

## Plataforma para Análise de Quadricópteros: Periféricos em Sistema de Código Aberto

Umberto X. da Silva\*. Marcio A. F. Montezuma\*  
Alessandro N. Vargas\*

\* Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR,  
Av. Alberto Carazzai 1640, Cornélio Procópio, PR, Brasil  
umbertor@alunos.utfpr.edu.br  
montezuma@utfpr.edu.br  
avargas@utfpr.edu.br

---

**Abstract:** A quadricóptero is a complex electronic system, involving communication protocols for the acquisition of data from inertial sensors, the application of filters to guarantee the reliability in the attitude reading, the acquisition of radio frequency signals for remote operation, a serial protocol intermediating the configuration and calibration through ground control software and, the main objective, the topology of the embedded control. The main contribution of this work is the presentation of a platform, which, through a data capture system, allows calibration of control gains, as well as a dynamic analysis of the object under study. It seeks to identify the control loops, calibrate the gains through a developed platform, and hold discussions on the control topology.

**Resumo:** Um quadricóptero é um sistema eletrônico complexo, envolvendo protocolos de comunicação para a aquisição de dados de sensores inerciais, a aplicação de filtros a fim de garantir a confiabilidade na leitura de atitude, a aquisição dos sinais por rádio frequência para operação remota, um protocolo serial intermediando a configuração e calibração através de um software de controle em solo e, do objetivo maior, a topologia do controle embarcado. A principal contribuição deste trabalho é a apresentação de uma plataforma, que através de um sistema de aquisição de dados, permite a calibração dos ganhos de controle, assim como a análise dinâmica do objeto em estudo. Procura-se identificar as malhas de controle, calibrar os ganhos através de uma plataforma desenvolvida, e realizar discussões sobre a topologia de controle.

**Keywords:** Quadricópteros; Drones; Control; SAS; Stability Augmentation System.

**Palavras-chaves:** Quadricópteros; Drones; Controle; SAS; Sistema de Aumento de Estabilidade.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Veículos aéreos não tripulados (VANTs, do inglês Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) é nomenclatura usada para veículos aéreos sem a necessidade de uma pessoa embarcada para operação. A comunidade de pesquisa na área de robótica vem se interessando em VANTs com características autônomas graças as projeções tecnológicas de instrumentação, avanços da computação e sensoriamento, junto a redução de custos destes sistemas. (BOUADI et al., 2007; GRZONKA et al., 2012; HAMEL et al., 2002; NONAMI et al., 2010)

VANTs possuem vantagens sobre aeronaves tripuladas quando usados para vigilância aérea, reconhecimento e inspeção de ambientes complexos e hostis. (NONAMI et al., 2010). Porém, nos últimos anos, fatores políticos, econômicos e tecnológicos vêm proporcionando novas aplicações para estes veículos, além das militares, como: fotografia para agricultura de precisão, apresentado por Valente et al. (2010), monitoramento ambiental, apresentado por Rodríguez-Mata et al. (2018), meteorologia, visto em Moyano (2013), mapeamento, pesquisado em Fraundorfer et al. (2012),

monitoramento e combate de incêndios, apresentado por Alexis et al. (2009) e Alshbatat (2018), entre outras. Das diversas categorias destas aeronaves, destacam-se os quadricópteros, caracterizados pela propulsão por quatro rotores de empuxo vertical, podendo decolar e aterrissar na vertical (do inglês Vertical Take-off and Landing, VTOL), pairar e voar com alta manobrabilidade. (SZAFRANSKI; CZYBA, 2011)

O empuxo de cada motor possui intensidade variável, dependendo da estratégia de controle adotada, de acordo com a leitura e processamento dos dados fornecidos pelos sensores inerciais, que exercem função de uma unidade de medida inercial (do inglês Inertial Measurement Unit, IMU), realizando, portando, o controle de atitude. Tal controle é constituído por malhas controladoras para cada movimento capaz de manter uma estimativa dos ângulos de rolagem, arfagem e guinada enquanto o quadricóptero se movimenta. (KIM et al., 2012; PAULA, 2012).

A contribuição deste trabalho é a apresentação do desenvolvimento de uma plataforma, que abrange uma estrutura, um quadricóptero e um sistema de aquisição de dados

entre o objeto de estudo e um software de análise, possibilitando tomadas de decisões na calibração dos ganhos de controle em diferentes modos de voo fornecidos ao usuário, assim como na análise dinâmica em diferentes configurações. Apresentar e debater as topologias de controle presentes em quadricópteros em projetos de código fonte aberto, assim como analisar a eletrônica embarcada nestes, utilizando-se de uma plataforma de teste e análise em tempo real, permitiu-nos validar tais projetos, conforme detalhado adiante.

