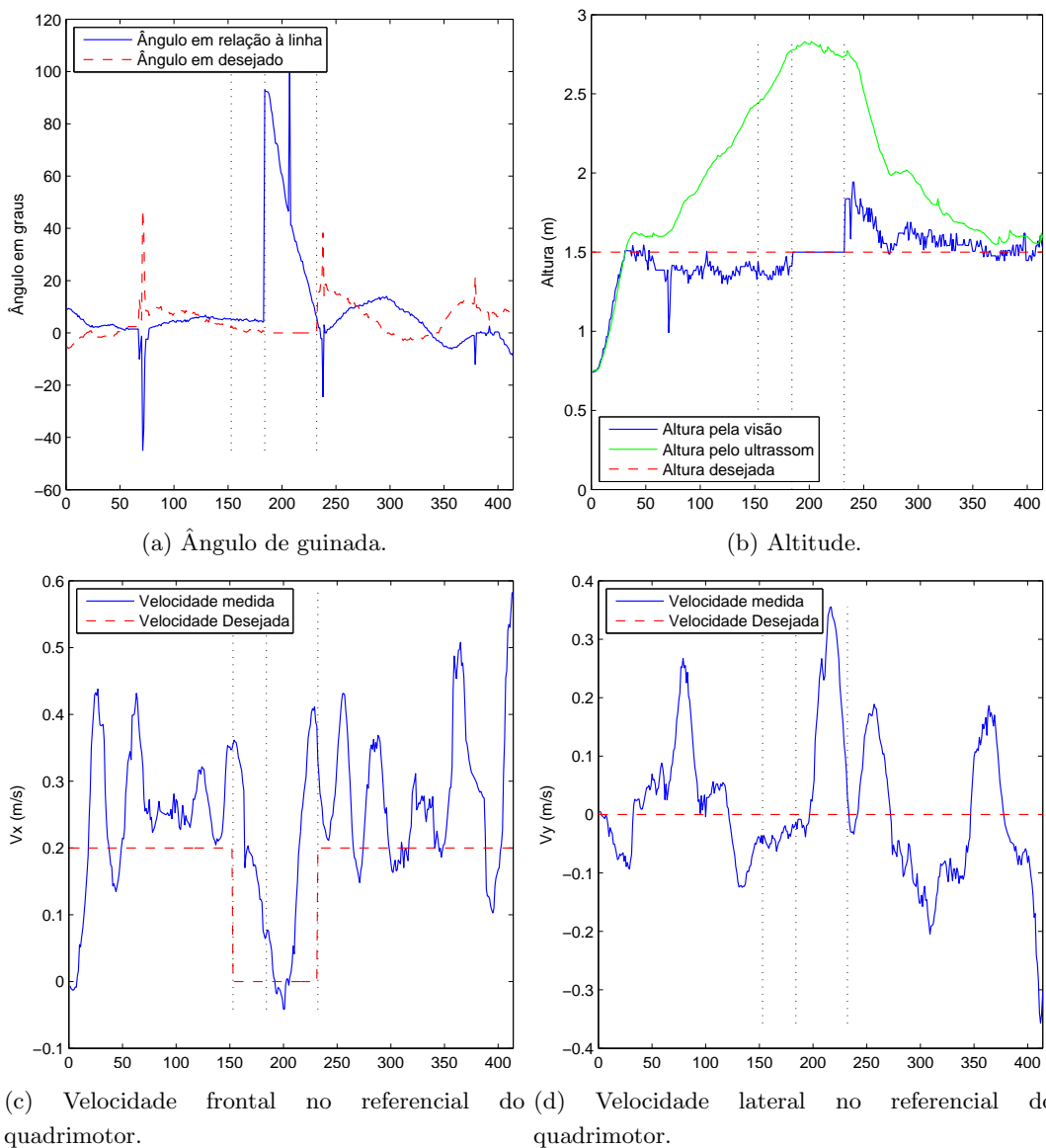


Figura 5.8: Gráficos correspondentes ao experimento com o quadrimotor.

do quadrimotor confirma que ela permaneceu praticamente constante nessa etapa. Ao voltar a seguir a linha, a altura apresenta uma variação positiva, o que se deve ao fato do quadrimotor estar adiantado no percurso, e como nessa etapa a largura da linha está se reduzindo, a altura do quadrimotor em relação à linha aumenta. Mas ao analisar pela altura medida pelo sensor ultrassônico se percebe que a variação de altura não foi tão expressiva. Pela curva da altura medida pelo sensor ultrassônico se nota que o quadrimotor se elevou a até quase  $3\text{ m}$  e depois retornou para  $1,5\text{ m}$ , como era desejado.

