

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DE UM QUADRIMOTOR ARDRONE PARROT

LEONARDO L. LOPES*, ALEXANDRE S. BRANDÃO*, MÁRIO SARCINELLI FILHO†, RICARDO CARELLI‡

**Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciência Exatas e Tecnológicas
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, Brasil*

†*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória – ES, Brasil*

‡*Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina*

Emails: leolelislopes@yahoo.com.br, alexandre.brandao@ufv.br,
mario.sarcinelli@ele.ufes.br, rcarelli@inaut.unsj.edu.ar

Abstract— This work aims at comparing and experimentally validating a white box model previously proposed and a black box model here discussed for a quad-rotor ArDrone Parrot. More specifically, the study aims at validating the white box model parameters obtained from the literature reference and empirically adjusted by comparing the input reference and the response of a real vehicle. Then a black box ARX model is obtained in order to verify the possibility of modeling the quadrotor through a set of uncoupled systems, performing a coupled maneuver. The responses obtained by exciting the two models and the real vehicle are presented, which validate both modeling proposals.

Keywords— Aerial robotics, White Box model, System identification.

Resumo— Este trabalho tem como objetivo comparar e validar experimentalmente os modelos caixa branca, apresentado previamente, e caixa preta para um quadrimotor ArDrone Parrot. Mais especificamente, o trabalho visa validar os parâmetros do modelo caixa branca obtidos da literatura de referência e ajustados de forma empírica, através da comparação dos dados de entrada e saída obtidos com um veículo real. Em seguida, um modelo caixa preta ARX é obtido, a fim de verificar a possibilidade de modelagem do quadrimotor através de sistemas desacoplados, executando uma manobra acoplada. As respostas dos modelos e as correspondentes excitações são apresentadas, validando ambas as propostas de modelagem.

Palavras-chave— Robótica aérea, Modelo Caixa Branca, Identificação de sistemas.

1 Introdução

Um veículo aéreo não tripulado (VANT) de pás rotativas constitui uma das mais complexas máquinas voadoras, devido à sua habilidade de decolar e aterrissar verticalmente, realizar um voo pairado, mover-se adiante e para o lado, enquanto se mantém em uma mesma cota vertical, além da possibilidade de poder mudar completamente sua direção de voo e de poder deter seu movimento abruptamente (Kim and Tilbury, 1998; Castillo-Garcia et al., 2005). Tais características possibilitam manobras de voo em ambientes de pequenas dimensões como, por exemplo, laboratórios e galpões (Tournier et al., 2006).

Entre esses VANTs encontram-se os quadrimotores. Trata-se de uma classe de helicóptero na qual a propulsão é gerada através de quatro rotores com dimensões e potências iguais, dispostos em forma de cruz. Nessa configuração, dois rotores de extremidades opostas em relação ao centro geométrico giram no sentido horário, enquanto os outros dois giram no sentido anti-horário, para anular o torque de reação produzido por cada rotor, conforme a Figura 1. A combinação da variação das velocidades de giro de cada motor permite que o quadrimotor se movimente em qualquer direção no espaço, caracterizando sua grande manobrabilidade.

Apesar de serem pouco frequentes em termos de uso diário, os quadrimotores são mais estáveis e apresentam todos os benefícios de voo obtidos por um helicóptero convencional. Em contrapartida, eles apresentam uma baixa capacidade de carga em voo, quando comparados a helicópteros de dimensões similares, e apresentam um maior consumo de bateria, devido ao seu sistema de atuação.

