

JC-01: Projeto e Construção de um Veículo Aéreo Não Tripulado para Missões de Monitoramento, Mapeamento e Análise de Imagens

Luiz Carlos Querino Filho¹

¹Fatec "Julio Julinho Marcondes de Moura" (Fatec Garça)
Av. Presidente Vargas, 2331 – 17.400-000 – Garça – SP

luiz.querino@fatec.sp.gov.br

Abstract. Popularly known as drones, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are small aircraft without an on board pilot and that can be controlled remotely by a human being or directly by an autopilot. The cheapening and consequent popularization of these vehicles made them widely used, not only as a hobby but also for practical applications in various sectors, such as agriculture, industry, armed forces and inside the scientific community. This article presents the initial specifications of the project and elaboration of an unmanned aerial vehicle destined to carry out missions of monitoring, mapping and image analysis. A mathematical model to be used on the autopilot as well as a PID-based (Proportional-Integral-Derivative) control law are presented. Based on the use of a reference model, the basic components of the vehicle are also defined.

Resumo. Popularmente conhecidos como drones, os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) são aeronaves de pequeno porte sem um piloto a bordo que podem ser controladas remotamente por um ser humano ou por meio de um piloto automático. O barateamento e consequente popularização destes veículos fez com que os mesmos passassem a ser amplamente usados, tanto como objeto de hobby quanto de aplicações práticas em diversos setores, como agricultura, indústria, forças armadas e comunidade científica. Este artigo traz as especificações iniciais do projeto e elaboração de um veículo aéreo não tripulado destinado a realizar missões de monitoramento, mapeamento e análise de imagens. Um modelo matemático a ser usado no piloto automático, assim como uma lei de controle baseada em PID (Proporcional-Integral-Derivativo) são apresentados. Com base no uso de um modelo de referência, também são definidos os componentes básicos do veículo.

1. Introdução

Veículos aéreos não tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como *drones*, tem recebido destaque tanto na mídia quanto no meio científico [Marris 2013].

São aeronaves em escala reduzida e que não possuem um piloto a bordo, e que são controladas por um piloto automático embutido no veículo ou por uma pessoa em uma estação em terra [Branco et al. 2011]. Os VANTs têm sido usados em diversas áreas de atuação, como monitoramento ambiental, análise de plantações, vigilância, busca e resgate e transporte de pequenas cargas [Querino and Branco 2014].

Neste artigo são apresentadas informações sobre o projeto, construção e utilização de um veículo aéreo não tripulado para pesquisa dentro da Fatec “Deputado Julio Julinho Marcondes de Moura”, localizada na cidade de Garça.

O VANT em questão é uma quadricóptero em tamanho reduzido; uma aeronave com capacidade de decolagem e pouso horizontal (Figura 1). Um quadricóptero é uma aeronave de asa rotativa, cujo voo é possibilitado por quatro hélices propulsoras dispostas em um quadro (*airframe*). A variação no sentido e giro dessas hélices faz com que o quadricóptero possa decolar, mudar sua direção de deslocamento e pousar.



Figura 1. Exemplo de um VANT do tipo quadricóptero [Sa and Corke 2012]

O VANT (ou *drone*) resultante desse projeto será referido pela sigla JC-01, sendo essa a forma que o mesmo será denominado dentro deste texto.

2. Objetivos e Justificativa

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é construir um veículo aéreo não tripulado de asa rotativa, ou quadricóptero, com base em um conjunto inicial de componentes e aviônicos, assim como desenvolver o *software* necessário para controle da aeronave, de sua trajetória e da análise de imagens capturadas por uma câmera embutida.

Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- Disponibilizar uma arquitetura completa de montagem e utilização de um veículo aéreo não tripulado, que poderá ser reutilizada por outros pesquisadores;
- Avançar a pesquisa em algoritmos de controle, estimação de dados de sensores e visão computacional, com a publicação dos resultados obtidos;
- Oferecer à comunidade da região onde se situa a Fatec Garça a possibilidade de utilização do veículo desenvolvido em tarefas que vão do monitoramento e mapeamento de regiões à análise visual de plantações (a cidade de Garça é historicamente um centro de cafeicultura);

3. Justificativa

Como justificativas para a realização deste projeto, podem ser destacadas:

