

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE COMPUTAÇÃO  
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FERNANDO PADILHA FERREIRA

**QUADRICÓPTERO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MEDIANEIRA**

**2016**

**FERNANDO PADILHA FERREIRA**

## **QUADRICÓPTERO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Bacharel em Computação”.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Vieira Neto

**MEDIANEIRA**

**2016**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **QUADRICÓPTERO**

Por

**FERNANDO PADILHA FERREIRA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às xx:xxh do dia X de mês de 20XX como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no Curso de Ciência da Computação, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Fulano  
UTFPR - Câmpus Medianeira

---

Prof. Fulano  
UTFPR - Câmpus Medianeira

---

Prof. Fulano  
UTFPR - Câmpus Medianeira

---

Prof. Fulano  
UTFPR - Câmpus Medianeira

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## RESUMO

FERREIRA, Fernando Padilha. QUADRICÓPTERO. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

Incluir o resumo aqui para testes de bla bla bla bla Incluir o resumo aqui para testes de bla bla bla bla Incluir o resumo aqui para testes de bla bla bla bla Incluir o resumo aqui para testes de bla bla bla bla

**Palavras-chave:** quadricóptero, multi-rotor, VTOL

## **ABSTRACT**

FERREIRA, Fernando Padilha. QUADROTOR. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here Include the abstract here.

**Keywords:** quadrotor, multi-rotor, VTOL

Dedicatória do trabalho (opcional).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos do trabalho (opcional).

Epígrafe do trabalho (opcional).



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Texto que vai aparecer na lista de fig. ....	14
FIGURA 2	– Séries temporais artificiais geradas através de modelos sazonais ....	14
FIGURA 3	– Texto que vai aparecer na lista de fig. ....	20

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Texto da lista de tabelas .....	14
TABELA 2	– Características das ST disponíveis pela <i>NNGC I.</i> ....	16
TABELA 3	– Cronograma .....	28

## **LISTA DE SIGLAS**

VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VTOL	Vertical Take-Off and Landing
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
FAI	Federação Aeronáutica Internacional
ILC	Iterative Learning Control
PID	Proporcional Integral Derivativo
LQ	Linear Quadrático
MPC	Model Predictive Control
ESC	Eletronic Speed Control
SMD	Surface Mounted Device
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	12
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	13
1.3	EXEMPLOS GERAIS QUE PODEM SER USADOS NO TCC	13
1.3.1	Titulo C	13
<b>2</b>	<b>LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO</b>	<b>19</b>
2.1	HISTÓRIA DOS QUADRICÓPTEROS	19
2.1.1	Teste de Terceiro Nível	20
2.2	TRABALHOS CORRELATOS	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>RECURSOS DE HARDWARE E SOFTWARE</b>	<b>25</b>
4.1	RECURSOS DE HARDWARE	25
4.2	RECURSOS DE SOFTWARE	26
<b>5</b>	<b>VIABILIDADE E CRONOGRAMA PRELIMINAR</b>	<b>27</b>
5.1	VIABILIDADE	27
5.2	CRONOGRAMA PRELIMINAR	27
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>29</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>30</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As aplicações dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) há décadas atraem pesquisadores de diversas partes do mundo e tem gerado muitas pesquisas. Na última década, os avanços em materiais, componentes eletrônicos, sensores e baterias permitiram grandes avanços no desenvolvimento destes veículos. A utilização de VANTs permite retirar o ser humano de condições de alta periculosidade e permitir um maior grau de liberdade e flexibilidade, abrindo possibilidades em tarefas que seriam impraticáveis para um veículo tripulado.

Entre os diversos tipos de VANTs, os helicópteros tem grande destaque, em especial os elétricos. Classificados como VTOL (do inglês, *Vertical Take-Off and Landing*), eles se diferenciam pelas seguintes características: 1) possui alta capacidade de carga; 2) possui seis graus de liberdade<sup>1</sup>, que permite maior manobrabilidade; 3) capacidade de miniaturização; 4) precisam de pouco espaço para pouso e decolagem; e 5) podem ser utilizados em ambientes internos e externos. No entanto, apresentam menor autonomia de voo em relação a outros VANTs e são mais difíceis de controlar.

Além dos helicópteros convencionais, com um rotor principal e um auxiliar na cauda, existem os multi-rotor, com dois ou mais rotores principais. A topologia com quatro rotores, dispostos em forma de “+” ou de “X” em uma plataforma, chamada de quadricóptero, é uma das mais pesquisadas devido à sua simplicidade mecânica e à desafiadora tarefa de estabilização de voo.

O primeiro quadricóptero foi construído pelos irmãos Louis e Jaques Breguet, em 1907, época em que se desenvolviam os primeiros aviões e helicópteros (LEISHMAN, 2000). Devido a falta de estabilidade e de meios de controle, ele só foi capaz de levantar voo por alguns segundos. Nas décadas seguintes outras iniciativas conseguiram grandes avanços, superando os helicópteros convencionais em tempo de voo, contudo, apresentando complexos meios de controle. Nos anos seguintes, avanços significativos ocorreram nos helicópteros e o quadricópteros foram rapidamente ultrapassados e esquecidos.

