

## **HARDWARE PARA CONTROLE AVANÇADO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO DO TIPO QUADRICÓPTERO**

**Kleber Lima da Silva  
Aniel Silva de Moraes**

### **RESUMO**

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um *hardware* para o controle autônomo embarcado de um quadricóptero. Contextualiza-se a importância atual dos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), suas vantagens e desafios tecnológicos. A partir disto, são apresentados os princípios de voo de aeronaves e também uma fundamentação teórica quanto ao sistema de navegação para a seleção adequada dos sensores e outros componentes do *hardware* proposto. O sistema final integra uma placa controladora de voo, ArduPilot, e um microcontrolador, STM32F4; é selecionado também um *software* para estação de terra. Os resultados obtidos garantiram o funcionamento adequado do sistema, o qual apresenta um relevante potencial para o incentivo de diversas pesquisas no âmbito do controle autônomo de VANTs.

**Palavras Chave:** Ardupilot, IMU, GPS, microcontrolador ARM, telemetria.

## **HARDWARE FOR ADVANCED CONTROL OF UNMANNED AERIAL VEHICLE TYPE QUADROTOR**

### **ABSTRACT**

This paper describes the development of hardware for the autonomous control embedded of an quadrotor. Contextualizes the current importance of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), its advantages and technological challenges. From this, we present the principles of aircraft flight and also as a theoretical foundation to the navigation system for the selection of appropriate sensors and other components of the proposed hardware. The final system includes a controller board flight, ArduPilot, and a microcontroller, STM32F4; is also selected software to the ground station. The results ensured the proper functioning of the system, which presents a significant potential for the incentive of several studies under the autonomous control of UAVs.

**Keywords:** Ardupilot, ARM microcontroller, IMU, GPS, telemetry.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), também chamado UAV (do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*), ou ainda comumente conhecidos como *drone*, de início tinham aplicações militares como alvos aéreos para o treinamento de artilharia antiaérea e, hoje são também usados para fins científicos na captação de imagens. O uso desta tecnologia para reconhecimento de imagens abre o desenvolvimento para uma série de aplicações como: monitoramento ambiental, inspeção de linhas de transmissão de energia elétrica, tubulação de gás, tráfego urbano, vigilância de limites territoriais e entre outras.

Os VANTs já mostraram seu potencial na área de segurança e defesa, em vários lugares do mundo, que vão desde o uso em desastres naturais até controle e monitoramento de fronteiras. A partir deste cenário veem surgindo diversas aplicações para estes veículos objetivando baixos custos, precisão, segurança e viabilidade de sistemas autônomos.

Uma das classificações de veículos aéreos definem os seguintes grupos: balões, foguetes, aeronaves de asas fixas (aviões e planadores) e aeronaves de asas rotativas (autogiros e helicópteros). Para aplicações como VANTs são muito utilizados os aviões e helicópteros. Um comparativo entre estes dois tipos de aeronaves pode ser realizado quanto às características de voo, tem-se que a capacidade de manobra do helicóptero é muito maior do que as do avião, aquele pode realizar três coisas que este não pode: voar para trás, girar no ar e pairar no ar sem se mover, podendo ainda decolar e pousar com voo vertical. Como desvantagens os helicópteros são mais complexos e operam em velocidade reduzida, com pouca autonomia e com pouca capacidade de carga.

Um conceito emergente de asas rotativas para os VANTs são os helicópteros de vários rotores, também chamados de multicópteros. Estes veículos têm motores idênticos operando em pares que giram em direções opostas, e possuem muitas vantagens sobre os helicópteros comuns. Em primeiro lugar, multicópteros não necessitam de complexas relações de controle mecânico para acionamento do rotor, contando apenas com rotores de passo fixo e utilizando variação na velocidade do motor para o controle do veículo, simplificando o design e a manutenção do veículo. Em segundo lugar, a utilização de vários rotores assegura que os rotores individuais são menores em diâmetro do que o rotor principal equivalente em um helicóptero tradicional, em relação ao tamanho da estrutura (HOFFMANN et al., 2007).

Os VANTs possuem algumas vantagens, dentre elas, o custo operacional em relação a aviões tripulados ou satélites, e a possibilidade de realizarem operações mais arriscadas por não envolver tripulação. Mas os VANTs têm alguns fatores desafiadores, pois devem apresentar capacidade para executar missões de voo com pontos pré-determinados, além de

transmitir ou guardar as informações coletadas e retornar à base em segurança. Portanto, é necessária uma unidade de controle responsável pelos procedimentos de navegabilidade e estabilidade da aeronave. Esta complexidade para se controlar uma aeronave exige conhecimentos multidisciplinares, envolvendo conceitos de aerodinâmica, eletrônica, teoria de controle, sistemas de comunicação, sistemas de localização, entre outros. Logo, é necessário implementar um controle com um alto grau de autonomia e robustez que realize os procedimentos necessários para manter a aeronave na trajetória e altitude desejada, fatores estes que tornam o controle um dos principais pontos limitante da difusão dos VANTs.

O trabalho proposto apresenta o projeto e desenvolvimento de um sistema de *hardware* de baixo consumo de energia, envolvendo tecnologia SMD, para o controle de um VANT do tipo quadricóptero. A metodologia de implementação envolve o estudo dos princípios de voo de aeronaves e os fundamentos teóricos dos componentes utilizados. Tal sistema visa integrar sensores e atuadores necessários ao funcionamento, posicionamento e controle autônomo da unidade de voo. O sistema embarcado que integra todos os elementos possui além de um sistema controlador de voo um microcontrolador ARM de 32 bits com alta capacidade de processamento, permitindo a aplicação de técnicas avançadas de controle em tempo real.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os constantes avanços obtidos em técnicas de controle as tornam atrativas pelo fato de serem capazes de incrementar sistemas pré-existentes com funções inovadoras e úteis, além de outros benefícios. Assim, temos um crescimento vertiginoso do uso de VANTs em aplicações civis, mesmo que os recursos financeiros são bem inferiores que no setor militar, e estes sim já apresentam uma diversidade de modelos para vários tipos de aplicações neste setor.