- O fato da cidade de Garça, onde está localizada a Fatec “Deputado Julio Juli-
nho Marcondes de Moura”, ser considerada um polo da indústria eletroeletrônica
[de Garça 2016], sendo que essas mesmas poderão contribuir com o projeto e,
posteriormente, se beneficiar do uso do veículo desenvolvido;
- A junção de conceitos e ideias de dois dos cursos existentes na Fatec em questão,
sendo eles “Análise e Desenvolvimento de Sistemas” e “Mecatrônica Industrial”.
- O custo reduzido na criação de um veículo aéreo não tripulado com peças in-
dividuais, como prevê este projeto, se comparado ao valor de aquisição de uma
aeronave pronta;
- O fato do professor Luiz Carlos Querino Filho já possuir experiência prévia
na área de sistemas embarcados em veículos aéreos não tripulados, ates-
tada em publicações nacionais e internacionais [Querino and Branco 2014,
Querino et al. 2015a, Querino et al. 2015b, Ito et al. 2017].

4. Metodologia

O controle do processo de desenvolvimento e gerenciamento das etapas do projeto está sendo realizado com o auxílio da metodologia *Kanban*.

A palavra *Kanban*, do idioma japonês, quer dizer “cartão visual”, como indi-
cado por [Boeg 2011]. A metodologia *Kanban* foi criado no Japão, dentro da linha de
produção da indústria Toyota e passou a ser usada também como uma metodologia para
projetos de software, da mesma forma como o *Scrum* e outros métodos do tipo “ágil”
[Kniberg and Skarin 2010].

A utilização básica do *Kanban* consiste na construção de um fluxo de trabalho,
ou *workflow*, o qual deve obedecer uma sequência pré-definida de tarefas; estas, por sua
vez, são costumeiramente dispostas em um quadro branco ou lousa de fácil acesso e
visualização. As tarefas, na forma de cartões, ficam categorizadas em etapas que podem
ser simplesmente “A fazer”, “Fazendo” e “Feito” [Kniberg and Skarin 2010].

Ao invés de utilizar um recurso físico, como um quadro branco, é muito comum
que equipes de desenvolvimento de *software* usem ferramentas que automatizam o geren-
ciamento do quadro *Kanban* de um projeto. Isso pode ser feito por *softwares* desenvolvi-
dos para dispositivos móveis, computadores *desktop* ou até mesmo executados dentro de
um navegador, como uma aplicação *Web*. O Trello é um desses *softwares* e possibilita a
criação e gerenciamento de um quadro *Kanban* diretamente pelo navegador.

O projeto e desenvolvimento do veículo aéreo não tripulado JC-01 está sendo
orientado pela metodologia *Kanban*, com o uso de um quadro de tarefas criado no Trello
¹.

À medida que o desenvolvimento do drone JC-01 avança, novos cartões de tarefas,
mas específicos na sua definição, são adicionadas na coluna “A fazer”. Quando uma tarefa
começar a ser realizada, seu respectivo cartão é movido para a coluna “Fazendo”; quando
a tarefa tiver sido finalizada, seu cartão é colocado em “Feito”.

¹Disponível em <http://www.trello.com>

Apesar de simples, a metodologia *Kanban* se adequa ao processo de desenvolvimento do veículo proposto neste projeto, pois o mesmo será elaborado de forma incremental e com etapas já previamente definidas.

5. Modelo Matemático e Lei de Controle

Para que um sistema de controle alcance seus objetivos de projeto e análise [Albertos and Mareels 2010], é necessário que um modelo matemático simplificado, porém preciso, seja elaborado. Esse modelo deve contar, basicamente, com a definição dos seguintes elementos:

- As variáveis de estado do sistema, que mostrarão como o mesmo está se comportando em um dado instante de tempo t ;
- As entradas que serão aplicadas ao sistema para que o mesmo reaja de modo a alcançar seus objetivos, indicadas pela letra u ;
- As saídas resultantes da aplicação da disciplina de controle;
- O conjunto de equações diferenciais que relacionam as entradas às saídas, possibilitando assim uma predição do comportamento do sistema.

Para este projeto, foi escolhido o modelo matemático para um quadricóptero simples apresentado por [Kumar 2015].