A Figura 5.8c permite a análise da velocidade de avanço, e nela se percebe que o controlador conseguiu levar a velocidade de avanço para o valor desejado ( $20\text{ cm/s}$ ) durante a etapa “Seguimento de Linha”. Durante essa etapa aconteceram algumas sobrelevações da velocidade, mas sempre voltando para a velocidade desejada. Ao trocar de etapa, quando da detecção da segunda linha na imagem, a velocidade de avanço cai para próximo de zero, e então o veículo altera a sua orientação para coincidir com a da próxima linha. No início da etapa “Ajuste de Guinada”, a velocidade cai até  $0\text{ cm/s}$ , porém na metade da etapa a velocidade cresce. Esse comportamento não é esperado e acaba retirando o quadrimotor do ponto de encontro das linhas. Porém, mesmo com esse evento o quadrimotor consegue completar o percurso. Já a Figura 5.8d mostra a velocidade lateral do quadrimotor. Nela é fácil perceber que aconteceram uma série de variações de velocidade indesejadas. Tais variações são devidas aos erros de *drift* que ocorrem na IMU disponível a bordo do veículo, causando seu deslocamento nas direções  $x$  e  $y$ , principalmente. Esse fato acaba afastando o quadrimotor da linha a ser seguida, mas mesmo com essas variações o sistema consegue completar o percurso.

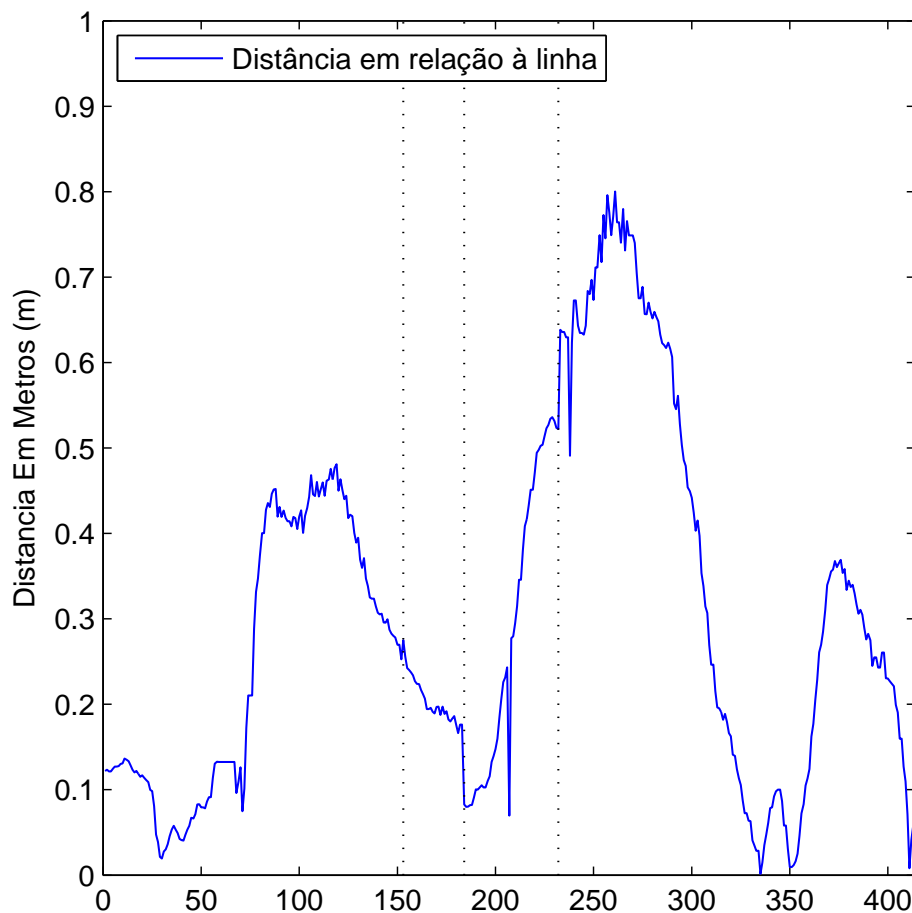


Figura 5.9: Distância horizontal entre o quadrimotor e a linha sendo seguida no experimento.