Podem-se citar inúmeros grupos de pesquisa em todo mundo, que têm se dedicado ao desenvolvimento de novas técnicas de controle para VANTs. A Figura 1 mostra um robô-helicóptero criado por cientistas do instituto de pesquisas CNRS, França, o seu controle é baseado em um cérebro eletrônico criado a partir do mapeamento do cérebro de um inseto. O STARMAC II, Figura 2, é uma unidade de voo autônoma do tipo quadricóptero, o projeto é da Universidade de Stanford e seu controle é implementado usando controladores PID.

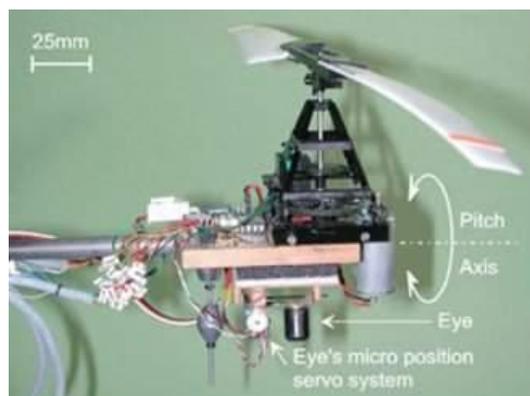


Figura 1 – Robô-helicóptero com cérebro eletrônico de inseto.  
 Fonte: INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2007.



Figura 2 – STARMAC II - Universidade de Stanford. Fonte: HOFFMANN et al., 2007.

A Figura 3 mostra o VANT Tiriba. “O VANT Tiriba é uma aeronave elétrica operada por um sistema autônomo de navegação e controle totalmente brasileiro - que pode contar com câmeras fotográficas de alta definição, sensores, câmeras termais e de vídeo convencionais. Suas principais aplicações são na área de defesa civil, monitoramento ambiental e agrícola.” (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos, 2012, p. 1).



Figura 3 – VANT Tiriba do INCT-SEC, São Carlos. Fonte: INCT-SEC, 2012.

A Figura 4, mostra alguns dos principais VANTs em pesquisa atualmente no mundo que utilizam helimodelos, projetados para realizarem uma grande diversidade de tarefas. De acordo com MARTINS (2008), além dos projetos ligados às universidades, há empresas que produzem e comercializam VANTs para uso civil, como a RotoMotion, Viking Aerospace e a brasileira FITec.



Figura 4 – Alguns dos principais VANTs helimodelos em pesquisa no mundo.  
Fonte: MARTINS, 2008.

O projeto da Figura 5 é o AURORA do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), Campinas-SP, é um VANT do tipo dirigível. Os dirigíveis contemplam voos à baixa velocidade e baixa altitude, capacidade de pairar no ar, grande capacidade de permanência no ar para missões de longa duração, e ainda, no caso de falha apresenta uma degradação lenta e suave. Porém, esta plataforma apresenta como desvantagens o seu tamanho devido ao grande volume do reservatório de gás e a baixa tolerância em condições de ventos.



Figura 5 – Dirigível do projeto AURORA – CTI.

A Figura 6 mostra diversos modelos de VANTs, em sua maioria, os de lançamento manual do tipo avião; são apresentadas algumas características como: tamanho, capacidade de carga, altitude máxima e autonomia de voo.

<b>Do-Mav</b>  <b>Eads-Dornier</b>	38 cm 42 cm 25 cm 	Colour and B/W cameras 5 kg 15 km .5 hr 	<b>Pointer</b>  <b>Aerovironment</b>	1.83 2.7 metre 	Colour or infrared day/night live NBC detection 3.6 kg 8 km 1.5 hr 
<b>Dragon Eye</b>  <b>Aerovironment</b>	1.1 metre 	Colour low-light & infrared line-of- sight video feed 2.25 10 km 1 hr 	<b>Quattrocopter</b>  <b>Eads-Dornier</b>	6.5 cm 	Real-time video feed .5 kg 1 km >20 
<b>Evolution</b>  <b>BAI Aerosystems</b>	1.1 metre 	daylight colour & low-light/infrared imager & NBC 3 kg 10 km 1 hr 	<b>Skylark</b>  <b>Elbit Systems</b>	1.8 metre 2.7 metre 	stabilised camera 3.75 30 65 
<b>Javelin</b>  <b>BAI Aerosystems</b>	1.82 metre 2.9 metre  length wingspan diameter	24:1 zoom ratio colour camera 2.7 kg 8 km 2 hrs weight range endur. 	<b>Skylite</b>  <b>Rafael</b>	1.5 metre 1.2 cm 	Canister launched stabilised camera real-time feed 6 kg 10 km 1 hr 

Figura 6 - Exemplos de VANTs de lançamento manual. Fonte: ARMADA, 2004.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Realizou-se inicialmente uma revisão bibliográfica para o estudo e análise daparte teórica quanto ao funcionamento de aeronaves e em específico os multicópteros. Para o desenvolvimento do VANT são citados de formassistêmica e concisa um conjunto de informações necessárias e os materiais utilizados para a implementação do projeto.

### 3.1 Funcionamento de aeronaves

O estudo das propriedades e características do ar e outros gases em movimento e das forças que estes exercem em corpos sólidos quando em movimento, é o fundamento de todo voo, e consiste a teoria aerodinâmica.

Quando o ar flui em torno da asa, forças de empuxo (*thrust*), de arrasto (*drag*) e de sustentação (*lift*) são produzidas, conforme Figura 7. A tração impulsiona a aeronave, o arrasto é a componente da força aerodinâmica na mesma direção e sentido do vento relativo, e a sustentação é a componente da força aerodinâmica perpendicular ao vento relativo, que compensa a força peso (SAMPAIO, 2006).



Figura 7– Forças presentes na asa em movimento. Fonte: BASTOS, 2011.

Em aeronaves de asas rotativas os rotores produzem ao mesmo tempo a sustentação e a tração, o voo deve-se à força aerodinâmica que corresponde à diferença entre as pressões exercidas pelo ar em movimento nas superfícies superior e inferior de uma asa, esta força depende do perfil da hélice, do ângulo de ataque e da velocidade de rotação. Assim, as hélices giram com velocidade suficiente para que a força aerodinâmica produzida compense o peso da aeronave. Nos multicópteros os ângulos de ataque dos rotores são fixos, portanto o controle dos movimentos da aeronave é realizado pela variação de velocidade dos motores.