As variáveis utilizadas para representar o estado do quadricóptero podem ser observadas na figura 2. O estado é constituído de doze variáveis (x_1 a x_{12}), que indicam as seguintes informações sobre o veículo:



$x_1 = x$	$x_7 = \dot{x}$
$x_2 = y$	$x_8 = \dot{y}$
$x_3 = z$	$x_9 = \dot{z}$
$x_4 = \phi$	$x_{10} = p$
$x_5 = \theta$	$x_{11} = q$
$x_6 = \psi$	$x_{12} = r$

Figura 2. Variáveis de estado do quadricóptero [Kumar 2015]

- x : posição do quadricóptero no eixo x ;
- y : posição do quadricóptero no eixo y ;
- z : posição do quadricóptero no eixo z ;
- ϕ : ângulo de rolagem
- θ : ângulo de guinada
- ψ : ângulo de arfagem
- $\dot{x}$: velocidade linear no eixo x (derivada da posição neste eixo)
- $\dot{y}$: velocidade linear no eixo y (derivada da posição neste eixo)
- $\dot{z}$: velocidade linear no eixo z (derivada da posição neste eixo)
- p : velocidade angular de rolagem

- q : velocidade angular de guinada
- r : velocidade angular de arfagem

A matriz de rotação para o quadricóptero pode ser definida na equação 1:

$$\begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta - \sin \phi \sin \psi \sin \theta & -\cos \phi \sin \psi & \cos \psi \sin \theta + \cos \theta \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi + \cos \psi \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \psi & \sin \psi \sin \theta - \cos \theta \sin \phi \cos \psi \\ -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

As forças atuando no quadricóptero, geradas para cada uma das suas quatro hélices rotativas (F_1, F_2, F_3, F_4), podem ser totalizadas de acordo com a equação 2:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - mga_3 \quad (2)$$

onde mga_3 é o vetor de força da gravidade, sendo m a massa da aeronave.

De forma complementar, a soma dos momentos agindo na aeronave é definida pela equação 3:

$$M = r_1 F_1 + r_2 F_2 + r_3 F_3 + r_4 F_4 + M_1 + M_2 + M_3 + M_4 \quad (3)$$

onde r_n é a distância entre a hélice n e o centro de gravidade do quadricóptero. Os momentos individuais em cada rotor são indicados por M_n .

As velocidades angulares do veículo são obtidas por meio da equação 4:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & \sin \phi \\ \sin \theta & 0 & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$ e $\dot{\psi}$ são, respectivamente, as derivadas dos ângulos de rolagem, arfagem e guinada.

A aceleração nos eixos y e z , assim como no ângulo de rolagem ϕ , são dadas pelas derivadas de segunda ordem destas variáveis, obtidas pela equação 5:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{z} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{m} \sin \phi & 0 \\ \frac{1}{m} \cos \phi & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{xx}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde m é a massa do quadricóptero, g a aceleração da gravidade, I_{xx} coeficiente de inércias, u_1 a força exercida pelos motores e u_2 o momento resultante.

Com base nessas equações, já foi possível definir o espaço de estados a lei de controle inicial que governará o quadricóptero JC-01 em uma situação de equilíbrio (equação 6):

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde $\dot{q}$ representa as derivadas das variáveis em q .

Para uma situação de equilíbrio, na qual o quadricóptero permanece flutuando em uma posição fixa, o espaço de estados pode ser simplificado de acordo com a equação 7:

$$q_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 0 \\ 0 \\ \psi_0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} q_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Seguindo aquilo que foi predisposto no projeto apresentado, o quadricóptero desenvolvido será controlado por um sistema de controle do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que é sumarizado na equação 8:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Porém, como informa [Kumar 2015], o modelo matemático apresentado na equação 5 é não-linear. Como um controlador PID apenas pode ser utilizado em sistemas lineares é necessário linearizar as equações de movimento do quadricóptero, seguindo o que é indicado por [Kumar 2015].

A linearização da dinâmica substitui as funções não-lineares por aproximações de Taylor de primeira ordem, dentro de uma situação de equilíbrio. Numa situação onde $\phi = 0$, $\sin \phi \approx \phi$ e $\cos \phi \approx 1$, podemos assumir que

$$\begin{aligned} \ddot{y} &= -g\phi \\ \ddot{z} &= -g + \frac{u_1}{m} \\ \ddot{\phi} &= \frac{u_2}{I_{xx}} \end{aligned}$$

onde u_1 e u_2 são as entradas no quadricóptero (força do motor e momento, respectivamente).