No que diz respeito à modelagem matemática de aeronaves de escala reduzida, existem duas abordagens definidas na literatura de referência: uma baseada nas equações físicas do sistema e outra baseada em técnicas de identificação de sistemas. Tais abordagens não são excludentes. Muitas vezes, é necessária a utilização de uma

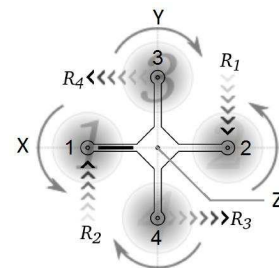


Figura 1: Vista de cima simplificada da configuração do quadrimotor.

para simplificação da outra. Em linhas gerais, a primeira abordagem utiliza as equações de movimento da mecânica para representação de um sistema físico, enquanto a segunda estima o modelo dinâmico do sistema físico com base em dados de excitação e de resposta.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo comparar e validar experimentalmente um modelo caixa branca, apresentado previamente em (Brandao et al., 2012a), e um modelo caixa preta aqui desenvolvido, para um quadrimotor ArDrone Parrot, ilustrado na Figura 2. Especificamente, o trabalho visa validar os parâmetros do modelo caixa branca obtidos da literatura de referência e ajustados de forma empírica, através da comparação dos dados de entrada e saída tomados de um veículo real. Em seguida, um modelo caixa preta ARX é obtido, a fim de verificar a possibilidade de modelagem do quadrimotor através de sistemas desacoplados, executando uma manobra acoplada.

2 Modelagem de um Quadrimotor ArDrone

O modelo completo de um quadrimotor pode ser representado por quatro subsistemas interconectados (Koo and Sastry, 1999; Ahmed et al., 2010), conforme mostrado na Figura 3. Em tal diagrama, u_θ , u_ϕ , $u_{\dot{\psi}}$ e u_z são as entradas para os valores dos ângulos de arfagem θ , rolagem ϕ , taxa de guinada $\dot{\psi}$ e taxa de elevação vertical \dot{z} , respectivamente. Já ω_i e f_i , para $i = 1, 2, 3, 4$, são as velocidades desenvolvidas por cada motor e as forças geradas por eles, respectivamente. Por fim, $\xi \in \mathbb{R}^3$ e $\eta \in \mathbb{R}^3$ representam a posição e orientação do veículo no espaço cartesiano.

Os dois primeiros blocos mostrados na Figura 3 são responsáveis pela recepção dos sinais de controle e pela geração de forças reais de propulsão que irão atuar na aeronave. Estes blocos compõem o que daqui em diante será denominado Modelo de Baixo Nível. Por outro lado, os dois blocos subsequentes recebem ações de controle indiretas (forças e torques) que irão atuar no modelo de corpo rígido do veículo para sua movimentação no espaço 3-D. Tais blocos, por sua vez, formam o Modelo de Alto Nível. Detalhes sobre a modelagem do tipo caixa branca aplicada



Figura 2: Quadrimotor ArDrone Parrot: Plataforma experimental utilizada.

a um quadrimotor ArDrone Parrot podem ser encontrados em (Brandao et al., 2012a).

Um método distinto desse é através de uma modelagem do tipo caixa preta. Aqui foi utilizada a modelagem ARX, representada por

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_{n_a}y(k-n_a) = b_1u(k-n_k) + \dots + b_{n_b}u(k-n_b-n_k+1) + e(k),$$

onde $y(k)$ é a saída, $u(k)$ é a entrada, $e(k)$ é um ruído branco, n_a é o número de regressores da saída, n_b é o número de regressores da entrada e n_k é o número de amostras da entrada que ocorrem antes da entrada afetar a saída (também chamado de tempo morto do sistema). Em sua forma compacta, tem-se

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + e(k), \quad (1)$$

onde $A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}$, $B(q) = b_1q^{-n_k} + b_2q^{-n_k-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_k-n_b+1}$ e q é o operador atraso unitário.

3 Validação Experimental

Esta seção visa validar os parâmetros listados na Tabela 1 e utilizados na parte experimental de (Brandao et al., 2012b) para a validação dos controladores de voo usando um quadrimotor ArDrone Parrot.