## 2. A PLATAFORMA

A plataforma experimental desenvolvida neste projeto tem o objetivo de estudo das malhas de controle presentes em um quadricóptero. Aqui, detalharemos métodos para estudo da dinâmica de VANTs, criando uma base para comparação e validação de diversas configurações.

A metodologia desenvolvida nesse trabalho consiste em cinco etapas principais. A primeira sendo aplicada ao estudo do código aberto, a segunda na construção de um protótipo quadricóptero, a terceira na construção de uma estrutura de sintonia, a quarta na aplicação de um software para análise de dados e a quinta na calibração dos ganhos das malhas identificadas. A seguir, prosseguimos com a descrição detalhada de cada uma dessas etapas.

### 2.1 Estudo do Código Fonte Aberto

Projetos de código fonte aberto (do inglês Open Source Projects, OSPs) fazem a utilização de sites de hospedagem comunitária, como Google Code e Github, para a criação e divulgação de códigos, plantas e esquemáticos eletrônicos. Essas criações são disponibilizadas como licença pública geral (do inglês General Public License, GPL), abrindo oportunidade para desenvolvedores independentes de todo o mundo. O código aberto permite a comunidade se engajar, testando novas características e retornando à própria comunidade respostas sobre várias condições e configurações, tornando o firmware mais confiável. (KIM et al., 2012).

No nosso estudo em particular, no início do projeto, tornou-se necessária a ambientação entre as placas eletrônicas dos OSPs, ou seja, analisou-se os diversos modelos encontrados no mercado, como: a MultiWii Pro, OpenPilot CC3D, Ardupilot e a KKmulticopter. Tal análise, consiste na utilização do sistema, dos softwares de controle em solo das plataformas, no estudo das tecnologias utilizadas e nas diferentes abordagens de programação tomadas nos firmwares. Das diferenças encontradas, destacam-se os sensores inerciais presentes em cada placa e o filtro de fusão, aplicado nestes, no firmware dos projetos, sendo de regra, Filtro Complementar para microcontroladores de 8 bits e Filtro de Kalman nos de 32 bits.

Decidiu-se adotar o firmware da MultiWii Pro por possuir recursos abrangentes com maior facilidade de modificação, como a baixa dependência entre recursos nos códigos. Tal decisão nos obrigou a realizar uma análise técnica minuciosa para a produção da documentação da mesma, ainda não existente na comunidade. Geramos documentação contendo as seguintes descrições: características e comunicação dos

sensores inerciais por protocolo I2C, implementação do Filtro Complementar para estimativa de atitude, controle remoto do quadricóptero por meio da aquisição de sinais de rádio frequência e técnicas de interrupção, geração de sinais PWM para os drivers dos motores, técnica de transmissão e técnica de recepção para a criação de um protocolo de comunicação serial assíncrono, gravação de dados de calibração na memória EEPROM e, do foco principal, a topologia das malhas de controle conforme o modo de operação do quadricóptero. Toda dependência do firmware original com o GPS foi retirada, criando assim, um novo firmware simplificado, assim como um esquemático detalhado da placa. Tais documentos podem ser compartilhados pelos autores, sob demanda via e-mail.

### 2.2 Construção do Protótipo

Na construção, foi utilizado um frame de orientação em “x” já disponível no mercado, o Alware Quad Flyer Spider 500X. Toda adaptação adicional foi realizada com a produção em medida de peças através do sistema de controle numérico computadorizado (do inglês Computer Numeric Control, CNC) com o auxílio do software AUTOCAD.

A eletrônica embarcada no protótipo contém: 4 motores brushless de 1800KV, 4 hélices de 10x4.5”, 1 controlador eletrônico de velocidade (do inglês Electronic Speed Controllers, ESC) de 4 canais, 1 receptor 2.4GHz de 6 canais, 1 transmissor 2.4GHz de 5 canais, 2 baterias de Li-po (ion-polímero) de 2200mAh com descarga máxima de 35c e a própria placa controladora, MultiWii Pro. Duas baterias foram conectadas em paralelo, visando aumentar a corrente de descarga máxima, e também aumentar o tempo de voo. O drone construído pode ser visto na Fig. 1.