O controle de orientação de veículos aéreos, denominado de atitude, é realizado por meio de atuadores que exercem forças em direções diferentes, gerando forças rotacionais ou momentos em torno do centro de gravidade da aeronave, e assim, proporcionam os movimentos de inclinação (*pitch*), rotação (*roll*) e guinada (*yaw*), mostrados na Figura 8. Portanto, a execução de cada manobra da aeronave é realizada pela atuação do sistema de navegação ao modificar ou manter o estado dos atuadores da aeronave, objetivando os valores desejados de velocidade, altitude e posição.

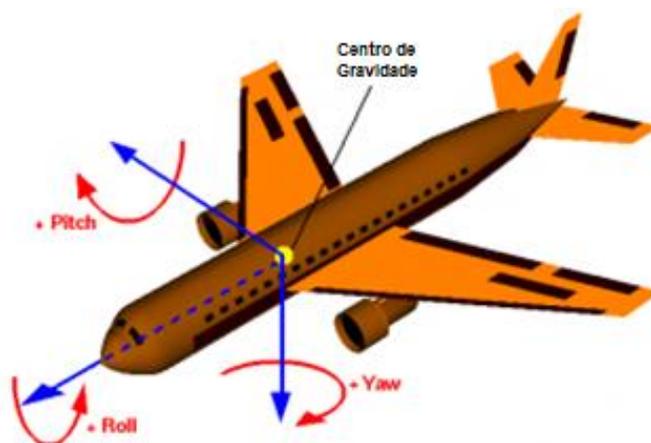


Figura8– Ângulos de rotação em relação ao centro de gravidade. Adaptado de: WIKIPÉDIA, 2011.

A Figura 9 mostra as forças e momentos em um quadricóptero em relação ao corpo e sistemas de referência inerciais. Os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* ( $\phi$ ,  $\theta$  e  $\psi$ , respectivamente) são controlados por impulso diferencial. O impulso diferencial entre motores opostos fornece torque em  $\phi$  e  $\theta$ , já entre os pares de motores em contra rotação fornece o torque em  $\psi$ . O posicionamento com base em coordenadas é realizado mediante o controle da magnitude e direção do impulso total. A força de arrasto,  $D_b$ , também age sobre o veículo, com sentido oposto à velocidade,  $e_v$  (HOFFMANN et al., 2007).

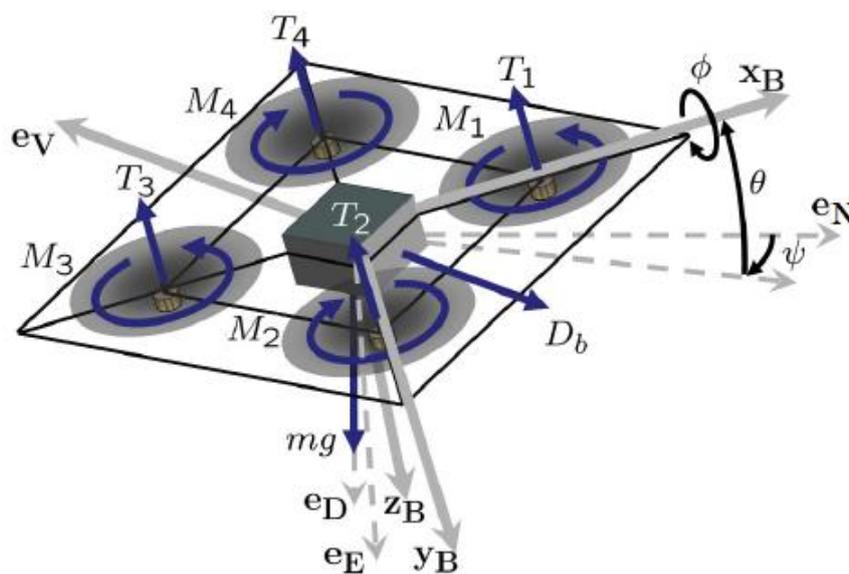


Figura 9 – Diagrama de corpo livre de um quadricóptero.  
Fonte: HOFFMANN et al., 2007.

### 3.2 Materiais Utilizados

Para implementação de um VANT elétrico são necessários motores, *drives* controladores de velocidade, sensores, comunicação sem fio, baterias e microcontrolador.

Para aplicações de monitoramento e medições inclui-se também um sistema para aquisição de imagens composto por uma câmera e um suporte para estabilização da mesma. A seguir são apresentados os itens supracitados e suas características para a aplicação proposta de um quadricóptero (helicóptero com quatro rotores).

#### **a) Motores *brushless***

Este tipo de motor, mostrado na Figura 10, não possui nenhum tipo de contato mecânico entre o rotor e o estator, ou seja, não possui escovas ou anéis coletores. São muitas as vantagens deste tipo de motor em relação aos motores de corrente contínua convencionais, a principal é alta confiabilidade, seguidas por: vida útil mais longa não apresentando o desgaste das escovas, maior torque, alta eficiência e menor peso. Como principal desvantagem os motores *brushless* apresentam custo mais elevado devido à necessidade de um circuito de acionamento e controle de velocidade dedicado.



Figura 10– Motor *brushless* outrunner 850KV.

Os principais parâmetros para a escolha dos motores *brushless* são tensão de trabalho, corrente máxima e um dado que indica o rpm/Volt ou simplesmente chamado de KV, este último determina a rotação máxima que o motor pode atingir. O motor selecionado apresenta corrente máxima de 28A, tensão de trabalho 11,1V e 850KV, portanto, pode atingir até 9435rpm.

#### **b) *Electronic Speed Control (ESC)***

O acionamento do motor *brushless* é realizado por meio de um dispositivo controlador eletrônico de velocidade, chamado de ESC da sigla em inglês, ele é capaz de controlar a velocidade de giro deste tipo de motor. Seu acionamento é por PWM com frequência de 50Hz

e razão cíclica de 10% a 20%, portanto pulsos de 1ms equivalem ao motor parado e 2ms em rotação máxima.

Para os motores *brushless* não basta ajustar a intensidade de fluxo do campo ou a tensão da armadura, como nos motores CC com escova. A maneira correta de se controlar a velocidade é variando a frequência das correntes entre suas fases. Isto é realizado por um circuito dedicado que eletronicamente gera uma sequência de acionamento para os conjuntos de transistores MOSFET que por sua vez acionam as bobinas do motor na sequência adequada.