Sabe-se que para determinação dos parâmetros do modelo de baixo nível é necessário conhecer os comandos de entrada (sinais de excitação) e as saídas em forças e torques a serem aplicadas no modelo de alto nível, definido pela dinâmica de corpo rígido. A Figura 3 ilustra o diagrama de blocos do modelo dinâmico do quadrimotor ArDrone Parrot. No presente trabalho, os únicos dados disponíveis são os sinais de entrada (que são conhecidos) e as respostas de orientação η e velocidades lineares $\dot{\xi}$ e angulares $\dot{\eta}$. Logo, ao realizar uma estratégia de identificação de sistemas, o modelo a ser identificado estaria

Tabela 1: Parâmetros do modelo caixa branca do quadrimotor ArDrone Parrot.

Parâmetros do modelo de alto nível	
$m = 0.380$ [kg]	$k_1 = 0.1782$ [m]
$k_2 = 0.0290$ [N · m · s ²]	$I_{xx} = 9.57 \cdot 10^{-3}$ [kg · m ²]
$I_{yy} = 18.57 \cdot 10^{-3}$ [kg · m ²]	$I_{zz} = 25.55 \cdot 10^{-3}$ [kgm ²]
$I_{xy} = 0$ [kg · m ²]	$I_{xz} = 0$ [kg · m ²]
$I_{yz} = 0$ [kg · m ²]	
Parâmetros do modelo de baixo nível	
$k_{d\phi} = k_{d\theta} = 1.0$ [V/rad]	$k_{d\psi} = 0.01$ [V/rad]
$k_{dz} = 0.01$ [V/m]	$k_{p\phi} = k_{p\theta} = 10$ [Vs/rad]
$k_{d\dot{\psi}} = 15$ [Vs/rad]	$k_{dz} = 15$ [Vs/m]
$r = 8.5$	$R = 8.214$ [Ω]
$J_m = 2.8 \cdot 10^{-8}$ [kg · m ²]	$B_m = 1.06 \cdot 10^{-5}$ [N · m · s]
$K_m = 0.39$ [N · m/A]	$K_b = 8.00 \cdot 10^{-5}$ [N · m/A]
$C_f = 1.1429 \cdot 10^{-9}$ [N · s ²]	$C_t = 3.2 \cdot 10^{-11}$ [N · m · s ²]
$\phi_{\max} = 25$ [°]	$\theta_{\max} = 25$ [°]
$\dot{\psi}_{\max} = 10$ [°/s]	$\dot{z}_{\max} = 0.6$ [m/s]

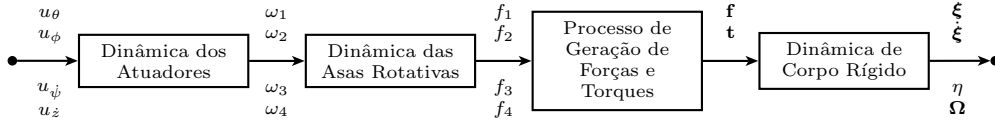


Figura 3: Representação em diagrama de blocos da dinâmica de um VANT.

relacionando as entradas de comandos reais (u_i) e as variáveis de postura, o que não é de interesse desta proposta.

Dada a complexidade do modelo dinâmico da aeronave, conforme visto em (Brandao et al., 2012a), a separação do modelo em dois blocos (baixo e alto nível) facilita a análise do sistema, bem como a proposta de controladores (que podem ser adaptados para qualquer máquina subatuada com alto acoplamento dinâmico entre as partes ativa/atuada e passiva/não atuada). Entretanto, para que seja feita uma modelagem, é essencial o conhecimento da saída do bloco de baixo nível, obtida, por exemplo, através de um sensor de forças e torques. Em tal abordagem, o ArDrone, preso a uma plataforma contendo tal sensor, seria excitado nas tarefas de decolagem, aterrissagem, avanço longitudinal, dentre outras manobras, e os dados capturados durante a intenção de movimento seriam utilizados para modelar sua parte de baixo nível. Porém, dada a indisponibilidade desse sensor até a presente data, nesse trabalho nenhuma estratégia de identificação foi aplicada para obtenção dos parâmetros do ArDrone Parrot, ficando, portanto, como sugestão para trabalhos futuros.