Do esquemático desenvolvido para a placa, têm-se presente duas linhas de alimentação, uma referente aos ESCs e outra advinda da porta USB. Estas duas linhas estão protegidas, cada uma, por um diodo Schottky DFLS130L que se conecta diretamente a dois reguladores de tensão conectados em série, um AMS1117-5.0 e um AMS1117-3.3, sendo de 5V e 3.3V, respectivamente. Utilizando a tensão de 5V, o ATmega2560 é energizado, utilizando três capacitores de acoplamento de 0.1uF em paralelo ao seu terminal de alimentação, utilizando-se também de um cristal de 16MHz para geração de Clock. Na linha de dados e sincronização do protocolo de comunicação I2C, endereçam-se um giroscópio ITG-3200, um acelerômetro BMA180, um magnetômetro HMC5883L e um barômetro BMP085, todos estes com seus devidos capacitores. Estas duas linhas estão alimentadas pela tensão de 3.3V com dois resistores de pull-up, garantindo a capacitância do barramento e velocidade de transferência de 400KHz. Terminais do microcontrolador com características de interrupção externa são conectados diretamente aos canais do receptor do sistema rádio controle, e terminais com geração de sinais PWM conectam-se direto aos ESCs. Por fim, para a comunicação serial foi utilizado o módulo CP2102.

### 2.3 Estrutura de Sintonia

Relembre que controladores necessitam de ajustes em seus ganhos para atingir a estabilidade. (ASTROM, 1995; OGATA, 2010). Neste processo de sintonia, pode-se ter um sistema totalmente instável até quando o controle está atuando. E num quadricóptero, se este processo de sintonia do controlador é feito em voos livres, há o risco de ocasionar danos irreparáveis na estrutura provenientes de quedas ou aterrissagens bruscas. Deve-se então, construir uma estrutura de testes, onde o quadricóptero fique fixo, sem riscos de colisões. Soluções semelhantes podem ser observadas em Sá (2012), em Grzonka, Grisetti e Bugard (2012) e em Ceren e Altug (2009).

Em nossa plataforma experimental, o quadricóptero é preso em estrutura metálica através de elásticos. A posição e o número de elásticos usados podem variar de acordo com o movimento a ser calibrado, rolagem ou arfagem, uma ilustração na Fig. 2.

Com o quadricóptero fixado na estrutura, pode-se observar a resposta do mesmo de acordo com a alteração de carga no sistema, analisando o pico de resposta, tempo de estabilização e tempo de assentamento. (ASTROM, 1995; OGATA, 2010). Basta então, aplicar algum método de sintonia de ganhos para buscar a estabilidade.



Fig. 1 Quadricóptero construído em sua forma final.



Fig. 2 Estrutura de Metalon para sintonia dos ganhos.

### 2.4 Aquisição e Análise de dados

O Software original de controle em solo do MultiWii Pro auxilia em várias funções básicas, como: calibração e apresentação dos dados dos sensores inerciais, possibilita alteração dos ganhos das topologias de controle embarcados e apresentação da duração do PWM enviado aos motores. Porém, o Software não possibilita armazenar dados importantes para análise de controle. Devido a esta dificuldade, desenvolvemos neste projeto uma aquisição de dados para monitorar a resposta do controle. Foi utilizada a plataforma do MATLAB/SIMULINK para receber os dados, tratá-los e apresentá-los em tempo real.

### 2.5 Identificação e Calibração do Controle

O controle de atitude pode ser implementado usando técnicas clássicas de controle, como proporcional (P), proporcional derivativo (PD) e proporcional integral derivativo (PID), sendo estas dependentes de ajustes em seus ganhos. (ASTROM; HAGGLUND, 1995; OGATA, 2010). Estes controles são comumente encontrados em sistemas embarcados nos OSPs, aparecendo em várias configurações diferentes, principalmente em cascata e com um sistema de aumento de estabilidade (do inglês Stability Augmentation System, SAS) com o intuito de aumentar a taxa de amortecimento. (KIM et al., 2012). Periféricos de controle clássico, como o SAS, são soluções da comunidade, já que pesquisas relacionadas ao controle de tais sistemas enfrentam grande dificuldades, principalmente na presença de turbulências atmosféricas. (BOUADI et al., 2007).

