

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

FERNANDO PADILHA FERREIRA

## **QUADRICÓPTERO**

PROPOSTA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA**

**2014**

FERNANDO PADILHA FERREIRA

## **QUADRICÓPTERO**

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

Orientador: Prof. Dr. Hugo Vieira Neto

**CURITIBA**

**2014**

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Cronograma preliminar .....	19
----------	-------------------------------	----

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – Cronograma preliminar .....	18
--	----

## LISTA DE SIGLAS

ESC	<i>Eletronic Speed Control</i>
FAI	Federação Aeronáutica Internacional
ILC	<i>Iterative Learning Control</i>
LQR	<i>Linear-Quadratic Regulator</i>
LQ	<i>Linear-Quadratic</i>
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
RF	Rádio frequência
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados
VTOL	<i>Vertical Take-Off and Landing</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
1.1	OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.2	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	8
<b>2</b>	<b>LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO</b>	<b>9</b>
2.1	HISTÓRIA DOS QUADRICÓPTEROS	9
2.2	TRABALHOS CORRELATOS	10
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>RECURSOS</b>	<b>15</b>
4.1	HARDWARE	15
4.2	SOFTWARE	16
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE VIABILIDADE</b>	<b>17</b>
5.1	CRONOGRAMA PRELIMINAR	17
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>20</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>21</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) possuem alta capacidade de carga; 2) possuem 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-rotores, 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 à falta de estabilidade e de meios de controle, este quadricóptero 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.

---

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

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 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 MEMS (do inglês, Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos), tecnologia que encapsula sensores, atuadores, estruturas mecânicas e circuitos eletrônicos miniaturizados em um único chip.

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 SILVA 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 em ensino de diversas áreas, como: algoritmos de controle, para estabilização; inteligência artificial, para navegação autônoma; processamento de imagens; sistemas multi-agentes, no estudo de comportamento coletivo; entre outras. Este trabalho seria o primeiro passo para posterior utilização em outros projetos.

## 1.1 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esse trabalho tem como objetivo geral 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 está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta inicialmente um breve histórico do desenvolvimento dos quadricópteros e, 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.

## 2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Nessa seção está descrito o estado da arte do tema escolhido. Primeiramente é feito um breve histórico do desenvolvimento dos quadricópteros e, em seguida, são 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 à falta de estabilidade e de meios de controle, 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 (LEISHMAN, 2000). 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 (LEISHMAN, 2000). Foi o primeiro helicóptero a 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.

## 2.2 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 em pequena escala 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 voar a uma altura fixa 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 meteorológicos em grandes áreas ou outros 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 controlador LQR (do inglês, Regulador Linear-Quadrático) para estabilização. O veículo final pesava 6,2 kg. Durante os testes foi comprovada sua capacidade de voar 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). Manobras agressivas, nesse contexto, são manobras que levam o sistema rapidamente de um estado para o outro, em regime não-linear. 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 processo sistemático 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 (do inglês, 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 execução de 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” (HOFFMANN et al., 2004), foi um dos primeiros projetos a trabalhar em ambiente externo (*outdoor*). O projeto teve continuidade em 2007, com o STARMAC II, com uma versão própria do quadricóptero e com melhorias no desempenho do controlador (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 dos trabalhos anteriores, esses veículos não são autônomos, pois 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 na resposta do quadricóptero 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 implementação do software do sistema embarcado, 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 está descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste projeto. São 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:** 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.
2. **Modelar o sistema:** 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 para identificação dos parâmetros do modelo.
3. **Projetar e implementar o sistema de comunicação:** 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 uma pessoa 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.
4. **Projetar e construir o sistema embarcado:** 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 ao requisitos e que ofereça total acesso ao microcontrolador, ou pode ser desenvolvido um sistema próprio.

5. **Projetar e implementar o sistema de controle:** 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, como visto em (ALTUG et al., 2002), (NICE, 2004), (PURWIN; D'ANDREA, 2009), (BOUABDALLAH, 2007), (HOFFMANN et al., 2004) e (LOPES et al., 2011). Com base nesses trabalhos deverão ser escolhidas uma ou mais técnicas para utilização. Baseado na modelagem matemática desenvolvida na etapa 2, softwares matemáticos (e.g. MATLAB) 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.
6. **Idealizar e conduzir experimentos reais de teste de navegação:** por fim, deverão ser conduzidos testes para verificar o funcionamento completo do veículo e validar os objetivos deste projeto.

## 4 RECURSOS

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

### 4.1 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.

Os componentes do sistema de comunicação são:

- 2x Módulo transceptor de RF
- 1x USB *dongle*

- 1x Rádio controle para aeromodelismo com 4 ou mais canais
- 1x Receptor para aeromodelismo com 4 ou mais canais

O rádio controle e o receptor foram emprestados pelo prof. Andre Oliveira, do Departamento de Informática. Portanto, será necessário apenas a aquisição dos módulos transceptores de RF e o USB *dongle*, responsável pela comunicação do transceptor com a estação base.