O interesse por quadricópteros só foi reaparecer em meados de 1993, agora como VANT, no projeto Hoverbot, da Universidade de Michigan (BORENSTEIN, 1993). Este, como

---

<sup>1</sup>O helicóptero possui seis graus de liberdade: rotação e translação nos eixos X, Y e Z.

outros projetos desenvolvidos na sequência, sofreu com dificuldades de estabilização e não foi bem sucedido. Em 2002, na Universidade da Pensilvânia, houve um dos primeiros casos de sucesso com o projeto de Altug et al. (2002). Seguido de vários outros, como (NICE, 2004), (HOFFMANN et al., 2004) e (BOUABDALLAH, 2007), tratando da estabilização de voo. Esses avanços em grande parte foram possíveis devido aos avanços dos sensores MEMS.

Alguns projetos conseguiram ótimos resultados utilizando realimentação visual para estimar a posição do veículo, como é o caso das equipes do Laboratório GRASP, da Universidade da Pensilvânia, e da Flying Machine Arena, dos Institutos Federais de Tecnologia da Suíça. Suas capacidades incluem manobras em alta velocidade, apresentações musicais e captura de bolas em voo. No entanto, estes veículos não são autônomos e requerem um processamento externo (LUPASHIN et al., 2010; MICHAEL et al., 2010).

No Brasil poucos trabalhos foram publicados nesse tema. A dissertação de mestrado de Melo (2010), da Universidade Federal do Espírito Santo, propõe um quadricóptero como plataforma para desenvolvimento de algoritmos de controle e em Lopes et al. (2011), o modelo matemático de um quadricóptero é utilizado para simular e avaliar técnicas de controle.

Na UTFPR, uma tentativa de construção de um quadricóptero foi realizada na disciplina Oficinas de Integração 2, do curso de Engenharia de Computação, por Filho et al. (2011). Apesar de não bem sucedida, a iniciativa despertou o interesse local, a exemplo do prof. Hugo Vieira, que comprou os materiais necessários para construção em um projeto futuro. Esses materiais, gentilmente cedidos, agora serão utilizados na elaboração deste projeto.

Além das aplicações militares, de vigilância e busca e resgate, que incentivaram as pesquisas iniciais nessa área, há um grande ramo de aplicações dos quadricópteros para fins acadêmicos. Estes podem ser utilizados no ensino de diversas áreas, como: algoritmos de controle, para estabilização; inteligência artificial, para detecção e desvio de obstáculos; processamento de imagens; sistemas multi-agentes, no estudo de comportamento coletivo; entre outras. Este projeto seria o primeiro passo para posterior utilização em outros projetos.

## 1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Esse trabalho tem como objetivo desenvolver um quadricóptero elétrico autônomo, capaz de voar a uma altura fixa e evitar colisões. Esse objetivo principal pode ser dividido nos seguintes objetivos específicos:

- projetar e montar a estrutura física;
- modelar o sistema;
- projetar e implementar o sistema de comunicação;
- projetar e construir o sistema embarcado;
- projetar e implementar o sistema de controle;
- idealizar e conduzir experimentos reais de teste de navegação.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esse documento será organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresentará inicialmente uma breve história do desenvolvimento dos quadricópteros. Em seguida, são apresentados os trabalhos correlatos recentes, com o intuito de situar este trabalho no estágio atual do conhecimento. A metodologia utilizada se encontra no Capítulo 3, nele são descritas todas as etapas para o desenvolvimento do projeto. No Capítulo 4 são listados os recursos de *software* e *hardware* utilizados, bem como a forma de aquisição de cada um. O estudo de viabilidade e um cronograma preliminar são apresentados no Capítulo 5 e, por fim, no Capítulo 6 encontra-se a conclusão da proposta do trabalho de conclusão de curso.

## 1.3 EXEMPLOS GERAIS QUE PODEM SER USADOS NO TCC

### 1.3.1 Título C

.....Teste de citação de autor: (AIKES JUNIOR et al., 2011). Podendo ser também AIKES JUNIOR et al. (2011), dependendo do contexto. ....Teste de referência de seção, capítulo ou figura: Capítulo 1 = (Introdução), Figura 3 (Figura Tux), Tabela ?? (Tabela).

Exemplo de Equação não numerada:  $3 \times \sum_{i=0}^j \Delta$ .