Para validação das constantes listadas na Tabela 1, a Plataforma AuRoRa (Pizetta et al., 2012) foi utilizada para simular e experimentar simultaneamente um ArDrone Parrot, com entradas de excitação em degrau. Primeiramente, cada entrada de controle foi excitada separadamente, mantendo as demais iguais a zero. Na sequência, a fim de analisar a resposta da aeronave em um movimento acoplado, as entradas de controle foram excitadas em conjunto (com exceção do movimento de guinada).

No primeiro caso, o sinal de excitação de entrada está mostrado na Tabela 2. Vale lembrar que os sinais de controle reais aplicados ao modelo de baixo nível estão normalizados na faixa ± 1 . A Figura 4 apresenta a comparação dos modelos do ArDrone Parrot real e simulado através da resposta de excitação degrau aplicada individualmente para cada sinal de controle real u_i aplicado à aeronave.

Na sequência, de posse dos dados de entrada e saída obtidos no experimento de excitação individual das entradas, foram criados modelos ARX, através do método dos mínimos quadrados, para cada uma das entradas, ou seja, foram criados modelos desacoplados. De posse desses

modelos, a fim de analisar a resposta dos modelos a um movimento acoplado do ArDrone, foram utilizados os dados de excitação coletiva das entradas como dados de validação. Para a criação dos modelos, os dados foram divididos 25% para modelagem e 75% para validação.

Os valores do número de regressores (n_a , n_b e n_k) utilizados para cada modelo ARX e o Fit (medida de quanto o modelo se encaixa na saída real, em porcentagem), obtidos para predição livre, estão descritos na Tabela 3. Vale mencionar que a análise de resíduos foi realizada para um intervalo de confiança de 90%, no qual os modelos se enquadram.

A Figura 4(a) apresenta a resposta ao degrau para o ângulo de rolagem. Note-se que, apesar das mudanças bruscas de referência, o modelo matemático apresenta uma resposta que acompanha a tendência daquela correspondente ao veículo real. Para valores de entrada de menor amplitude, é possível verificar que as respostas são mais próximas. Uma análise similar pode ser feita para o ângulo de arfagem, mostrado na Figura 4(b). Uma verificação idêntica pode ser feita para o modelo ARX obtido.

Uma análise um pouco distinta deve ser feita para as variáveis de altitude e guinada, pois os sinais de controle utilizados são taxas de variação. Logo, as respostas obtidas são dadas pela integração de \dot{z} e $\dot{\psi}$. No caso do ângulo de guinada, observou-se que as tendências para o veículo real e simulado são próximas em forma e amplitude. Por sua vez, as altitudes

Tabela 2: Valores de entrada de excitação individuais para as variáveis de controle reais enviadas ao ArDrone Parrot (u_θ , u_ϕ , u_ψ e u_z).

Tempo [s]	0–2,5	2,5–6	6–12	12–15
u_i	0.5	-0.5	0.25	-0.25
Tempo [s]	15–20	20–25	25–27	27–30
u_i	0.1	-0.1	0.5	-0.1

Tabela 3: Parâmetros dos modelos ARX.

Entrada	n_a	n_b	n_k	Fit
u_θ	4	7	1	71.26
u_ϕ	2	15	1	73.06
u_ψ	1	9	2	90.66
u_z	9	1	6	72.92

das aeronaves se diferenciam em módulo, porém seguem o mesmo comportamento. Tendo em vista que a determinação de posição de uma aeronave no espaço 3-D por odometria apresenta grande incerteza no mundo real, uma solução para minimizar a diferença entre as curvas seria fusionar os dados obtidos pela unidade inercial e pelo sensor de ultrassom a bordo. Vale mencionar que tais erros não são contemplados para a aeronave simulada.