---

Por fim, a Figura 5.9 mostra a distância horizontal entre o quadrimotor e a linha média sendo seguida. O quadrimotor inicia seu voo aproximando-se da linha, porém devido às variações indesejadas na velocidade lateral (ver Figura 5.8d), o quadrimotor acaba se afastando da linha. Mas o sistema de controle faz com que quadrimotor se aproxime da linha novamente, corrigindo esses deslocamentos, e com isso o quadrimotor consegue completar o percurso com sucesso.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos Futuros

O objetivo dessa Dissertação é o desenvolvimento de um sistema supervisor, baseado em visão, que envia parâmetros para o controlador dinâmico do VANT permitindo que o mesmo consiga acompanhar linhas de transmissão. O primeiro passo desse projeto foi o desenvolvimento do sistema de visão para detectar as linhas de transmissão. As linhas são identificadas a partir de imagens capturadas por uma câmera a bordo do veículo, apontada para baixo. Para separar as linhas de transmissão do fundo da imagem foi utilizado o método de detecção de bordas de Canny. Como as linhas de transmissão podem ser interpretadas como segmentos de reta nas imagens, o método de Hough foi escolhido para detectar os segmentos de reta da imagem. Tal método conseguiu detectar as retas que representam as linhas de transmissão, porém em experimentos com o quadrimotor AR.drone 2.0 ocorreram algumas detecções erradas das linhas. Entre as detecções erradas, se destacaram a detecção de segmentos de reta que não pertenciam às linhas de transmissão, e a detecção de mais de um segmento de reta para a mesma linha de transmissão. Para solucionar tais erros foi desenvolvido um filtro que utiliza o padrão das linhas de transmissão nas imagens. Esse filtro trata os segmentos detectados através da transformada de Hough e retorna apenas um segmento de reta para cada linha de transmissão. O filtro foi testado nas imagens dos experimentos, e se mostrou adequado para eliminar as detecções erradas: em todos os casos testados o sistema retornou uma só linha de transmissão, corretamente, ou seja, sem erro na determinação de qual era a linha a ser efetivamente seguida.

Com as linhas de transmissão sendo detectadas com sucesso, foi desenvolvido um sistema capaz de determinar o posicionamento tridimensional e a orientação do veículo aéreo em relação às linhas de transmissão, ainda com base na informação visual. Simulações e experimentos foram realizados, que validaram o sistema. Completada a parte relativa a visão, o próximo passo foi o desenvolvimento do sistema supervisor. Para realizar o seguimento de linhas de transmissão, tendo em conta o fato de que uma linha de transmissão é formada por um conjunto de segmentos de reta conectados entre si, com eventual mudança de direção ao passar de um segmento para o segmento seguinte, tal sistema foi dividido em três etapas, “Seguimento de Linha”, “Posicionamento” e “Ajuste de Guinada”. O sistema supervisor analisa os resultados do sistema de visão, e manda os parâmetros de entrada para os controladores dinâmicos dos VANTs. Esses parâmetros dependem de qual é aquela das três etapas em que o sistema supervisor está. A etapa “Seguimento de Linha” corresponde a navegar ao longo de um segmento de reta, mantendo uma altura constante acima da linha e uma velocidade constante, o que exige a flexibilidade de aumentar ou diminuir a altitude do veículo para levar em conta aclives e declives ao longo de um trecho da linha. Já a etapa “Posicionamento” corresponde a



comandar o veículo aéreo para que este se posicione sobre o ponto em que ocorre a mudança de um segmento de reta para o seu subsequente. Uma vez que o veículo esteja posicionado sobre tal ponto, o sistema supervisorio entra na etapa "Ajuste de Guinada", que corresponde a comandar o veículo para que o mesmo se oriente, mudando seu ângulo de guinada, conforme a direção do segmento de reta que passará a ser seguido. Uma vez corrigida a orientação do veículo para que coincida com a direção da linha, o sistema supervisorio volta à etapa "Seguimento de Linha", e o ciclo se repete. Note-se que o resultado do sistema de visão também é utilizado pelo sistema supervisorio para realizar cada mudança de etapa.