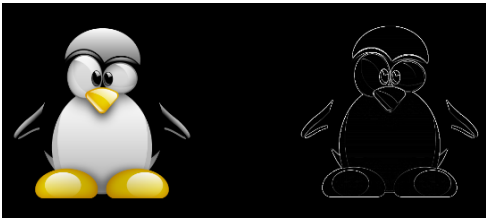
A Equação 1 é um exemplo de uma equação numerada:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2 \times a}$$

(1)

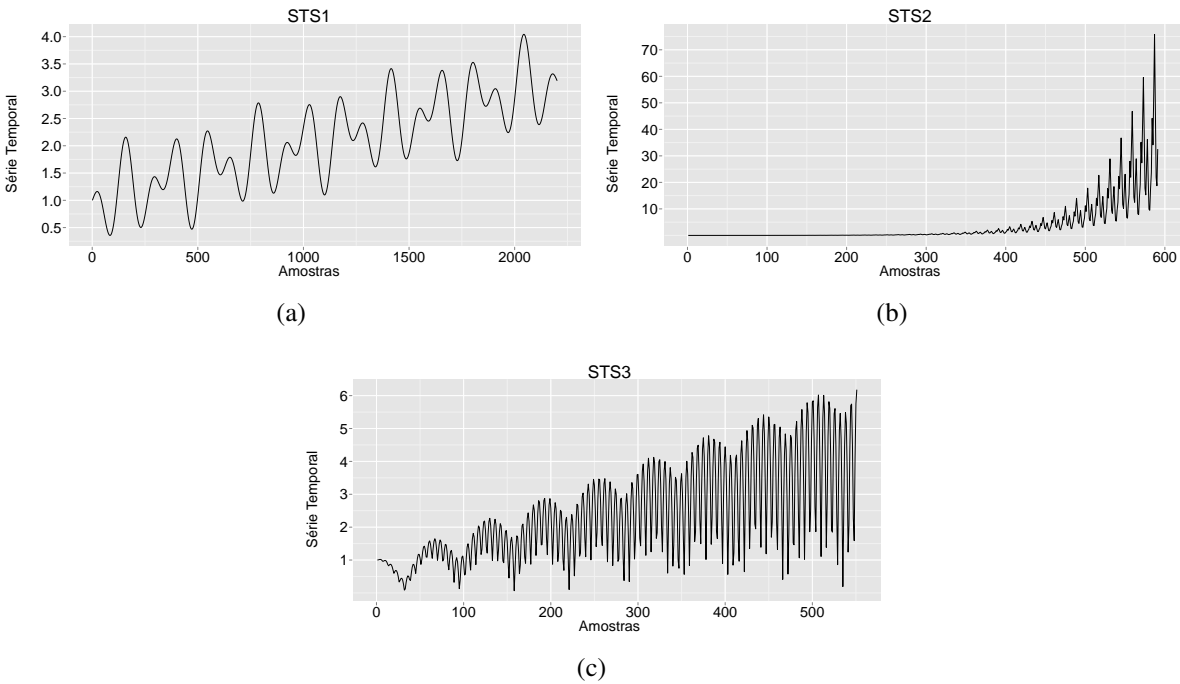
3 × 3 3 × 3

Modelo de chamada de figura.



**Figura 1 – Texto que vai aparecer embaixo da imagem.**  
**Fonte: (FILHO; NETO, 1999)**

Modelo de chamada de subfiguras:



**Figura 2 – Séries temporais artificiais geradas através de modelos sazonais: (a) STS1, (b) STS2 e (c) STS3.**

Modelo de tabela.

Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3
Conteúdo 1	Conteúdo 2	Conteúdo 3

**Tabela 1 – Texto abaixo da tabela.**



Exemplo de algoritmo: No Algoritmo 1 (FERRERO, 2009) é apresentado o pseudocódigo, em alto nível, do algoritmo, onde:

- $Z$  representa a ST utilizada;
- $w$  representa o tamanho da janela para busca das sequências;
- $M_s$  representa a medida de similaridade utilizada;
- $C_k$  representa o critério utilizado para a seleção dos vizinhos próximos;
- $k$  representa a quantidade de vizinhos mais próximos; e
- $f$  representa a função de previsão utilizada para o cálculo do valor futuro.

**Entrada:**  $Z, w, M_s, C_k, k, f$

**Saída:**  $\hat{z}_{n+1}$ ;

**inicio**

```
// Construção do conjunto de séries de treinamento  $S$  a partir da série
temporal  $Z$ 
// e tamanho de janela  $w$ 
 $S \leftarrow \text{series\_de\_treinamento}(Z, w)$ ;
// Definição da sequência de referência  $U$ 
 $U \leftarrow (z_n)$ ;
// Obtenção das  $k$  sequências mais próximas a  $U$  contidas em  $S$ , considerando
a
// medida de similaridade  $M_s$  e o critério de seleção de vizinhos próximos  $C_k$ 
 $S' \leftarrow \text{vizinhos\_proximos}(S, U, M_s, C_k, k)$ ;
// Cálculo do valor futuro da sequências de referências, utilizando  $f(S')$ 
 $\hat{z}_{n+1} \leftarrow f(S')$ ;
retorna  $\hat{z}_{n+1}$ 
```

**fin**

**Algorithm 1:**  $k$ -NNTSP.

Exemplo de trecho de código.

```
1  /**
2  * comentario
3  */
4  public class HelloWorldApp {
5      public static void main (String argv[])
6      {
7          // Comentario
8          System.out.println("Hello World!");
9      }
10 }
```

