

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

Kleber Lima da Silva, Aniel Silva de Moraes, Josué Silva de Moraes, Rubens Gedraite

Laboratório de Automação, Servomecanismos e Controle (LASEC)

Núcleo de Controle e Automação (NCA), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT)

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Av. João Naves de Ávila, 2160 - Bloco 3N - Campus Santa Mônica CEP: 38.400-902. Uberlândia, MG, Brasil

kleber.ufu@hotmail.com, moraes.aniel@gmail.com, josuemorais@gmail.com, rgedraite@gmail.com

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.

I. 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, entre outras.

Uma das classificações de aeronaves 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 [1].

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



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

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.

II. 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 tração (*thrust*), de arrasto (*drag*) e de sustentação (*lift*) são produzidas. 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 [2].

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 [3]. 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*). 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.

A Fig. 1 mostra as forças e momentos em um quadricóptero em relação ao corpo e sistemas de referência inerciais. Os ângulos *roll*, *pitch* e *yaw* (ϕ , θ e ψ , respectivamente) são controlados por impulso diferencial. O impulso diferencial entre motores opostos fornece torque em

ϕ e θ , já entre os pares de motores em contra-rotação fornece o torque em ψ . 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, eV [1].

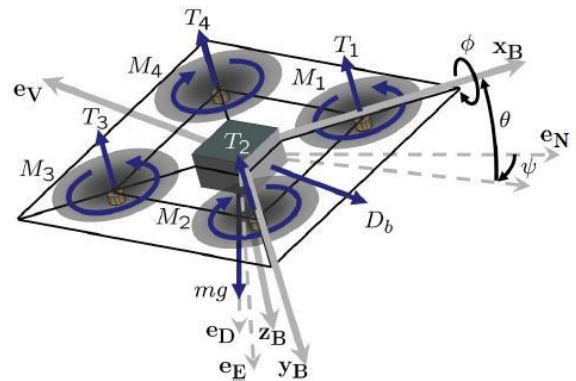


Fig. 1. Diagrama de corpo livre de um quadricóptero [1].

III. 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 [4].

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 [4]. Na Fig. 2 é apresentado um esquema simplificado da mecanização de um INS (sigla em inglês para sistema de navegação inercial).

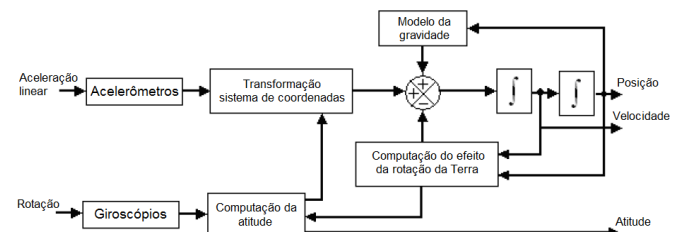


Fig. 2. Fluxograma simplificado de um sistema de navegação inercial [4].

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.

IV. 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 do quadricóptero.

A. Motores Brushless

Este tipo de motor, mostrado na Fig. 3, 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.



Fig. 3. Motor brushless outrunner 850KV.

Os principais parâmetros para a escolha para este tipo de motor são: tensão de trabalho, corrente máxima e um dado que indica 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 um conjunto 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, 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 para evitar superaquecimento. A Fig. 4 mostra o ESC utilizado de 35A adequado ao motor selecionado.



Fig. 4. Controlador de velocidade eletrônico.

C. Sensores

Para o controle autônomo de um VANT necessita-se de sensores para detecção de obstáculos e monitoramento de variáveis necessárias para o posicionamento da aeronave 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. 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 possível utilizando sensores por infravermelho.

Um módulo IMU completo é 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.

O módulo GPS é utilizado para o posicionamento e localização da aeronave, o modelo utilizado é mostrado na Fig. 5. Este módulo apresenta precisão de 0,1 m/s (velocidade), 5 metros (posição) e 1 μ s (sincronização com o GPS); seu consumo médio é de 25 mA.



Fig. 5. Módulo GPS EM-406A.

D. Comunicação sem fio

O único meio de comunicação com um veículo aéreo em pleno voo é sem fio, a Fig. 6 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 adequa ao projeto do VANT para telemetria de sinais e transmissão de comandos por meio de uma unidade em terra (microcomputador).



Fig. 6. Kit de Telemetria 3DR Radio.

E. Bateria

Os VANTs elétricos exigem altas correntes e suas baterias devem suprir as condições necessárias para o funcionamento adequado de todo o sistema eletroeletrônico da unidade. 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 sua recarga as baterias Li-Po não necessitam de um ciclo específico, 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 3,6C (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 possui três células, carga de 2700mAh, e é capaz de fornecer até 30 vezes sua carga (30C), o que indica a possibilidade de correntes até 81A sem danificar a bateria.

F. Quadro de quadricóptero

O quadro do quadricóptero (médio porte – 550mm entre os eixos) utilizado é construído de alumínio e fibra de vidro rígida, que oferece uma combinação de resistência e baixo peso. Ele é mostrado na Fig. 7 com os motores já fixados.



Fig. 7. Quadro do quadricóptero.

V. SISTEMAS PARA CONTROLE

Nesta seção são apresentados os recursos utilizados para o controle e automação do VANT.

A. 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.

Existem atualmente no mercado placas controladoras de voo, 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, mas diminui a complexidade do firmware embarcado.