Do firmware original fornecido pelo fabricante, mantiveram-se somente dois modos de voos, o Modo Acro e o Modo Level. O Modo Acro utiliza apenas os dados do giroscópio na realimentação do controle, ou seja, o sinal de referência do controle atua na velocidade em que o quadricóptero rotaciona em determinado movimento. Os movimentos de rolagem, arfagem e guinada atuam sobre este modo. Já o Modo Level utiliza os dados do acelerômetro e giroscópio na realimentação do controle, sendo assim, o sinal de referência do controle é o ângulo desejado para determinado movimento. Apenas os movimentos de rolagem e arfagem atuam sobre este modo.

Para cada eixo de movimento de rotação do quadricóptero há apenas uma malha de controle atuante por vez, podendo ser de topologia diferente, dependendo do modo de voo ativado, e com ganhos diferentes. Portanto, quando ativado o Modo Level, o movimento de arfagem é controlado pela malha do Modo Acro, pois este só é atuado por este modo.

## 3. PERIFÉRICOS DE CONTROLE

### 3.1 Wind-up do Integrador

Pode acontecer que a variável controlada alcance os limites do atuador. Quando isso acontece, a realimentação é interrompida e o atuador permanecerá em saturação. Se um controlador com ação integral é usado, o erro continuará sendo integrado. Fato conhecido como Wind-up. (ASTROM, 1995).

Nas controladoras open-source, O efeito Wind-up é comumente contornado com apenas um saturador simples no termo integrativo, conforme pode ser visto nos firmwares dos OSPs MultiWii Pro e Ardupilot. (ardupilot.org/copter).

### 3.2 Sistema de Aumento de Estabilidade

Maioria das aeronaves militares e comerciais de alta performance apenas alcançam os requerimentos de qualidade de voo com o uso de um Sistema de Aumento de Estabilidade (SAS). (STEVENS; LEWIS, 1992). Isto vem da ideia de prover estabilidade artificial para uma aeronave que não possui características propícias de voo. Estas aeronaves, portanto, são instáveis em malha aberta e seria impossível voar sem um sistema de controle automático. O SAS basicamente utiliza sensores que medem a taxa de variação angular da aeronave e utilizam estes dados processados para os servomecanismos que comandam as superfícies aerodinâmicas de controle. Deste modo, um momento aerodinâmico proporcional à velocidade angular e sua derivada podem ser usados para produzir um efeito de amortecimento no movimento. (NELSON, 1998; STEVENS; LEWIS, 1992).

Colocando o foco nos quadricópteros, de acordo com Miller (2011) e Szafranski e Czyba (2011), a dinâmica rotacional de um quadricóptero em malha aberta é instável. Modelos lineares sugerem que os polos do sistema estão localizados no semi-plano direito do eixo imaginário, portanto é necessário, para sua estabilização, a implementação de um algoritmo de controle com realimentação. (KIM et al., 2012). Neste trabalho adotamos o SAS. O esquemático contendo o SAS pode ser visto na Fig. 3.

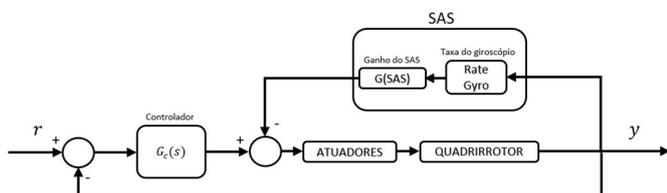


Fig. 3 Controlador clássico genérico ( $G_c(s)$ ) com adição do sistema de aumento de estabilidade. Sendo  $r$  a referência e  $y$  a saída do sistema.



Fig. 4 Teste de calibração do movimento de arfagem. No canto inferior direito é demonstrada a telemetria em tempo real para tomadas de decisão.

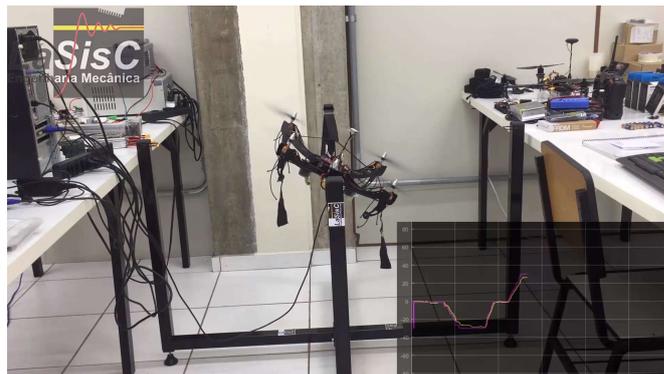


Fig. 5 Teste de calibração do movimento de rolagem. No canto inferior direito é demonstrada a telemetria em tempo real para tomadas de decisão.