**Código 1.1 – Teste de Hello World**

Exemplo de tabela que ocupa mais de uma página (long tables):

**Tabela 2 – Características das ST disponíveis pela *NNGC I*.**

<b>Id</b>	<b>Base de Dados</b>	<b>Aquisição</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Início</b>	<b>Término</b>
1.B-001	1.B	Quaternal	40	jan-1993	abr-2002
1.B-002	1.B	Quaternal	31	jan-1990	mar-1997
1.B-003	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.B-004	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.B-005	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.B-006	1.B	Quaternal	108	jan-1977	abr-2003
1.B-007	1.B	Quaternal	108	jan-1977	abr-2003
1.B-008	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.B-009	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.B-010	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.B-011	1.B	Quaternal	148	jan-1967	abr-2003
1.C-001	1.C	Mensal	48	jan-1999	dez-2002
1.C-002	1.C	Mensal	48	jan-1999	dez-2002
1.C-003	1.C	Mensal	198	set-1987	fev-2004
1.C-004	1.C	Mensal	172	jan-1990	abr-2004
1.C-005	1.C	Mensal	118	out-1993	jul-2003
1.C-006	1.C	Mensal	118	out-1993	jul-2003
1.C-007	1.C	Mensal	118	out-1993	jul-2003
1.C-008	1.C	Mensal	57	abr-1998	dez-2002
1.C-009	1.C	Mensal	227	jan-1983	nov-2001
1.C-010	1.C	Mensal	132	abr-1993	mar-2004
1.C-011	1.C	Mensal	228	mar-1986	fev-2005

Continua na página seguinte.

Tabela 2 – Características das ST disponíveis pela *NNGC I*.

Continuação da página anterior.					
<b>Id</b>	<b>Base de Dados</b>	<b>Aquisição</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Início</b>	<b>Término</b>
1.D-001	1.D	Semanal	527	02-jan-1995	31-jan-2005
1.D-003	1.D	Semanal	437	03-jan-1997	13-mai-2005
1.D-004	1.D	Semanal	549	11-nov-1994	13-mai-2005
1.D-005	1.D	Semanal	437	03-jan-1997	13-mai-2005
1.D-006	1.D	Semanal	618	16-jul-1993	13-mai-2005
1.D-007	1.D	Semanal	618	16-jul-1993	13-mai-2005
1.D-008	1.D	Semanal	548	18-nov-1994	13-mai-2005
1.D-009	1.D	Semanal	548	18-nov-1994	13-mai-2005
1.D-010	1.D	Semanal	593	07-jan-1994	13-mai-2005
1.D-011	1.D	Semanal	594	10-jan-1994	23-mai-2005
1.E-001	1.E	Diária	377	01-jan-2005	12-jan-2006
1.E-002	1.E	Diária	377	01-jan-2005	12-jan-2006
1.E-004	1.E	Diária	466	07-fev-2003	17-mai-2004
1.E-005	1.E	Diária	716	01-jan-2002	17-dez-2003
1.E-006	1.E	Diária	502	01-jan-2002	17-mai-2003
1.E-007	1.E	Diária	502	01-jan-2002	17-mai-2003
1.E-008	1.E	Diária	747	01-nov-2003	16-nov-2005
1.E-009	1.E	Diária	747	01-nov-2003	16-nov-2005
1.E-010	1.E	Diária	654	01-jul-2003	14-abr-2005
1.E-011	1.E	Diária	654	01-jul-2003	14-abr-2005
1.F-003	1.F	Horária (5:00-24:00)	1742	02-jan-2005	29-mar-2005
1.F-004	1.F	Horária (5:00-24:00)	902	05-set-2005	19-out-2005
1.F-005	1.F	Horária (5:00-24:00)	902	05-set-2005	19-out-2005
1.F-006	1.F	Horária (5:00-24:00)	1742	02-jan-2005	29-mar-2005
1.F-007	1.F	Horária (5:00-24:00)	1742	02-jan-2005	29-mar-2005

Continua na página seguinte.

Tabela 2 – Características das ST disponíveis pela *NNGC I*.

Continuação da página anterior.					
<b>Id</b>	<b>Base de Dados</b>	<b>Aquisição</b>	<b>Tamanho</b>	<b>Início</b>	<b>Término</b>
1.F-008	1.F	Horária (5:00-24:00)	1742	02-jan-2005	29-mar-2005
1.F-009	1.F	Horária (5:00-24:00)	902	05-set-2005	19-out-2005
1.F-010	1.F	Horária (5:00-24:00)	902	05-set-2005	19-out-2005
1.F-011	1.F	Horária (5:00-24:00)	902	05-set-2005	19-out-2005

## 2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Nessa seção será descrito o estado da arte do tema escolhido. Primeiramente será dado uma breve história do desenvolvimento dos quadricópteros e, em seguida, serão apresentados os trabalhos correlatos recentes.