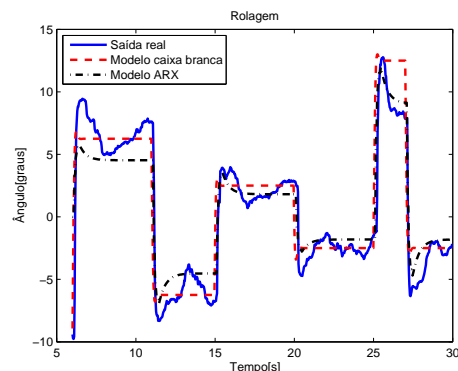
Como a guinada da aeronave é obtida de forma indireta, os autores optaram por mostrar diretamente o comportamento da taxa de guinada do veículo real em comparação com os modelos caixa branca e ARX, os quais são próximos em forma e amplitude (ver Figura 4(c)). Por sua vez, para a taxa de elevação vertical, o modelo ARX segue a tendência da saída real com amplitude consideravelmente próxima, enquanto o modelo caixa branca segue a tendência da saída real, porém com um pequeno deslocamento temporal (uma vez que não leva em conta o atraso de transporte em sua modelagem).

No segundo caso, utilizando as entradas de controle de baixo nível descritas na Tabela 4, os veículos simulado e real devem realizar uma manobra tridimensional de deslocamento longitudinal, lateral e normal, mantendo o ângulo de guinada em um valor constante (uma vez que a excitação da taxa de guinada é igual a zero). A Figura 5 ilustra o comportamento dos ângulos de rolagem e de arfagem assim como da taxa de variação da altitude dos veículos durante a tarefa. É possível verificar que durante a manobra acoplada os ângulos de referência são seguidos com relativa proximidade. Entretanto, assim como no caso anterior, o sinal de altitude acompanha em forma, porém não em amplitude.

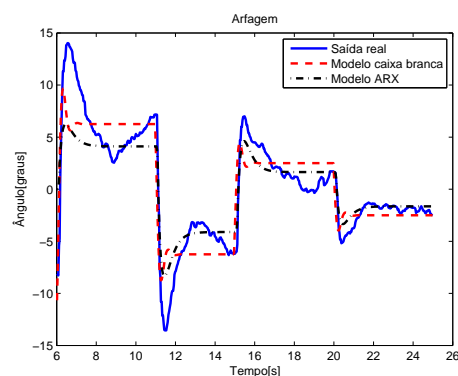
Portanto, este trabalho demonstra que os parâmetros atribuídos ao modelo matemático descrito em (Brandao et al., 2012b) apresentam um comportamento de seguimento de tendência de orientação da aeronave simulada e da aeronave real. Em contraste, o posicionamento da aeronave simulada, quando comparado ao da aeronave real, fica comprometido em função dos erros de deslizamento (*drifting*) inerentes aos acelerômetros que compõem a unidade inercial. Porém, um sensor de

Tabela 4: Valores de entrada de excitação para as variáveis de controle reais enviadas ao ArDrone Parrot (u_θ , u_ϕ , u_ψ e u_z), para análise de voo.

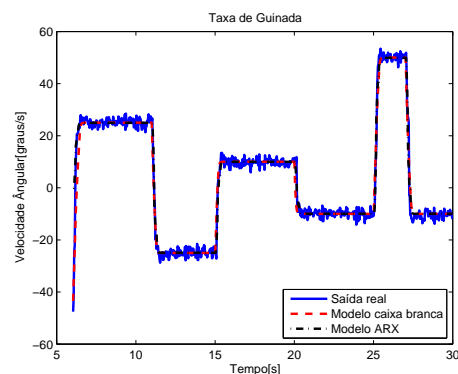
Tempo [s]	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15
u_θ	0.25	0	-0.25	0	0.25
u_ϕ	0	0.25	-0.25	0.25	-0.25
u_ψ	0	0	0	0	0
u_z	0	0	0	0.25	-0.25



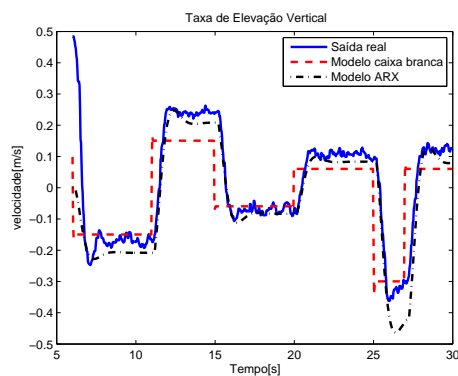
(a) Rolagem.