Os ESCs devem ser ligados à bateria e apresentam três saídas para o motor e também possuem um conector onde é captado o sinal PWM de controle. Os ESCs devem ser selecionados a partir da corrente máxima do motor que ele irá acionar, recomenda-se 20% acima desta corrente. A Figura 11 mostra o ESC utilizado de 35A adequado ao motor selecionado.



Figura 11 – Controlador eletrônico de velocidade.

### c) Sensores

Para o controle de um VANT necessita-se de sensores para detecção de obstáculos e monitoramento de variáveis necessárias para o posicionamento da unidade como: altitude, aceleração, velocidade, posição geográfica, entre outros. Sem estes sensores o controle autônomo de um VANT seria impraticável, portanto uma das técnicas que permite o controle e a navegação é a integração de uma unidade de medição inercial (IMU da sigla em inglês) com um módulo GPS, além de sensores ultrassônicos para detecção de obstáculos.

A base de funcionamento do sonar é por meio de ondas ultrassônicas, as quais são transmitidas pelo sensor, refletem em algum objeto e voltam ao sensor. Desta forma com o tempo medido entre a saída da onda transmitida e a do eco da onda refletida é possível calcular a distância do objeto, conforme a Figura 12. A vantagem do uso de sonar para

identificação de obstáculos é a possibilidade da detecção de objetos transparentes, como água e vidro, o que não é o caso dos sensores utilizando infravermelho.

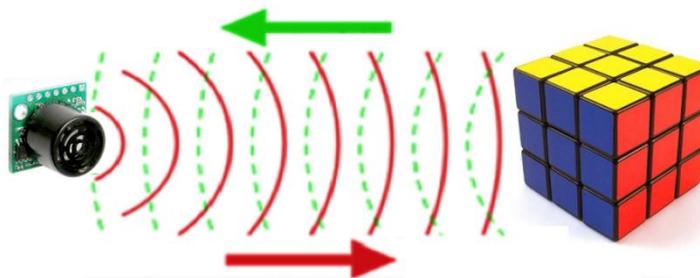


Figura 12– Funcionamento do sonar.

A Figura 13 mostra um módulo IMU composto por acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, todos de três eixos, portanto resulta uma unidade com nove graus de liberdade. A partir destes sensores são realizadas medidas de velocidade e orientação necessárias ao controle de um VANT.

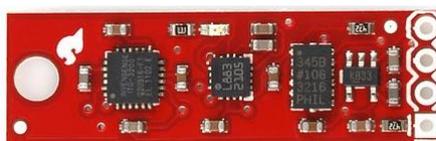


Figura 13– Unidade de medição inercial com nove graus de liberdade.

O módulo GPS utilizado é o EM-406A da GlobalSat, mostrado na Figura 14. Este módulo apresenta precisão de 0,1 m/s (velocidade), 5 metros (posição) e 1  $\mu$ s (sincronização com o GPS); seu consumo médio é de 25 mA.



Figura 14– Módulo GPS EM-406A.

#### **d) Comunicação sem fio**

O único meio de comunicação com um VANT em pleno voo é sem fio, a Figura 15 mostra o kit de telemetria utilizado, este módulo de rádio apresenta alta confiabilidade com correção de erros, baixo consumo e preço mais baixo comparado com módulos XBee equivalentes. O alcance de até 3km em campo aberto e o par serial/USB se adéqua ao projeto do VANT para telemetria de sinais e transmissão de comandos por meio de uma unidade em terra (microcomputador).



Figura 15– Kit de Telemetria 3DR Radio.

#### e) Baterias

Os VANTs elétricos exigem altas correntes e suas baterias devem suprir as condições necessárias, baterias de polímero de lítio (Li-Po) são ideais para esta aplicação, pois permitem elevadas correntes de descarga e também possui maior capacidade e menor peso comparado com outros tipos de baterias com mesma capacidade, e ainda, quanto à recarga as baterias Li-Po não necessitam de um ciclo podendo ser recarregada sempre que houver necessidade e seu tempo de carga é bem reduzido.

São três as principais características das baterias Li-Po, carga elétrica, número de células e capacidade de descarga. A carga da bateria é dada normalmente em mAh, o equivalente a 3,6 C (Coulomb), a partir desta característica consegue-se calcular o quanto uma bateria totalmente carregada deve durar conhecendo-se a corrente consumida. Estas baterias apresentam 3,7 V por célula, portanto o número de células define a tensão nominal da bateria. Outro dado importante na escolha de baterias é o quanto de corrente elas podem fornecer, isto é dado então pela sua capacidade de descarga, e é indicada pela letra C.

A bateria utilizada é apresentada na Figura 16, ela possui três células, carga de 2200mAh, e é capaz de fornecer até 20 vezes sua carga (20 C), o que indica a possibilidade de correntes até 44A sem danificar a bateria. Optou-se pelo uso de duas baterias, uma para cada dois motores, a fim de atender as correntes exigidas.



Figura 16– Bateria Li-Po.

### f) Controlador de Voo

O controle de um multicóptero requer a implementação de diversos controladores, sendo eles, os de velocidades de cada motor e os para controle dos três ângulos referentes à atitude da aeronave.

Uma placa que permite realizar este controle de maneira bem simples é mostrada na Figura 17, são placas controladoras de voo que existem atualmente no mercado, dedicadas a aeromodelos elétricos. Estas placas já realizam um controle de estabilidade do veículo aéreo necessitando apenas de comandos para o posicionamento do mesmo e outros recursos para torná-lo mais autônomo, ou seja, não dispensam o uso de microcontrolador ou *joystick*, mas diminui a complexidade do *firmware* embarcado.

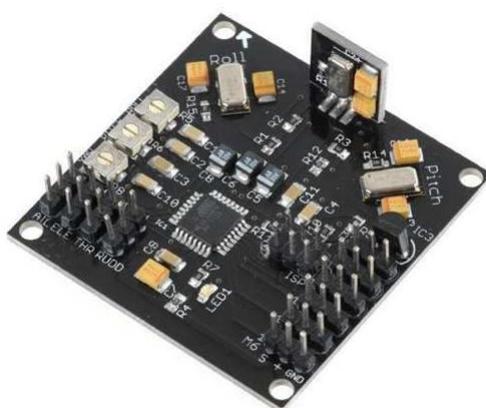


Figura 17 – Placa controladora para multicópteros.