### 2.1 HISTÓRIA DOS QUADRICÓPTEROS

O desenvolvimento dos primeiros quadricópteros começou a mais de um século. Em 1907, os irmãos franceses Louis e Jaques Breguet construíram o primeiro quadricóptero pilotado, chamado de *Gyroplane nº 1* (LEISHMAN, 2000). A estrutura era constituída por quatro vigas, formadas de tubos de aço, dispostas em formato de cruz e com um lugar para o piloto ao centro, próximo ao motor. No entanto, devido a falta de estabilidade e de meios de controle, ele só foi capaz de levantar voo por alguns segundos.

Nas décadas seguintes houve grandes avanços em desempenho e controle dos quadricópteros. Em 1922, G. de Bothezat, um imigrante russo nos Estados Unidos, conseguiu realizar vários voos a baixas altitudes e baixas velocidades. Em 1924, o francês E. Oehmichen recebeu um prêmio da FAI por demonstrar um voo do seu quadricóptero em um circuito fechado de 1 km, com duração de 7 minutos e 40 segundos. Foi o primeiro helicóptero conseguir percorrer essa distância. Ambos os projetos foram cancelados por serem impraticáveis para uso real e pelo alto custo de desenvolvimento.

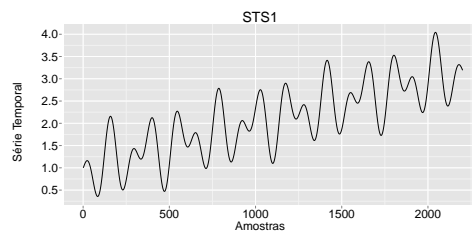
Alguns anos depois, em 1956, nos Estados Unidos, o Convertawings Modelo A reviveu os projetos de Bothezat e Oehmichen (LAMBERMONT, 2013). Inventado por D. H. Kaplan, esse quadricóptero tinha os quatro rotores posicionados em forma de “H”, ao invés de “+”, como nos anteriores. Apesar de ter sido testado com sucesso, o apoio do Exército dos EUA foi encerrado.

O interesse pelos quadricópteros caiu com o início da comercialização de helicópteros convencionais, de um ou dois rotores, e só foi retomado na década de 90, desta vez no contexto

de VANTs.

### 2.1.1 Teste de Terceiro Nível

aaaa



**Figura 3 – Texto que vai aparecer embaixo da imagem.**

**Fonte: AIKES JUNIOR et al. (2011)**

## 2.2 TRABALHOS CORRELATOS

Os desenvolvimentos recentes em materiais mais leves, componentes eletrônicos, motores elétricos, baterias e, principalmente, MEMS, permitiram que os VANTs se tornassem realidade. Com isso, muitos projetos de quadricópteros foram desenvolvidos independentemente

Um dos primeiros projetos de quadricóptero VANT publicados foi o Hoverbot, em 1993 na Universidade de Michigan, construído basicamente pela união de quatro helicópteros de brinquedo pela cauda. O projeto foi rapidamente abandonado pelas dificuldades na construção do *hardware*, mas conseguiu planar com o auxílio de uma estrutura que inibia seus movimentos horizontais (BORENSTEIN, 1993).

O projeto Mesicopter, desenvolvido em 2001 na Universidade de Stanford, buscava desenvolver quadricópteros na escala de centímetros e com massa de 3 a 15g. Sua aplicação seria para coleta de dados atmosféricos ou metereológicos em grandes áreas ou planetas. No

entanto, ele nunca foi capaz de levantar o peso da sua fonte de alimentação (KROO; PRINZ, 2001).

Em 2002, na Universidade da Pensilvânia, E. Altug desenvolveu um quadricóptero baseado em realimentação visual. O sistema de visão usa câmeras no solo para estimar a posição e a orientação, baseado em círculos coloridos dispostos no veículo, que servem de entrada para o sistema de controle, cuja saída é enviada ao quadricóptero. Duas técnicas de controle foram testadas: *feedback linearization* e *backstepping*. O veículo utilizado foi baseado no brinquedo HMX-4 (ALTUG et al., 2002).

Outro estudo foi a dissertação de mestrado de E. B. Nice, realizado em 2004 na Universidade de Cornell. Seu trabalho envolveu desenvolvimento completo da estrutura e controle. Foram utilizados um Filtro Sigma Point para estimar o estado e um controle LQR para estabilização. O veículo final pesava 6,2 kg. Durante os testes foi comprovada sua capacidade de planar a uma altura fixa, porém não foi possível completar os testes devido a falhas no *hardware* (NICE, 2004). O projeto teve continuidade com o trabalho de Oliver Purwin, em 2009, no qual foi utilizado *Iterative Learning Control* (ILC, do inglês, controle por aprendizado iterativo) para realizar manobras agressivas (PURWIN; D'ANDREA, 2009). Desta vez não ocorreram problemas e os testes foram bem sucedidos.