Foram realizadas simulações para verificar o funcionamento do sistema supervisorio desenvolvido. Nessas simulações os VANTs precisavam completar um certo caminho formado por três linhas. Em todas as simulações eles completaram todo o percurso sobre a linha de transmissão, sempre mantendo a mesma inclinação que a linha. Por fim, o sistema supervisorio foi validado com experimentos reais, um dos quais foi analisado em detalhes. Nesse experimento o quadrimotor Ar.Drone 2.0, da Parrot, Inc., teve que completar um caminho parecido com o das simulações. No experimento o quadrimotor também mostrou bons resultados, e, assim como nas simulações, conseguiu completar o percurso. Consequentemente, pode-se dizer que o sistema proposto, levando em conta todos os eventos que podem ocorrer em termos de seguir uma linha de transmissão composta por segmentos de reta com distintas direções, incluindo a possibilidade de ocorrência de aclives e declives, foi validado, de forma que o objetivo dessa Dissertação foi atingido.

Como trabalhos futuros, propõe-se implementar uma fusão sensorial utilizando as imagens da câmera embarcada, as medidas fornecidas pelos sensores inerciais a bordo do veículo e dados fornecidos por um receptor de GPS. Além de fornecer informações de posicionamento e orientação mais precisas, este sistema baseado na fusão de dados também será útil nas situações em que o VANT eventualmente perder a imagem da linha de transmissão. Bastaria, por exemplo, que a linha fosse caracterizada por suas coordenadas GPS. Ele poderia usar informações do módulo de GPS apenas, podendo reposicionar-se para readquirir a visão da linha. Outra sugestão é utilizar cabos e postes ao invés de fitas de papel, para representar a linha de transmissão. Essa mudança permitiria ajustar o sistema de visão para uma situação mais próxima da realidade, e utilizar a detecção do poste para auxiliar na mudança de etapas do sistema supervisorio.

# Referências Bibliográficas

- [Alperin et al., 2008] Alperin, Y., Graves, R., Jerry, C., McClintok, J., e Sobel, E. (2008). Design and control of an autonomous helicopter. Relatório técnico, Worcester Polytechnic Institute.
- [Amidi et al., 1998] Amidi, O., Kanade, T., e Fujita, K. (1998). A visual odometer for autonomous helicopter flight. *Intelligent Autonomous Systems, IOS Press, Amsterdam*, páginas 123–130.
- [ANEEL, ] ANEEL. Plano mínimo de manutenção.
- [Blas et al., 2008] Blas, M., Agrawal, M., Sundaresan, A., e Konolige, K. (2008). Fast color/texture segmentation for outdoor robots. Em *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, páginas 4078–4085. IEEE.
- [Bourquardez et al., 2009] Bourquardez, O., Mahony, R., Guenard, N., Chaumette, F., Hamel, T., e Eck, L. (2009). Image-based visual servo control of the translation kinematics of a quadrotor aerial vehicle. *IEEE Trans. on Robotics*, 25(3):743–749.
- [Brandao et al., 2013] Brandao, A., Sarapura, J., Sarcinelli-Filho, M., e Carelli, R. (2013). Homography-based pose estimation to guide a miniature helicopter during 3d-trajectory tracking. *Latin American Applied Research*, 43(3):281–286.
- [Brandao, 2013] Brandao, A. S. (2013). *Projeto de controladores não lineares para vôo autônomo de veículos aéreos de pás rotativas*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [Cambron e Northrup, 2006] Cambron, M. E. e Northrup, S. G. (2006). Calibration of a pole-mounted camera using a neural network. Em *System Theory, 2006. SSST'06. Proceeding of the Thirty-Eighth Southeastern Symposium on*, páginas 265–269. IEEE.
- [Canny, 1986] Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6):679–698.
- [Duan e Liu, 2010] Duan, H. e Liu, S. (2010). Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: Current status and prospects. *Science China, Technological Sciences*, 53(5):1349–1355.
- [Falcon et al., 2013] Falcon, P., Barreiro, A., e Cacho, M. D. (2013). Modeling of parrot ardrone and passivity-based reset control. Em *Control Conference (ASCC), 2013 9th Asian*, páginas 1–6. IEEE.
- [Golightly e Jones, 2005] Golightly, I. e Jones, D. (2005). Visual control of an unmanned aerial vehicle for power line inspection. Em *Advanced Robotics, 2005. ICAR'05. Proceedings., 12th International Conference on*, páginas 288–295. IEEE.