A opção utilizada no projeto foi a placa *ArduPilot Mega2.5*, Figura 18. Esta placa é um *hardware* completo para piloto automático baseado em IMU que serve tanto para aviões ou aeronaves de asas rotativas, incluindo multicópteros e helicópteros tradicionais. O *firmware* pode ser carregado de acordo com as características da aeronave e também quanto ao modo de voo (acrobático, estável, simples, altitude fixa e missão com posições pré-programadas) (ARDUCOPTER, 2013).

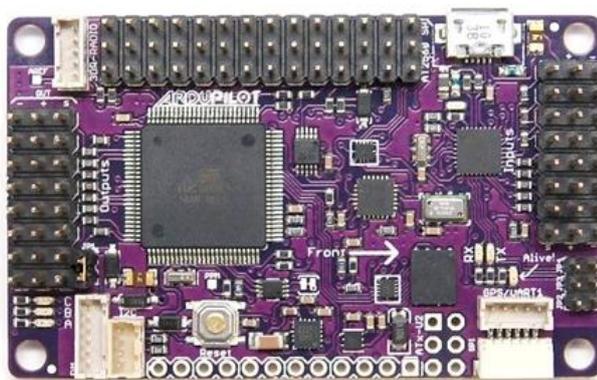


Figura 18 – Kit *ArduPilot Mega*. Fonte: ARDUOPTER, 2013.

### g) Microcontrolador

Um dos maiores desafios na concepção de um VANT é o projeto de todo um sistema que permita o veículo realizar com autonomia o controle de sua atitude ou até mesmo de todo seu voo e trajetória (MARTINS, 2008). Uma solução para esta problemática é o uso de um microcontrolador em conjunto com a placa controladora, pois permite dispensar o *joystick* manual do aeromodelo tornando-o efetivamente autônomo. Assim, os cálculos das trajetórias e envio de comandos à placa controladora é realizado pelo microcontrolador dedicado a esta atividade, o que possibilita uma gama muito alta de recursos para controle.

Buscou-se um microcontrolador adequado à aplicação, com recursos avançados para realização de cálculos e também com diversos periféricos para possibilitar embarcar novos recursos em aplicações futuras. O microcontrolador selecionado foi o STM32F407xx, e para facilidade na montagem utilizou-se o kit mostrado na Figura19.

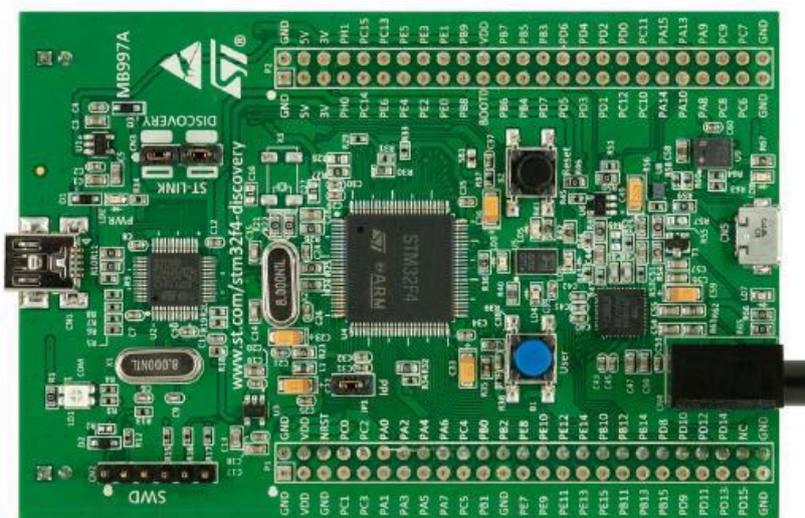


Figura19 – Kit ARM Cortex-M4 32 bits – STM32F4DISCOVERY.  
Fonte: STMICROELECTRONICS, 2012.

O microcontrolador presente neste kit possui um núcleo ARM Cortex-M4 de 32 bits com unidade de ponto flutuante (FPU) e executa até 210 milhões de instruções por segundo (210DMIPS). Alguns dos recursos avançados que este microcontrolador possui são: acesso direto a memória (DMA), conversor analógico/digital (ADC) de 12 bits, diversas interfaces de comunicação (PC, CAN, SDIO, SPI, USART e USB) e relógio de tempo real interno. O processador deste ARM também suporta instruções DSP que permite operações complexas dos algoritmos de navegação, trajetória e controle.

A comunicação entre a placa controladora e o microcontrolador é estabelecida através da *Serial Peripheral Interface* (SPI). Esta interface permite o modo *full-duplex* (comunicação

em ambas as direções ao mesmo tempo) e sua taxa de transmissão é de até 10Mbits/s (limitada pela placa controladora).

### 3.3 Software Mission Planner

Para a configuração e monitoramento de um VANT é indispensável uma estação de terra. O *Software Mission Planner* é feito para agir em conjunto com o *ArduPilot* permitindo aquisição dos dados de voo, o controle e a navegação da aeronave, o planejamento de missão, e a total interação entre o operador e a aeronave. Este *software* tal como o *hardware* do *ArduPilot* também é de código aberto.

A Figura 20 mostra uma das telas do *Mission Planner*, nesta tela é possível visualizar todos os dados da aeronave durante seu voo. Estes dados de telemetria envolvem: posicionamento da unidade, altitude, velocidade, orientação, distância a pontos pré-determinados, entre outros, além da possibilidade de gerar um arquivo de ocorrências (*Logs*). Com isto, esta é uma tela importante para monitoramento das condições do voo e da aeronave.