Em 2003, no Instituto Federal de Tecnologia da Suíça, S. Bouabdallah começou o desenvolvimento de um quadricóptero chamado OS4. O projeto visava um sistemático processo de modelagem, desenvolvimento e controle de helicópteros miniatura, o qual foi aplicado no OS4. Foram testados cinco tipos de controladores: baseado na teoria de Lyapunov, PID (Proporcional Integral Derivativo), LQ (Linear Quadrático), *backstepping* e *sliding-mode*. Por fim, foi escolhida a técnica de *backstepping* incrementada com ação integral. O projeto teve sua conclusão em 2007, com a defesa da tese de doutorado de Bouabdallah (BOUABDALLAH, 2007).

Em 2004, foi criado um projeto na Universidade de Stanford com o intuito de testar e validar algoritmos de controle multi-agentes, chamado de STARMAC. Alguns campos de estudo foram: detecção de obstáculos e colisão com outros veículos, formação de voo e seguir trajetória, usando técnicas centralizadas ou descentralizadas. Para seu controle foram utilizadas três técnicas: *Integral Sliding Mode*, *Reinforcement Learning* e filtros de Kalman. O quadricóptero utilizado era uma modificação do brinquedo Draganflyer III, foi um dos primeiros projetos a trabalhar em ambiente externo (*outdoor*). O projeto teve continuidade com em 2007, o STARMAC II, com uma versão própria do quadricóptero e com melhorias no desempenho do controlador (HOFFMANN et al., 2004; HOFFMANN et al., 2007).

Outros dois projetos de grande interesse, com características bem semelhantes, mas

desenvolvidos independentemente, são os projetos do Laboratório GRASP da Universidade da Pensilvânia e da Flying Machine Arena do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça. Ambos utilizam versões modificadas do quadricóptero “Hummingbird”, vendido pela Ascending Technologies, como também o sistema de captura de movimentos Vicon, que provê a posição do quadricóptero a uma taxa de 200 Hz e com precisão milimétrica (LUPASHIN et al., 2010; MICHAEL et al., 2010). Ao contrário da maioria trabalhos anteriores, esses veículos não são autônomos, eles dependem de um processamento externo para calcular seu próximo movimento, reduzindo o processamento embarcado. Apesar das limitações impostas pelo sistema de câmeras, a precisão obtida permitiu a realização de tarefas complexas, inalcançáveis até hoje com os quadricópteros autônomos .

Estão em desenvolvimento novas alternativas para navegação autônoma baseadas no mapeamento em 3D do ambiente. As abordagens incluem o uso de scanners a LASER (DRYANOVSKI et al., 2011), sensores Microsoft Kinect (STOWERS et al., 2011) ou ambos (SHEN et al., 2012).

No Brasil poucos trabalhos foram publicados nesse tema. A dissertação de mestrado de Melo (2010), da Universidade Federal do Espírito Santo, propõe um quadricóptero como plataforma para desenvolvimento de algoritmos de controle. Ele descreve os componentes utilizados, as placas microcontroladas desenvolvidas e a do software sistema embarcado implementação, fazendo a interface com o rádio, os sensores e os motores e deixando livre a implementação do algoritmo de controle. São realizados testes de comunicação, leitura dos sensores e ativação dos motores, mas nenhum algoritmo de controle é testado para validar o funcionamento completo veículo. Em Lopes et al. (2011), o modelo matemático de um quadricóptero é utilizado para simular e avaliar técnicas de controle. É proposto o uso de um único controlador *Model Predictive Control* (MPC) para controlar posição e estabilidade do sistema, ao invés de dois controladores separados, como visto na literatura. Os resultados são comparados com controladores PID e *backstepping*, mostrando-se melhor que o primeiro e inferior ao segundo.



### 3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto. Serão descritas as etapas do projeto e os principais fundamentos e tecnologias a serem empregados.

O trabalho será composto por seis etapas:

1. Projetar e montar a estrutura física.
2. Modelar o sistema.
3. Projetar e implementar o sistema de comunicação.
4. Projetar e construir o sistema embarcado.
5. Projetar e implementar o sistema de controle.
6. Idealizar e conduzir experimentos reais de teste de navegação.

**Etapa 1:** essa etapa será destinada ao projeto, aquisição e montagem da estrutura física do quadricóptero. A estrutura é composta basicamente por um chassi, quatro motores, quatro hélices e uma bateria. Deverão ser analisados os recursos disponíveis no mercado ou passíveis de empréstimo capazes de satisfazer os requisitos do sistema. Ao final desta etapa, a estrutura deverá ser testada com o sistema eletrônico de um quadricóptero de controle remoto comercial, a fim de verificar suas capacidades básicas de voo.

**Etapa 2:** nessa fase será feita a modelagem matemática da estrutura física desenvolvida na etapa anterior. Essa modelagem é necessária para o projeto do sistema de controle que será desenvolvido na etapa 5. Apesar de ter um grande foco teórico, também serão necessários testes empíricos.