## 4. RESULTADOS

Posicionando o quadricóptero na plataforma, e isolando o eixo para calibração, limitando-se em rolagem e arfagem devido à característica da estrutura, tem-se a resposta do sistema em tempo real. As Fig. 4 e Fig. 5 demonstram dois dos testes realizados no quadricóptero para a sintonia dos ganhos de controle.

No processo de calibração, foi aplicado um método de validação empírico, levando em consideração que os ganhos responsáveis pelos comportamentos dinâmicos de atitude são sintonizados isoladamente para cada movimento, havendo assim, uma dinâmica fortemente acoplada. Utilizando o protocolo serial em conjunto à interface SIMULINK/MATLAB, envia-se os novos ganhos, e em seguida, recebe-se os dados de forma gráfica para análise. Repete-se o processo, em diversas configurações e de forma ordenada, até a estabilidade satisfatória do sistema.

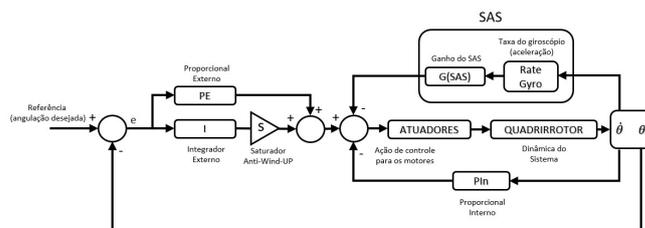


Fig. 6 Malha de controle do Modo Level. A referência (setpoint) é o ângulo desejado do movimento, PE e I são os ganhos proporcional e integral de um controlador PI. O termo integral passa por um filtro Wind-up. A malha interna faz referência à velocidade, aplicando redução na ação de controle dado um ganho PIn, e gerando dados para o cálculo da taxa da velocidade angular, aplicando-se o SAS com ganho G(SAS).

Tabela 1. Ganhos da malha de controle do Modo Level

Termo	Valor
PE	0.7
I	0.002
PIn	0.5
G(SAS)	0.718

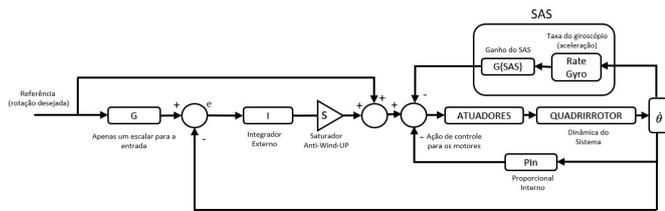


Fig. 7 Malha de controle do Modo Acro. A referência (setpoint) é a rotação desejada dado um escalar de calibração G. A ação de controle é dada pelo incremento direto da rotação e um termo integrativo com um saturador Wind-up.

Tabela 2. Ganhos da malha de controle do Modo Acro

Termo	Valor
I	0.003
PIin	0.5
G	2
G(SAS)	0.718

Para a malha de controle no Modo Level, apresentada na Fig. 6, há atribuição dos mesmos ganhos, calculados de forma empírica, tanto para o movimento de rolagem ou arfagem, dispostos na Tabela 1. É observável neste modo, a referência sendo aplicada para o ângulo de movimento ( $\theta$ ), gerando um erro que passa por um controlador PI com filtro Wind-up, que gera uma ação de controle, que é, ainda, avaliada pela velocidade por uma malha interna com ganho proporcional, e taxa da velocidade ângular do sistema pelo sistema de aumento de estabilidade. Neste modo, a referência de controle e a posição do stick do rádio controle são coincidentes.

No Modo Acro mantem-se os mesmos ganhos para os dois movimentos avaliados. Em sua malha de controle, apresentada na Fig. 7, é notada a diferença na referência do controle, assim como na topologia da malha externa, a fim de garantir a característica do modo, ou seja, a referência do controle é dada a cada incremento ou decremento da posição do stick. Os ganhos aplicados de forma empírica a este modo estão apresentados na Tabela 2.