As equações de controle para manutenção do veículo em um estado permanente de suspensão no ar em um local definido (*hovering*) são finalmente obtidas como

$$\begin{aligned}
u_1 &= m[g - k_{v,z}\dot{z} + k_{p,z}(z_0 - z)] \\
u_2 &= I_{xx}(\ddot{\phi}_c + k_{v,\phi}(\dot{\phi}_c - \dot{\phi}) + k_{p,\phi}(\phi_c - \phi)) \\
\phi_c &= -\frac{1}{g}(k_{v,y}(-\dot{y}) + k_{p,y}(y_0 - y))
\end{aligned}$$

Como modelo arquitetural do VANT JC-01 foi designado o quadricóptero AR.Drone 2.0. Na próxima seção deste artigo são especificados os componentes de *hardware* básicos escolhidos de forma a equivaler aos recursos do AR.Drone.

6. Arquitetura Básica do JC-01

Seguindo as especificações do AR.Drone e do Arducopter, como predisposto na seção anterior, passou-se ao processo de definição, validação e aquisição dos componentes (também denominados aviônicos) do JC-01.

Nesta seção estão listados e detalhados os principais componentes aviônicos selecionados. Os mesmos (assim como os demais aqui não listados em razão da brevidade necessária neste relatório sintético), para serem homologados para este projeto, passaram por um processo de validação que abrangeu as seguintes etapas:

1. Similaridade em recursos e capacidades com componentes equivalentes no Parrot AR.Drone
2. Disponibilidade abundante e à baixo custo no mercado
3. Obediência a padrões abertos, de forma que o mesmo possa ser substituído por outros componentes equivalentes
4. Compatibilidade com a plataforma de *hardware* Arduino, amplamente usada em cursos de Fatecs e ETECs
5. Compatibilidade com a plataforma do *software* Ardupilot, cujo código-fonte em C/C++ é aberto e de licenciamento livre.

A lista resumida de componentes iniciais para o JC-01 é a seguinte:

- Microcontrolador APM (Ardupilot Mega) com *case* de proteção
- Módulo GPS M8N com bússola eletrônica integrada
- Transmissor e receptor de 433Mhz. para telemetria
- Dois pares de hélices e quadro
- Quatro motores DC 2212 920 KV do tipo *brushless* (sem escova)
- Quatro ESC (*Electronic Speed Controllers*) *brushless* 30A SimonK

O microcontrolador APM (Figura 3) é um "clone" do Arduino Mega, cuja especificação de *hardware* e *software* é aberta. Neste caso, o APM foi escolhido por conveniência, uma vez que é um dos "clone" do Arduino Mega mais acessíveis do mercado. Em caso de futura indisponibilidade deste, ele pode ser facilmente substituído pelo próprio Arduino Mega ou equivalente.

Como pode ser observado no diagrama da figura 4, um dos diferenciais do APM em relação ao Arduino Mega padrão é a existência de um giroscópio, acelerômetro e barômetro - essenciais para o sistema de controle da aeronave - integrados na placa. Em um Arduino Mega convencional, tais dispositivos precisam ser agregados com *shields* ou



Figura 3. APM (Ardupilot Mega) adquirido para uso no projeto

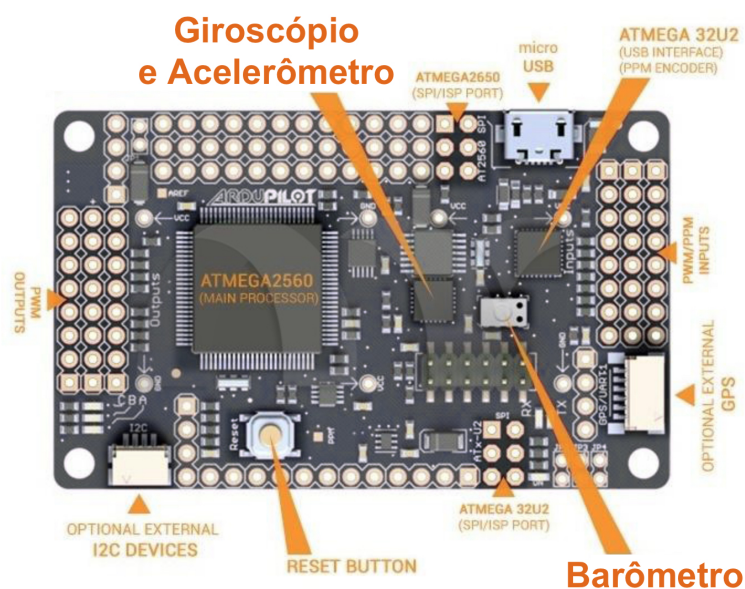


Figura 4. Diagrama do APM indicando localização dos componentes. Adaptado de <http://www.nyplatform.com/>



Figura 5. Módulo de GPS com bússola integrada

módulos adicionais, o que ocasiona um aumento no peso do veículo e consequente necessidade de maior força dos motores, com significativo aumento no consumo de bateria.