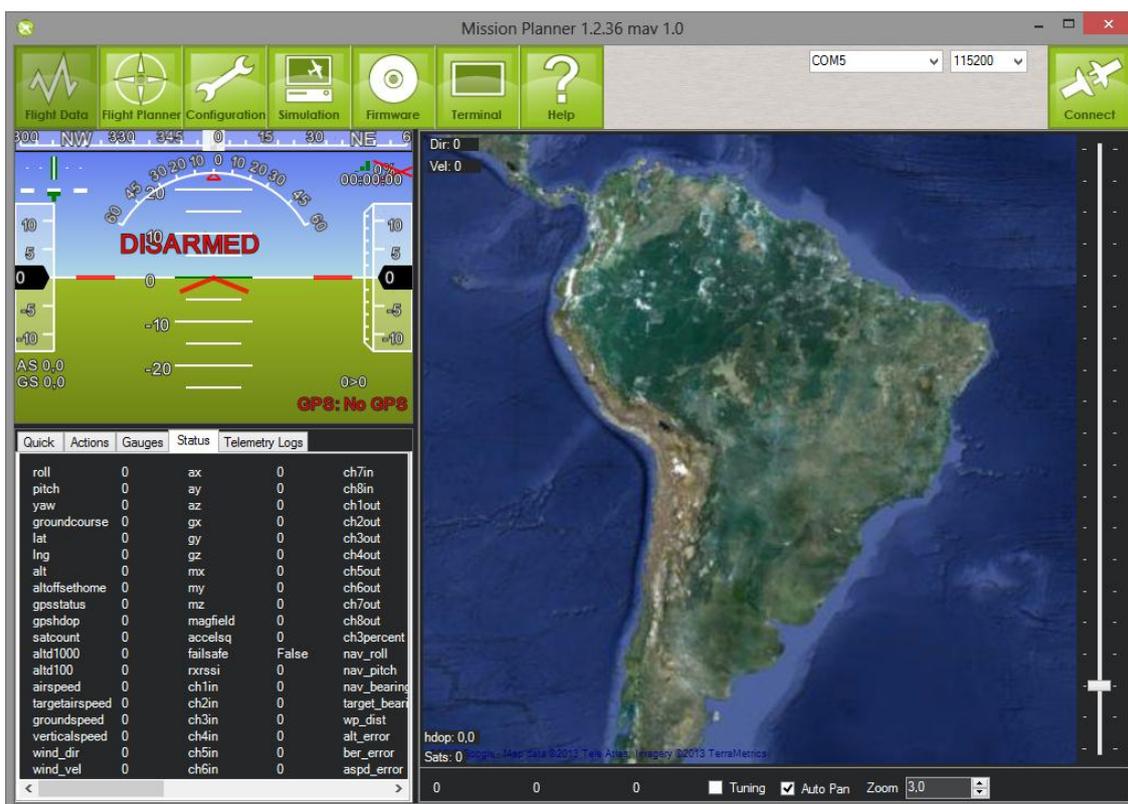


Figura 20– Tela de visualização dos dados da aeronave (telemetria).

### 3.4 Sistema de navegação

O GPS consiste de três segmentos principais: o segmento espacial, que é a constelação de satélites distribuídos em seis planos orbitais e que transmitem sinais de navegação gerados a bordo; o segmento de controle, composto por estações terrestres monitoras cuja tarefa é a monitoração, controle e manutenção dos satélites; e o segmento de usuários, constituído pelos receptores GPS da comunidade de usuários civis e militares (MARQUES FILHO, 2011).

Ainda de acordo com MARQUES FILHO a navegação inercial pode ser definida como o processo de estimar, ao longo do tempo, a posição e velocidade linear e angular, de um veículo, com relação a um sistema de referência (coordenadas) adequado, por meio de medições feitas por uma IMU, composta por acelerômetros, para medir forças específicas lineares, e giroscópios, para medir as velocidades angulares do veículo em questão. Na Figura 21 é apresentado um esquema simplificado da mecanização de um INS (sigla do inglês para sistema de navegação inercial).

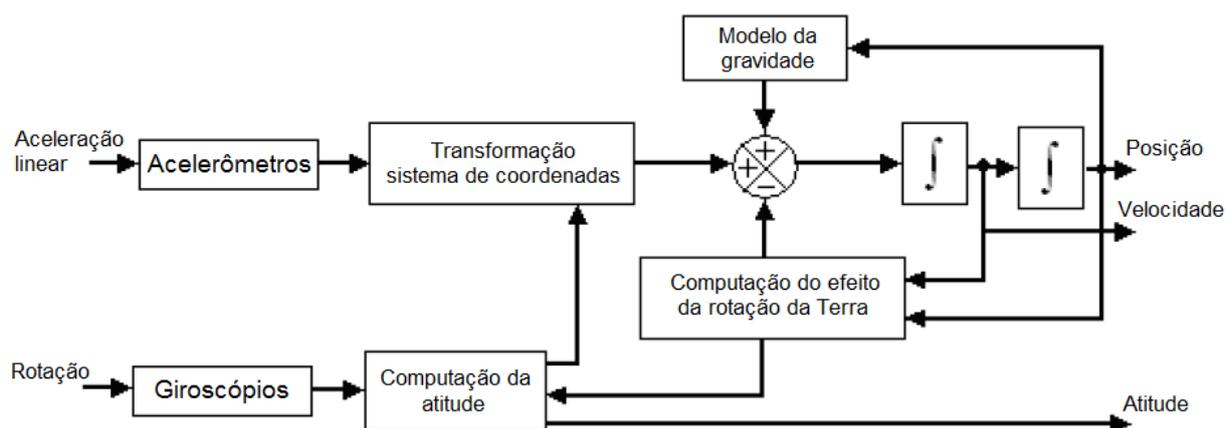


Figura 21– Fluxograma simplificado de um sistema de navegação inercial.

Fonte: MARQUES FILHO, 2011.

A partir da integração GPS/INS tem-se a união de dois sistemas de posicionamento que apresentam características de operação distintas e complementares. O GPS necessita de sinais de satélites, sujeitos a interferências e suas medições têm erros aleatórios limitados ao longo do tempo e que podem ser determinados. Já o INS é um sistema independente de sinais externos, mas que acumula erros de observação de forma contínua (erros sistemáticos dos sensores). Com isso, o objetivo principal da integração de dois sistemas é diminuir suas deficiências e melhorar o desempenho final no posicionamento.

### 3.5 Câmera

As câmeras fotogramétricas digitais são um grande avanço para a fotogrametria, a qual também se aplica em agrimensura e atividades de sensoriamento remoto. A partir das imagens digitais armazenadas na forma de pixels é possível obter valores precisos de alturas, comprimentos e formas. Em atividades onde não é necessária precisão das imagens como simples monitoramento utiliza-se câmeras digitais comuns.

De acordo com JUBANSKY (2009) além da imagem em si, devem ser registrados os “metadados” da mesma. Então, para cada foto obtida pelo VANT devem ser conhecidas a hora e a data da exposição, e os sinais de sincronização da IMU e do GPS, oferecendo assim os dados necessários ao tratamento posterior das imagens.