As Fig. 8 e Fig. 9 mostram as saídas do sistema no Modo Level dada uma referência nos movimentos de rolagem e arfagem, respectivamente. As Fig 10 e Fig 11 demonstram o teste para o sistema no Modo Acro dada uma referência nos movimentos de rolagem e arfagem, respectivamente. No Modo Acro é observada que a geração da referência é dada pela soma dos valores anteriores do stick, e por esta estar numa grandeza de velocidade, foi aplicado um escalar para a apresentação. Na avaliação deste, deve-se atentar na coincidência da variação do movimento, e não na angulação propriamente dita.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nos gráficos fica evidente a diferença dos dois modos de voos, assim caracterizando, pela perspectiva do usuário, o Modo Level por um voo mais seguro e o Modo Acro por um voo mais agressivo. Em ambos os modos de voo, é observável que, os dados do giroscópio, ou seja, as velocidades dos eixos do

sistema, são utilizados numa malha interna com um ganho proporcional e no cálculo da taxa de variação entre leituras do mesmo para a aplicação do sistema de aumento de estabilidade, fazendo em ambos, a subtração na ação de controle. Esta topologia garante a estabilidade do sistema em movimentos bruscos, agindo tanto na velocidade e sua taxa de variação do sistema.

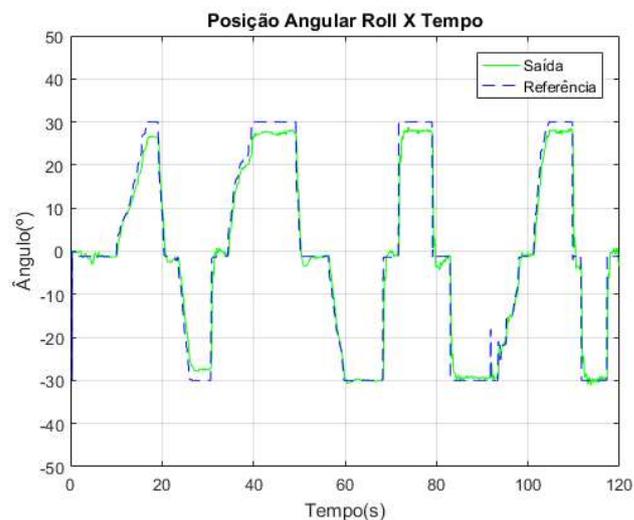


Fig. 8 Teste de calibração dos ganhos no Modo Level para o movimento de rolagem. Em verde tem-se a saída do sistema após aplicação do filtro complementar e em azul a referência dada pelo stick do rádio transmissor. OBS: A referência foi limitada em  $30^\circ$  a fim de evitar esforços mecânicos nos elásticos, e sendo também, uma margem suficiente para trabalhar com um sistema de controle linear.

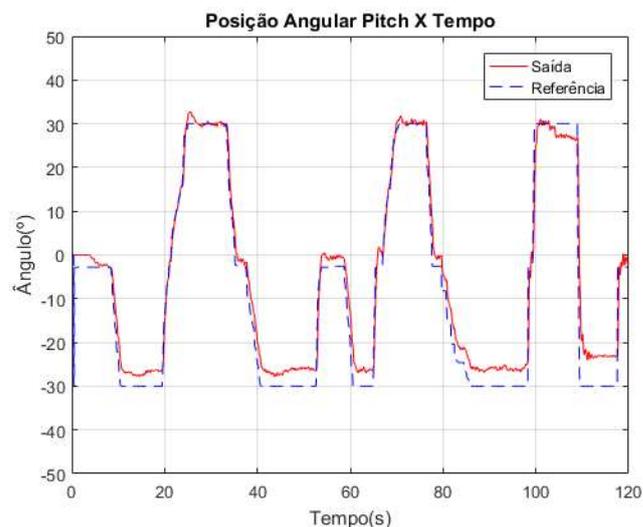


Fig. 9 Teste de calibração dos ganhos no Modo Level para o movimento de arfagem. Em vermelho tem-se a saída do sistema após a aplicação do filtro complementar e em azul a referência dada pelo stick do rádio transmissor. OBS: A referência também foi limitada em  $30^\circ$  a fim de evitar esforços mecânicos nos elásticos, e sendo também, uma margem suficiente para trabalhar com um sistema de controle linear.