Outro componente fundamental ao JC-01 é o módulo receptor de sinal do sistema de posicionamento global (GPS: *Global Positioning System*). Optou-se em utilizar um receptor GPS externo à placa, de forma a reduzir a interferência de ruídos na obtenção das coordenadas de longitude e latitude. O módulo escolhido (Figura 5) também possui outro elemento fundamental para o sistema de controle e piloto automático: um magnetômetro, a popular "bússola".

O *software* do sistema de controle e piloto automático usa os sensores integrados ao APM (acelerômetro, giroscópio e barômetro), associado aos sensores externos (receptor de GPS e bússola) para obter as variáveis de estado especificadas no modelo matemático descrito no relatório parcial anterior.

A lei de controle a ser usada (PID: Proporcional-Integral-Derivativo) utilizará os dados dos sensores como entradas e variáveis de estado para obter as saídas necessárias à estabilização da aeronave e controle da sua trajetória.

Os quatro motores DC *brushless* para as hélices rotativas podem ser observados na figura 6. Os circuitos eletrônicos de controle de velocidade (ESC: *Electronic Speed Controller*) para cada motor também já foram adquiridos em conformidade com os requisitos previamente estabelecidos.

7. Considerações Finais

Este artigo apresentou as especificações básicas e etapas iniciais do projeto de um quadricóptero para monitoramento e análise de imagens. Como se trata de um projeto ainda em desenvolvimento, resultados futuros serão divulgados posteriormente.

Paralelamente ao processo de definição e aquisição dos componentes de *hardware*, a escrita do *software* de controle e piloto automático com base no Arducopter já



Figura 6. Motores DC para as hélices rotativas

foi iniciada. Antes da finalização da montagem da aeronave, o código, escrito em C/C++ será testado como um *plugin* do simulador de voo X-Plane.

A especificação final do projeto conterá, além do código-fonte aberto do sistema de controle, diagramas da arquitetura, instruções sobre a utilização dos aviônicos e montagem do veículo.

Referências

- Albertos, P. and Mareels, I. (2010). *Feedback and control for everyone*. Springer.
- Boeg, J. (2011). *Kanban em 10 Passos: Otimizando o fluxo de trabalho em sistemas de entrega de software*. InfoQ-Brasil/C4Media.
- Branco, K., Pelizzoni, J., Oliveira Neris, L., Trindade, O., Osorio, F., and Wolf, D. (2011). Tiriba - a new approach of uav based on model driven development and multiprocessors. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1–4.
- de Garça, C. (2016). Garça tem espécie de ‘vale do silício’. *Comarca de Garça*.
- Ito, F., Querino, Filho, L. C., Inoue, R., and Branco, K. C. (2017). Uav cooperative formation control simulated in x-plane. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*.
- Kniberg, H. and Skarin, M. (2010). *Kanban and Scrum: Making the Most of Both*. InfoQ-Brasil/C4Media.
- Kumar, V. (2015). Robotics: Aerial robotics. Coursera MOOC.
- Marris, E. (2013). Fly, and bring me data. *Nature*, 498(7453):156.
- Querino, Filho, L., Branco, K., and Inoue, R. (2015a). A decentralized control system for fixed wing unmanned aerial vehicles in formation using robust h-infinity control with markovian jumps. In *Anais do III Workshop de Comunicação em Sistemas Embarcados Críticos – WoCCES 2015*, pages 51–60.

- Querino, Filho, L. C. and Branco, K. (2014). Proposta de um sistema aberto de controle em hardware e software para voo direcionado à entrega confiável de cargas. In *Anais do II Workshop de Comunicação em Sistemas Embarcados Críticos – WoCCES 2014*, pages 17–23.
- Querino, Filho, L. C., Filho, J. F. R., da Silva, N. B. F., and Branco, K. C. (2015b). Attitude estimation of a simulated flight and gps positioning with kalman filter. In *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pages 742–750.
- Sa, I. and Corke, P. (2012). System identification, estimation and control for a cost effective open-source quadcopter. In *Robotics and automation (icra), 2012 IEEE international conference on*, pages 2202–2209. IEEE.