- [Gong, ] Gong, B. Csc5280 project 1: Canny edge detection.
- [Gonzales e Woods, 2001] Gonzales, R. C. e Woods, R. E. (2001). *Tradução de Digital Image Processing*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 2nd edição.
- [Hartley e Zisserman, 2003] Hartley, R. e Zisserman, A. (2003). *Tradução de Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press.
- [Hernandez et al., 2013] Hernandez, A., Copot, C., De Keyser, R., Vlas, T., e Nasco, I. (2013). Identification and path following control of an ar. drone quadrotor. Em *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2013 17th International Conference*, páginas 583–588. IEEE.
- [Hsieh et al., 2007] Hsieh, M. A., Chaimowicz, L., Cowley, A., Grocholsky, B., Keller, J. F., Kumar, V., Taylor, C. J., Endo, Y., Arkin, R. C., Jung, B., Wolf, D. F., Sukhatme, G., e MacKenzie, D. C. (2007). Adaptive teams of autonomous aerial and ground robots for situational awareness. *Journal of Field Robotics*, 24(11-12):991–1014.
- [Kendoul et al., 2010] Kendoul, F., Yu, Z., e Nonami, K. (2010). Guidance and nonlinear control system for autonomous flight of minirotorcraft unmanned aerial vehicles. *Journal of Field Robotics*, 27(3):311–334.
- [Kim et al., 2010] Kim, J., Kang, M.-S., e Park, S. (2010). Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor vtol aircraft. Em *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009*, páginas 9–26. Springer.
- [Krajník et al., 2011] Krajník, T., Vonásek, V., Fišer, D., e Faigl, J. (2011). Ar-drone as a platform for robotic research and education. Em *Research and Education in Robotics-EUROBOT 2011*, páginas 172–186. Springer.
- [Li et al., 2010] Li, Z., Liu, Y., Walker, R., Hayward, R., e Zhang, J. (2010). Towards automatic power line detection for a uav surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved hough transform. *Machine Vision and Applications*, 21(5):677–686.
- [Lima II et al., ] Lima II, E. J., Bomfim, M. H., Bracarense, A. Q., Gontijo, R. A., Mourão, M., Almeida, C. V., Barreto, A., e Reis, M. A. Robô autônomo para inspeção de linhas de alta tensão.
- [Pizetta, 2013] Pizetta, I. H. B. (2013). Uma plataforma para suporte à navegação autônoma de veículos aéros de pás rotativas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [Rangel et al., 2009] Rangel, R. K., Kienitz, K. H., e Brandão, M. P. (2009). Sistema de inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando veículos aéreos não-tripulados. Em *3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control ocorrido entre*, páginas 14–16.
- [Santana, 2011] Santana, L. V. (2011). Control de altitude e ângulo de guinada de um mini-helicóptero. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [Santos et al., 2015a] Santos, M. C., Santana, L. V., Brandao, A. S., e Sarcinelli-Filho, M. (2015a). Uav obstacle avoidance using rgb-d system. Em *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, páginas 312–319. IEEE.
- [Santos et al., 2015b] Santos, M. C., Santana, L. V., Martins, M. M., Brandao, A. S., e Sarcinelli-Filho, M. (2015b). Estimating and controlling uav position using rgb-d/imu data fusion with decentralized information/kalman filter. Em *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, páginas 232–239. IEEE.

- [Tournier et al., 2006] Tournier, G. P., Valenti, M., How, J. P., e Feron, E. (2006). Estimation and control of a quadrotor vehicle using monocular vision and moire patterns. Em *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, páginas 21–24.
- [Vago Santana et al., 2014] Vago Santana, L., Brandao, A. S., Sarcinelli-Filho, M., e Carelli, R. (2014). A trajectory tracking and 3d positioning controller for the ar. drone quadrotor. Em *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*, páginas 756–767. IEEE.
- [Zhao et al., 2006] Zhao, Q., Wang, F., e Sun, Z. (2006). Using neural network technique in vision-based robot curve tracking. Em *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*, páginas 3817–3822. IEEE.