A opção utilizada no projeto foi a placa *ArduPilot Mega 2.5*, Fig. 8. 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) [5].

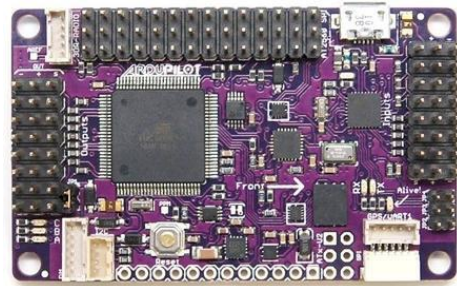


Fig. 8. Kit *ArduPilot Mega* [5].

B. 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 [6]. 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 Fig. 9.

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 (I²C, 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.

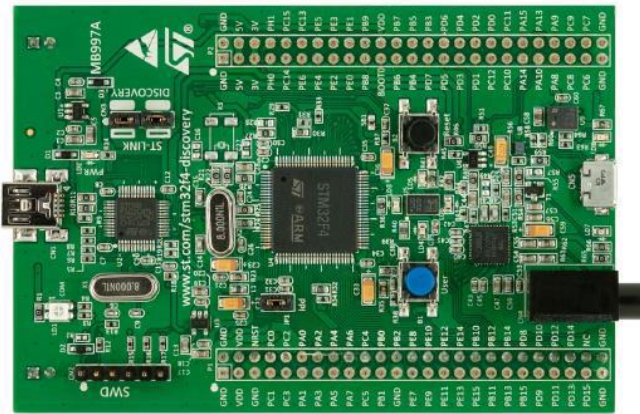


Fig. 9. Kit ARM Cortex-M4 32 bits – STM32F4DISCOVERY [7].

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 10Mbps/s (limitada pela placa controladora).

C. Estação de Terra

Para a configuração e monitoramento de um VANT é indispensável uma estação de terra. O *Software Mission Planner* age 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 Fig. 10 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).



Fig. 10. Tela de visualização dos dados da aeronave (telemetria).

VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O projeto encontra-se em andamento bastando realizar a integração do microcontrolador com a placa controladora. A Fig. 11 mostra a placa controladora, a bateria, os ESCs, o GPS e o módulo sem fio montados no quadricóptero e já com suas devidas conexões.

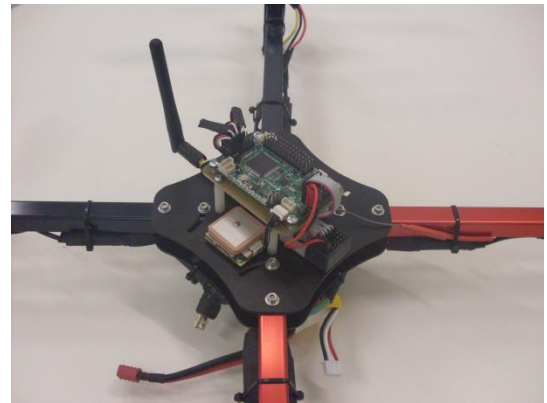


Fig. 11. Detalhes da montagem da placa controladora e demais componentes.

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 Fig. 12 tal comunicação foi estabelecida com sucesso e todos os dados de telemetria condisseram com o esperado.



Fig. 12. Tela do *Mission Planner* durante testes.

VII. CONCLUSÕES

A partir das pesquisas realizadas conclui-se que a utilização civil de VANTs está mundialmente cada vez maior o que resulta em um foco de intensas pesquisas. Nota-se também o desafio de embarcar um sistema totalmente autônomo confiável e robusto, daí a necessidade de se projetar um *hardware* que ofereça a possibilidade de implementar algoritmos de controle avançado.

A importância deste *hardware* esta na contribuição para o desenvolvimento da tecnologia nacional do controle autônomo de VANTs, pois são muitos os testes e os estudos de técnicas de controle que podem aproveitar este sistema, originando assim diversos trabalhos futuros. Com isso, este trabalho serve para iniciar novas pesquisas nesta área na Universidade Federal de Uberlândia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio ao projeto CNPQ2012-ENG018 com bolsa de iniciação científica, 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.

REFERÊNCIAS

- [1] G.M. Hoffmann et al. “Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment”, in *Proc. of AIAA Conference on Guidance, Control, and Navigation*, Hilton Head. South Carolina: AIAA, 2007, 20 p.
- [2] R.P. Sampaio, *Sistema de controle de atitude embarcado para voo autônomo de aviões em escala*. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) – Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. 186 p.
- [3] J.G. Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics*, Cambridge Aerospace Series, 2005.
- [4] E.A. Marques Filho, *Sistema de navegação inercial GPS/INS de baixo custo com compensação de erros por redes neurais artificiais*. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. 150 p.
- [5] ArduCopter2 (2013). *What's new in the APM 2.5 board*. Acedido em 11 de Maio de 2013, em: <https://code.google.com/p/arducopter/wiki/APM25board>
- [6] A.S. Martins, *Instrumentação e controle de altitude para helimodelo montado em uma plataforma de testes*. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, Brasília, 2008, 99p.
- [7] STMicroelectronics, *UM1472 User Manual – STM32F4DISCOVERY STM32F4 high-performance discovery board*, Datasheet, 2012.