**Etapa 3:** aqui deverá ser desenvolvido o sistema de comunicação. Haverá dois canais de comunicação: um principal (quadricóptero-estação base), para definição de objetivos e coleta de dados, e um secundário (quadricóptero-controle remoto), de emergência, para que um humano possa assumir o controle. Deverão ser analisadas as tecnologias disponíveis, custo de implementação e integração com o sistema embarcado, a estação base e o controle remoto.

**Etapa 4:** essa etapa é destinada ao projeto e construção de um sistema embarcado microcontrolado para realização das funções do quadricóptero. O sistema deve ser capaz de realizar todas as tarefas em tempo real e de forma autônoma. Suas tarefas incluem: leitura dos sensores, comunicação, execução do sistema de controle de estabilidade e acionamento dos motores. Pode ser escolhido um sistema comercial, desde que atenda aos requisitos e que ofereça

total acesso ao microcontrolador, ou pode ser desenvolvido um.

**Etapa 5:** nessa fase deverá ser projetado e implementado um sistema de controle de estabilidade e desvio de obstáculos. Diversas técnicas de controle já foram analisadas em outros projetos, cada uma apresentando vantagens e desvantagens, de acordo com as características do ambiente de estudo. Com base nesses trabalhos deverão ser escolhidas uma ou mais técnicas para utilização. Baseado na modelagem matemática desenvolvida na etapa 2, softwares matemáticos poderão ser utilizados para auxiliar no projeto do controlador, realizando simulações do funcionamento do sistema antes da implementação no sistema embarcado. Testes reais deverão ser realizados.

**Etapa 6:** por fim, deverão ser conduzidos testes para verificar o funcionamento completo do veículo e validar os objetivos deste projeto.

## 4 RECURSOS DE HARDWARE E SOFTWARE

Neste capítulo serão apresentados os principais recursos de *hardware* e *software* utilizados nesse projeto, bem como a origem destes recursos.

### 4.1 RECURSOS DE HARDWARE

Os recursos de *hardware* necessários englobam o quadricóptero, o sistema de comunicação e a estação base.

O quadricóptero pode ser dividido em duas partes: estrutura física e placa de controle. Os componentes da estrutura física são:

- 1x Chassi de 45cm diâmetro
- 4x Motor brushless 5000kV
- 4x Hélice 9x4,7 GWS
- 4x ESC 30A
- 1x Bateria 4000mAh 7,4V

estes componentes foram emprestados pelo prof. Hugo Vieira, orientador desse trabalho. Também foi emprestada uma placa de controle, chamada “KK multicopter”, porém essa é uma placa de baixo desempenho e espera-se substituí-la por uma melhor. O desejável seria construir a própria placa de controle, porém devido ao encapsulamento SMD utilizado nos sensores MEMS, a montagem dessas placas requer o uso de equipamentos específicos, inviáveis para esse projeto.

Até o momento não há disponibilidade de nenhum dos componentes do sistema de comunicação, todos deverão ser adquiridos. Eles são:

- 2x Módulo transceptor de RF
- 1x USB *dongle*
- 1x Rádio controle 4 ou mais canais
- 1x Receptor 4 ou mais canais

A estação base é um computador, desktop ou portátil, recente, com sistema operacional Windows ou Linux. Será usado um computador próprio.

## 4.2 RECURSOS DE SOFTWARE

Alguns recursos de software utilizados dependerão das alternativas de hardware escolhidas e só poderão ser definidas posteriormente. Inicialmente serão utilizados os seguintes:

- Matlab ou Octave: simulações do sistema de controle, coleta de dados do quadricóptero. Disponíveis na UTFPR e gratuito, respectivamente.
- Eagle: criação de diagramas eletrônicos e placas de circuito impresso. Gratuito.
- Astah community ou Dia: edição de diagramas UML e fluxogramas. Ambos gratuitos.

## **5 VIABILIDADE E CRONOGRAMA PRELIMINAR**

Neste capítulo será avaliada a viabilidade do projeto e será apresentado um cronograma preliminar de desenvolvimento.

### **5.1 VIABILIDADE**

Como descrito no capítulo anterior, os principais recursos para a elaboração do projeto foram emprestados, para os de hardware, ou são gratuitos, para os de software. Resta para aquisição apenas os componentes da comunicação e da placa controladora. O gasto estimado para aquisição dos componentes e conclusão do projeto é de 300 reais, contanto que não ocorram danos no desenvolvimento, o que é completamente viável.

### **5.2 CRONOGRAMA PRELIMINAR**

A Tabela 3 apresenta um cronograma preliminar do desenvolvimento do TCC. Na sua elaboração foi considerado que o autor continuará o desenvolvimento no semestre seguinte, junto com a disciplina de TCC 2.