Ao embarcar uma câmera em um VANT exige-se um suporte para sua estabilização com uma IMU para realimentação a fim de garantir o posicionamento correto da câmera nos momentos de aquisição das imagens, outra necessidade é a adaptação ou o uso de um módulo para o acionamento remoto da câmera. A Figura 22 mostra uma câmera com sensor montada em um suporte com movimentação nos três eixos.



Figura 22– Câmera montada em um suporte.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De início teve-se a revisão bibliográfica total do projeto, com artigos, livros, teses, *softwares* a serem utilizados, entre outros. Dando sequência ao plano de trabalho com o estudo da solução anterior (helimodelo) refinaram-se os objetivos do projeto e identificaram-se necessidades de alterações. A partir disto verificou-se um conceito emergente de asas rotativas para os VANTs, os helicópteros de vários rotores, também chamados de

multicópteros. Este tipo de VANT apresentou nas pesquisas várias vantagens em relação aos helicópteros tradicionais, como mostra o Quadro 1, e, portanto, nos encorajou a prosseguir a pesquisa com ele.

Quadro 1 – Comparativo entre tipos de VANTs. Adaptado de: MEDEIROS, 2007.

Características	Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)					
	Avião		Helicóptero		Multicóptero	
	Vantagem	Desvantagem	Vantagem	Desvantagem	Vantagem	Desvantagem
Pouso e Decolagem		Necessidade de grandes áreas	Pouso e decolagem vertical		Pouso e decolagem vertical	
Trajatória		Um pouco limitada	Voa para trás, gira e paira no ar		Voa para trás, gira e paira no ar	
Estabilidade	Facilidade no controle			Controle complexo		Controle complexo
Custo	Relativamente baixo			Alto custo de aquisição e manutenção	Baixo custo de manutenção	
Mecânica	Simple			Complexidade do rotor	Simple	
Velocidade	Alta			Baixa		Baixa
Autonomia	Alta (combustão)			Baixa		Baixa (elétrico)
Aquisição de imagens		Baixa precisão	Precisão alta no posicionamento		Precisão alta no posicionamento	

O levantamento das características dos multicópteros e estudo do seu funcionamento: sua aerodinâmica, princípios de voo, acionamento de motores e métodos de controle, permitiu a pesquisa de todo o *hardware* necessário para o funcionamento e automatização do multicóptero. Obtiveram-se várias alternativas, necessitando-se de um estudo de viabilidades confrontando valores, vantagens e recursos.

A partir destes estudos resultou na escolha da placa *ArduPilot Mega 2.5* que integra todo o *hardware* necessário para controle do VANT, e por ser feita utilizando tecnologia SMD resulta em uma solução de baixo consumo. Esta opção também é mais econômica não necessitando da integração de vários componentes e manufatura de uma placa, além de ser uma tecnologia de código aberto (Plataforma *Arduino*) que dispensa o uso de ferramentas de desenvolvimento específicas e caras.

A Figura 23 mostra algumas das peças utilizadas para montagem do quadricóptero, entre elas estão: a placa *ArduPilot*, os módulos GPS e sem fio, conectores, ESCs, sensor ultrassônico, suporte da câmera e servo.



Figura 23–Peças do quadricóptero.

Na Figura 24 têm-se a placa controladora, a bateria, os ESCs, o GPS e o módulo sem fio montados no quadricóptero e já com suas devidas conexões. Para fixação dos ESC foram utilizadas abraçadeiras plásticas. O módulo sem fio e o GPS foram fixados com fita dupla-face. Todas as ligações foram realizadas por meio de conectores para facilitar e organizar a montagem.

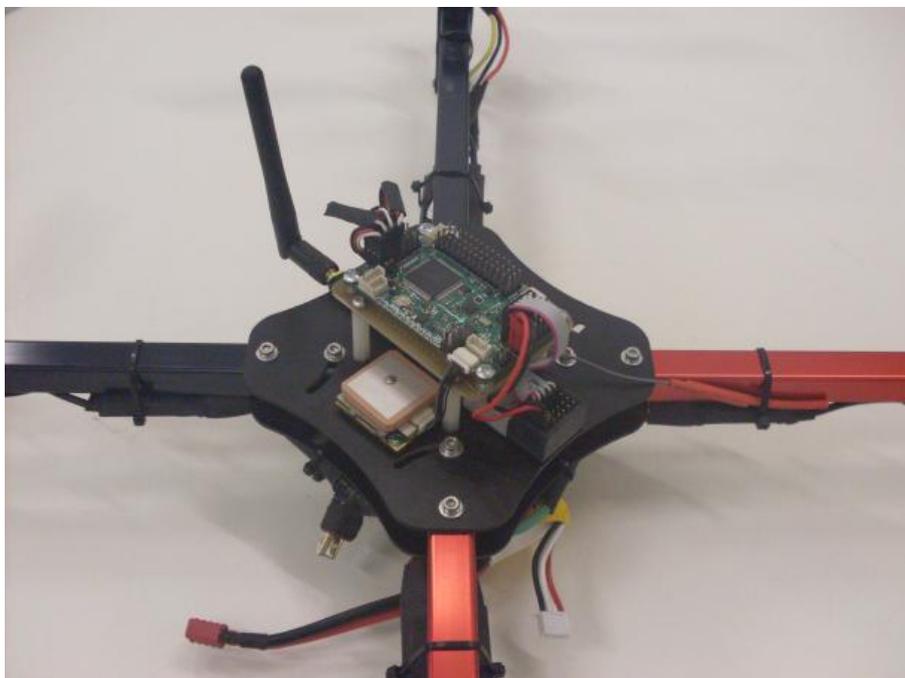


Figura 24 – Detalhes da montagem da placa controladora e demais componentes.

Realizaram-se testes a fim de garantir o funcionamento adequado de cada parte do sistema. Estes testes foram realizados a partir do *software Mission Planner* o qual permitiu a

visualização das variáveis de controle do voo (altitude, ângulos, distâncias e velocidades) e também possibilitou o acionamento dos motores para verificação do funcionamento. O requisito inicial para estes testes foi a comunicação entre a unidade de terra e a aeronave, e como mostra a Figura 25 tal comunicação foi estabelecida com sucesso e todos os dados de telemetria condisseram com o esperado.