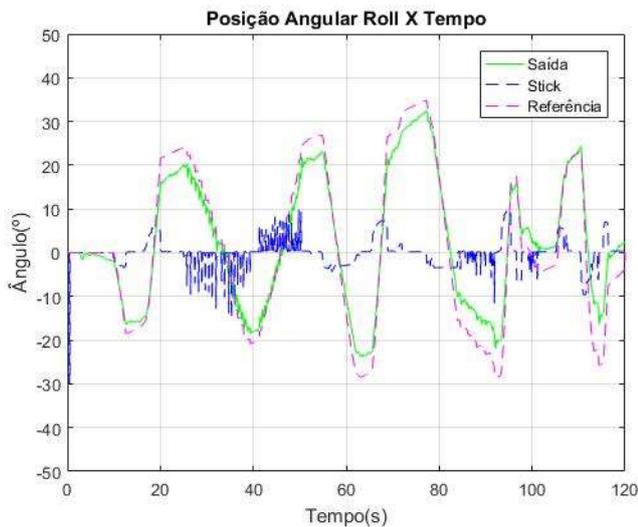


Fig. 10 Teste de calibração dos ganhos no Modo Acro para o movimento de rolagem. Em verde tem-se a saída do sistema após aplicação do filtro complementar, em azul os incrementos de velocidade enviado pelo stick do rádio transmissor e em magenta a referência das variações calculada em escala.

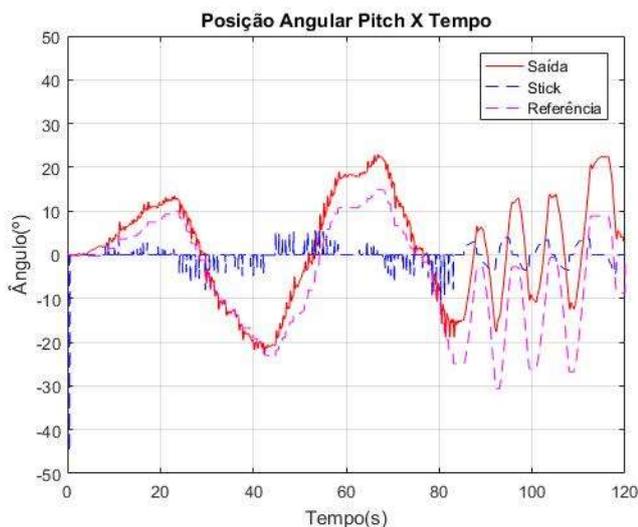


Fig. 11 Teste de calibração dos ganhos no Modo Acro para o movimento de arfagem. Em vermelho tem-se a saída do sistema após aplicação do filtro complementar, em azul os incrementos de velocidade enviado pelo stick do rádio transmissor e em magenta a referência das variações calculada em escala. OBS: não houve qualquer limitação pelo sistema, havendo cautela por observação.

O termo proporcional aplicado na malha interna, adicionando à ação de controle geral uma característica proporcional à derivada da saída, permite o controle mais eficiente da velocidade de resposta no regime transiente. O sistema de aumento de estabilidade, o SAS, por meio da taxa de medição do giroscópio em realimentação com um ganho, aumenta a taxa de amortecimento do sistema. (MOLLON, 2020; STEVENS; LEWIS, 1992).

Quando em Acro Mode, o stick do transmissor do rádio controle indica a intensidade de rotação desejada em escala ao

movimento do canal respectivo. Isso pode ser observado na malha externa de controle, onde o erro é gerado por meio de uma referência com um ganho de ajuste e a realimentação do giroscópio. Este erro é atuado apenas sobre um termo integrativo, que gera uma rotação contínua no eixo em controle de acordo com o erro acumulado e o incremento da ação de controle pela própria referência. Tanto no gráfico da Fig. 10, quanto no da Fig. 11, as variações da referência e da saída apresentam o mesmo comportamento, algo previsto, já que toda a malha trabalha com dados do giroscópio.

## 6. CONCLUSÕES

A plataforma, sendo considerada a dinâmica em estudo, a estrutura e o sistema de aquisição de dados, tem sua contribuição, permitindo ao usuário ilustrar estratégias de controle baseadas em termos teóricos e em testes reais, sendo assim, um meio de validar os OSPs, algo inovador em documentações e pesquisas.

Com o firmware simplificado, facilita-se aplicar outras topologias de controle advindas dos demais OSPs e pesquisas, podendo assim, gerar um comparativo sólido, buscando a melhor aplicação para determinadas ocasiões.

Abre-se ainda, campo para estudar os impactos dinâmicos resultantes de mudanças físicas da planta, como a envergadura da estrutura do quadricóptero. Ou ainda, análise sobre a eficiência energética dada alteração no passo ou diâmetro da hélice. Neste contexto, discute-se a influência sobre a dinâmica da planta com a utilização da estrutura para calibração vista neste trabalho, diferenciando-se da dinâmica de um voo livre.