**Tabela 3 – Cronograma**

<b>Etapas</b>	<b>Data de início</b>	<b>Data de término</b>
Elaboração da proposta de TCC	11/12/12	19/03/13
Entrega da proposta de TCC	26/03/13	26/03/13
Elaboração do plano de projeto de TCC	26/04/13	23/04/13
Entrega do plano de projeto de TCC	08/05/13	08/05/13
Elaboração da monografia de TCC	03/06/13	10/10/13
Projetar e montar a estrutura física	03/06/13	16/06/13
Modelar o sistema	17/06/13	30/06/13
Projetar e implementar o sistema de comunicação	01/07/13	28/07/13
Projetar e construir o sistema embarcado	01/07/13	28/07/13
Projetar e implementar o sistema de controle	29/07/13	01/09/13
Idealizar e conduzir experimentos reais de teste de navegação	02/09/13	06/10/13
Entrega da monografia e defesa do TCC	11/10/13	11/10/13

## 6 CONCLUSÕES

Neste documento foi mostrada a viabilidade desse projeto para um trabalho de conclusão de curso. Este seria apenas o primeiro passo de uma série de outros projetos que poderiam aproveitar dos resultados obtidos. Há um grande ramo de aplicações para quadricópteros, como no estudo de algoritmos de controle, para estabilização; inteligência artificial, para detecção e desvio de obstáculos; processamento de imagens; sistemas multi-agentes, no estudo de comportamento coletivo; entre outros. Espera-se que, num futuro próximo, muitas outras surjam com os avanços tecnológicos, permitindo um maior tempo de voo e a realização de mais atividades de modo autônomo.

## REFERÊNCIAS

- AIKES JUNIOR, J. et al. Study on the influence of Lp norm similarity measures in the kNN-TSP algorithm for time series forecasting (in Portuguese). In: **X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações**. Águas de Lindóia: [s.n.], 2011. p. 339–342.
- ALTUG, E.; OSTROWSKI, J.; MAHONY, R. Control of a quadrotor helicopter using visual feedback. In: **Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 72–77 vol.1.
- BORENSTEIN, J. The hoverbot – an electrically powered flying robot. 1993.
- BOUABDALLAH, S. **Design and control of quadrotors with application to autonomous flying**. Tese (Doutorado) — École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2007.
- DRYANOVSKI, I.; MORRIS, W.; XIAO, J. An open-source pose estimation system for micro-air vehicles. In: **Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 4449–4454. ISSN 1050-4729.
- FERRERO, C. A. **kNN Algorithm for Time Series Forecasting: Prediction Functions and Criteria to Select Nearest Neighbors applied to environmental variables in Limnology (in Portuguese)**. Dissertação (Mestrado) — Institute of Mathematics and Computer Science - University of São Paulo, 2009.
- FILHO, G. L. S.; RUDIGUER, G. T.; NASCIMENTO, J. P. M. do. Quadricoptero. 2011. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/msergio/Monog-11-2-Quadricoptero.pdf>>. Acesso em: 19 de março de 2013.
- FILHO, O. M.; NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.
- HOFFMANN, G. et al. The stanford testbed of autonomous rotorcraft for multi-agent control (starmac). In: **23rd Digital Avionics System Conference**. [S.l.: s.n.], 2004.
- HOFFMANN, G. M. et al. Quadrotor helicopter flight dynamics and control: Theory and experiment. In: **AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit**. [S.l.: s.n.], 2007.
- KROO, I.; PRINZ, F. **The Mesicopter: A Miniature Rotorcraft Concept**. [S.l.], 2001.
- LAMBERMONT, P. **Convertawings Model A**. 2013. Disponível em: <[http://www.aviastar.org/helicopters\\_eng/convertawings.php](http://www.aviastar.org/helicopters_eng/convertawings.php)>. Acesso em: 12 de março de 2013.
- LEISHMAN, J. G. **A History of Helicopter Flight**. 2000. Disponível em: <<http://terpconnect.umd.edu/~leishman/Aero/history.html>>. Acesso em: 12 de março de 2013.



LOPES, R. V. et al. Model predictive control applied to tracking and attitude stabilization of a VTOL quadrotor aircraft. In: **21st International Congress of Mechanical Engineering**. Natal, RN, Brazil: [s.n.], 2011. p. 24–28.

LUPASHIN, S. et al. A simple learning strategy for high-speed quadrocopter multi-flips. In: IEEE. **Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2010. p. 1642–1648.

MELO, A. S. de. **Implementação de um Quadrotor como Plataforma de Desenvolvimento para Algoritmos de Controle**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

MICHAEL, N. et al. The GRASP multiple micro-UAV testbed. In: **IEEE Robotics & Automation Magazine**. [S.l.: s.n.], 2010.

NICE, E. **Design of a four rotor hovering vehicle**. Tese (Mestrado) — Cornell University, 2004.

PURWIN, O.; D'ANDREA, R. Performing aggressive maneuvers using iterative learning control. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2009. p. 1731–1736.

SHEN, S.; MICHAEL, N.; KUMAR, V. Autonomous indoor 3d exploration with a micro-aerial vehicle. In: **Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 9–15. ISSN 1050-4729.

STOWERS, J.; HAYES, M.; BAINBRIDGE-SMITH, A. Altitude control of a quadrotor helicopter using depth map from microsoft kinect sensors. In: **Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 358–362.