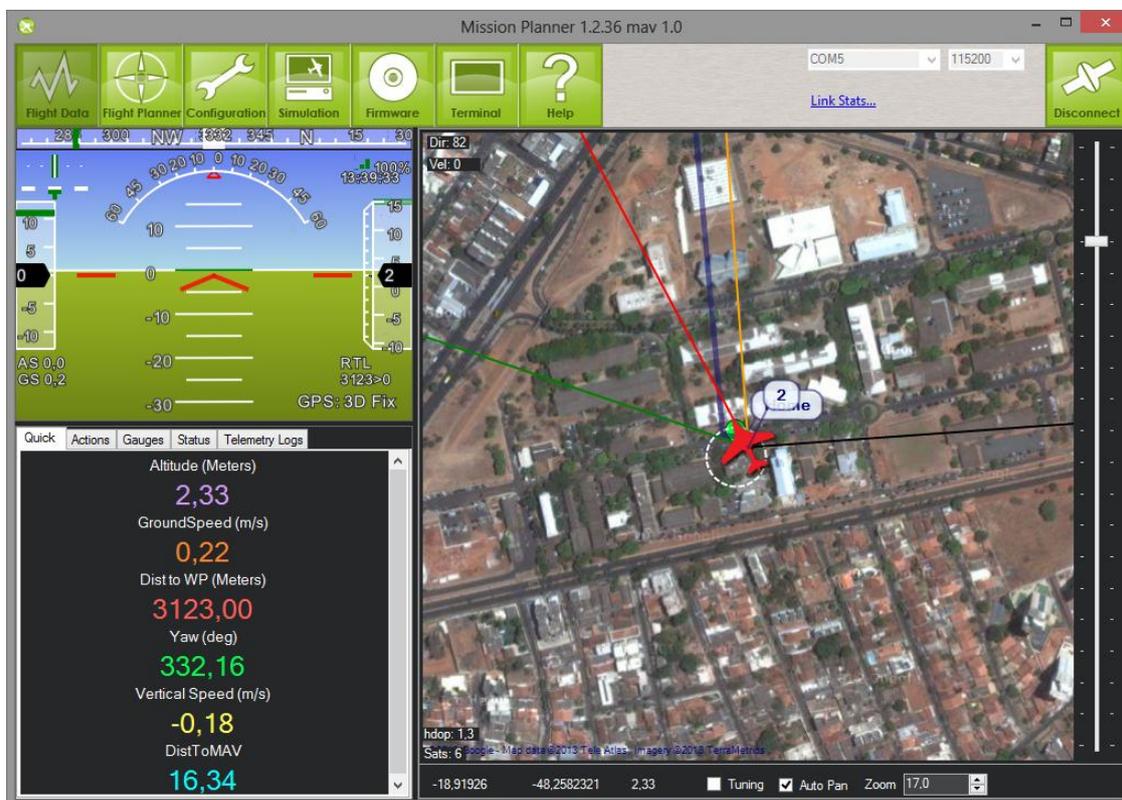


Figura 25 – Tela do *Mission Planner* durante testes.

## 5. CONCLUSÃO

A partir das pesquisas bibliográficas conclui-se que a utilização civil de VANTs está mundialmente cada vez maior o que resulta em um foco de intensas pesquisas, dentre as principais, tem-se a necessidade de se projetar sistemas confiáveis, precisos e com boa autonomia. Nota-se também o desafio de embarcar um sistema totalmente autônomo robusto, daí a necessidade de se projetar um *hardware* que ofereça a possibilidade de implementar algoritmos de controle avançado.

A contribuição deste *hardware* está no desenvolvimento de tecnologia nacional para o controle autônomo de VANTs, pois são muitos os testes e os estudos de técnicas de controle que podem aproveitar este sistema. Com isso, abre-se um espectro bastante amplo para iniciar novas pesquisas nesta área na Universidade Federal de Uberlândia, originando assim diversos

trabalhos futuros. Nesse sentido, como proposta poderia pensar-se em desenvolver a estrutura de controle autônomo do VANT, considerando desde o sensoriamento para coleta de informações, o processamento dessas informações e a atuação do controle.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio ao projeto CNPQ2012-ENG018 com bolsa ao discente, bem como ao suporte e companheiros do Laboratório de Automação, Servomecanismos e Controle (LASEC) por disponibilizar o laboratório para as pesquisas e execução do projeto.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ArduCopter2 (2013). What's new in the APM 2.5 board. Disponível em: <<https://code.google.com/p/arducopter/wiki/APM25board>>. Acesso em: 11 mai. 2013.

ARMADA. The Growing World of Unmanned Airborne Spies. In: Armada International, vol. 28, nº 3, 2004.

BASTOS, K. Céu de Brigadeiro. 18 jun. 2011. Disponível em: <<http://fisikanarede.blogspot.com.br/2011/06/ceu-de-brigadeiro.html>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

FLIGHT DYNAMICS. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Wikimedia, 2011. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_dynamics)>. Acesso em: 29 ago. 2012.

HOFFMANN, G.M. et al. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. In: AIAA CONFERENCE ON GUIDANCE, CONTROL, AND NAVIGATION, 2007, Hilton Head. Proceedings... South Carolina: AIAA, 2007. 20 p.

INCT-SEC – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Sistemas Embarcados Críticos. VANT Tiriba. Disponível em: <<http://www.inct-sec.org/br/produtos/vant-tiriba>>. Acesso em: 27 ago. 2012.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Robô-helicóptero voa com cérebro eletrônico de inseto. 26 fev. 2007. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010180070226>>. Acesso em: 29 ago. 2012.

JUBANSKY, J.et al. Câmeras aerofotogramétricas digitais: novos conceitos e normas. Revista Brasileira de Cartografia, n. 61, p 51-62, abr. 2009.

MARQUES FILHO, E.A. Sistema de navegação inercial GPS/INS de baixo custo com compensação de erros porredesneuraisartificiais.São José dos Campos. Tese (Doutorado) – InstitutoNacional de PesquisasEspaciais, 2011. 150 p.

MARTINS, A.S.Instrumentação e controle de altitude para helimodelo montado em uma plataforma de testes. Brasília. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 2008, 99p.

MEDEIROS, F.A.Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão. Santa Maria. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 122 p.

SAMPAIO, R.P. Sistema de controle de atitude embarcado para vôo autônomo de aviões em escala. Salvador. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) – Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, 2006. 186 p.

STMicroelectronics, UM1472 User Manual – STM32F4DISCOVERY STM32F4 high-performance discovery board, Datasheet, 2012.