## REFERÊNCIAS

- Alexis, K.; Nikolakopoulos, G.; Tzes, A.; Dritsas, L. Coordination of Helicopter UAVs Aerial Forest-Fire Surveillance. Applications of Intelligent Control to Engineering Systems, Vol 39, p 169-193, 2009.
- Alshbatat, A. I. N. Fire Extinguishing System for High-Rise Buildings and Rugged Mountainous Terrains Utilizing Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, p 23-29, 2018.
- Astrom, K.; Häggglund, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2 Ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995.
- Bouadi, H.; Bouchoucha, M.; Tadjine, M. Sliding Mode Control based on Backstepping Approach for an UAV Type-Quadrotor. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol:1, No:2, p 39-44, 2007.
- Ceren, Z.; Altug, E. Vision-based servo control of a quadrotor air vehicle. IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, p 84-89, 2009.

- Fraundorfer, F.; Heng, L.; Honegger, D.; Lee, G. H.; Meier, L.; Tanskanen, P.; Pollefeys, P. Vision-based autonomous mapping and exploration using quadrotor MAV. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2012.
- Grzonka, S.; Grisetti, G.; Burgard, W. A Fully Autonomous Indoor Quadrotor. IEEE Transactions on Robotics, p 90-100, 2012.
- Hamel, T.; Mahony, R.; Lozano, R.; Ostrowski, J. Dynamic Modelling and Configuration Stabilization for an X4-FLYER. 15<sup>TH</sup> Triennial World Congress, Barcelona, Spain, p 217-222, 2002.
- Kim, H. J.; Lee, D.; Lim, B. H.; Park, J. Build your own quadrotor. IEE Robotics & Automation Magazine, p 33-45, 2012.
- Miller, D. S. Open Loop System Identification of a Micro Quadrotor Helicopter from Closed Loop Data. Thesis. University of Maryland. 157p – 2011.
- Mollon, M. F. Projeto, Identificação e Controle de uma Plataforma de Quadricóptero. Dissertation. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. 201p Cornélio Procopio – PR 2020.
- Moyano, J. C. Quadrotor UAV for Wind Profile Characterization. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, 2013.
- Nelson, R. C. Flight Stability and Automatic Control. 2 Ed. B Singapore: McGrawHill Book Co, 1998.
- Nonami, K.; Kendoul, F.; Suzuki, S.; Wang, W.; Nakazawa, D. Autonomous Flying Robots, Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles. 1 Ed. Springer, 2010.
- Ogata, K. Engenharia de controle moderno. 5 ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.
- Paula, J. C. de. Desenvolvimento de um VANT do tipo quadricóptero para obtenção de imagens aéreas em alta definição. Dissertation. Universidade Federal do Paraná – UFPR. 110p Curitiba – PR 2012.
- Rodríguez-Mata, A. E.; Flores, G.; Martínez-Vásquez, A. H.; Mora-Felix, Z. D.; Castro-Linares, R.; Amabilis-Sosa, L. E. Discontinuous High-Gain Observer in a Robust Control UAV Quadrotor: Real-Time Application for Watershed Monitoring. Mathematical Problems in Engineering, 2018.
- Sá, R. C. Construção, modelagem dinâmica e controle PID para estabilidade de um veículo aéreo não tripulado do tipo quadricóptero. Dissertation. Universidade Federal do Ceará – UFC. 94p Fortaleza – CE 2012.
- Stevens, B. L.; Lewis, F. L. Aircraft Control and Simulation. 1Ed. New York: John Wiley & Sons, 1992
- Sunada, M. M. Acionamento de um posicionador linear de ultraprecisão empregando uma redução harmonic drive com controle de velocidade. Dissertation. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 162p Florianópolis – SC 2007.
- Szafrański, R.; Czyba, R. Different Approaches of PID Control UAV Type Quadrotor. Proceedings of the International Micro Air Vehicles conference summer edition, p 70-75, 2011.
- Valente, J.; Sanz, D.; Cerro, J.; Rossi, C.; Garzón, M.; Hernández, J. D.; Barrientos, A. Techniques for Area Discretization and Coverage in Aerial Photography for Precision Agriculture employing mini quad-rotors. Proceedings of the First International Workshop on Robotics and Associated High Technologies and Equipment for Agriculture, p 85-97, 2011.