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

## 4.2 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. A UTFPR possui a licença do Matlab disponível e Octave é um *software* gratuito.
- Eagle: criação de diagramas eletrônicos e placas de circuito impresso. O Eagle é um *software* gratuito.
- Astah community ou Dia: edição de diagramas UML e fluxogramas. Ambos os *softwares* são gratuitos.

## 5 ESTUDO DE VIABILIDADE

Neste capítulo, inicialmente é avaliada a viabilidade do projeto e, em seguida, é apresentado um cronograma preliminar de desenvolvimento.

Como descrito no capítulo anterior, os principais recursos para a elaboração do projeto foram emprestados (*hardware*) ou são gratuitos (*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 durante desenvolvimento, o que é completamente viável em termos de custo financeiro.

Em relação a viabilidade técnica, acredita-se que os conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia de Computação sejam suficientes para o desenvolvimento do projeto. Apesar de nem todas técnicas e tecnologias aplicadas nesse trabalho serem aprendidas no curso, conhecendo os fundamentos, a curva de aprendizado para uma tecnologia específica é muito menor.

### 5.1 CRONOGRAMA PRELIMINAR

A Tabela 1 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. O Diagrama de Gantt da Tabela 1 pode ser visualizado na Figura 1.

**Tabela 1: Cronograma preliminar**

<b>Etapa</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
Aquisição 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

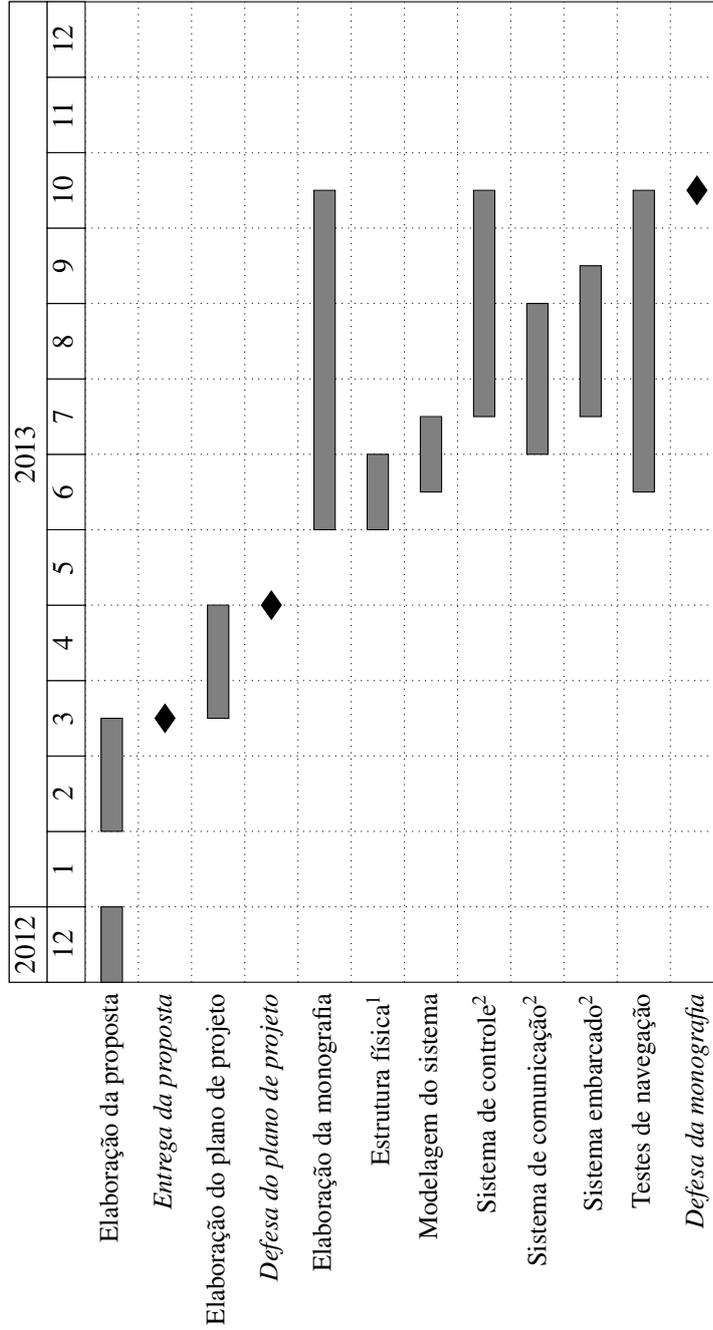


Figura 1: Cronograma preliminar

<sup>1</sup> Aquisição e montagem.

<sup>2</sup> Projeto e implementação.

## 6 CONCLUSÕES

Neste documento foi analisada a viabilidade do presente 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 navegação autônoma; 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

- 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.
- 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.

SILVA FILHO, G. L.; RUDIGER, 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.

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