(b) Arfagem.

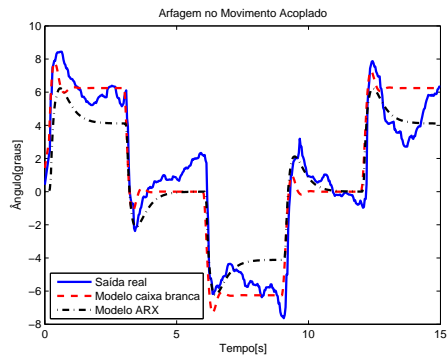


(c) Taxa de variação de Guinada.

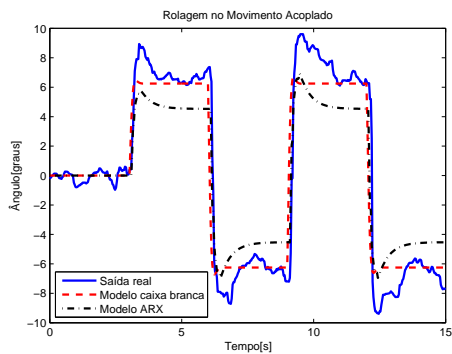


(d) Taxa de variação de Altitude.

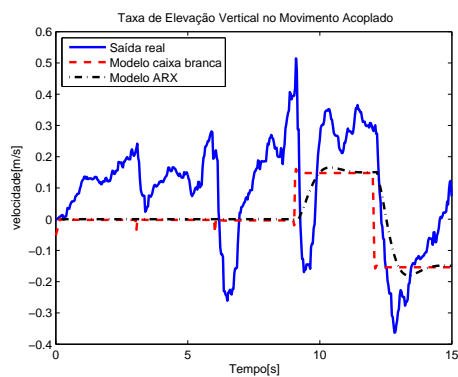
Figura 4: Comparação dos modelos do ArDrone Parrot real e simulado, através da resposta individual ao degrau às entradas de controle.



(a) Arfagem.



(b) Rolagem.



(c) Altitude.

Figura 5: Comparação entre a saída real do ArDrone e os modelos caixa branca e ARX, através da resposta à excitação coletiva.

posicionamento global baseado em rastreamento óptico (para manobras em ambientes fechados) ou GPS (para deslocamentos em ambientes ao ar livre) poderia melhorar o desempenho dos controladores, uma vez que a odometria tridimensional apresenta erros, já esperados, devido à integração numérica dos dados de aceleração linear e seus ruídos incorporados.

4 Considerações Finais

As respostas obtidas para o modelo caixa branca demonstram que, para os parâmetros utilizados, os modelos apresentam uma resposta que segue a tendência do movimento do ArDrone. Logo, tais

parâmetros podem ser efetivamente utilizados no projeto de controladores.

Para os modelos ARX, o fato de na análise de resíduos os gráficos estarem contidos, quase em sua totalidade, dentro do intervalo de confiança demonstra que o resíduo é praticamente branco. No entanto, não há informação útil nos resíduos, ou seja, os modelos obtidos explicaram a dinâmica desacoplada de cada movimento do quadrimotor ArDrone. Aliado aos *Fits* encontrados e ao fato de que as respostas dos modelos seguirem a tendência da resposta real, os modelos são válidos e podem ser considerados para simulação de um VANT com tais características, desconsiderando a necessidade do conhecimento de seus parâmetros físicos.

Analisando as respostas em relação à taxa de elevação vertical, os modelos tiveram dificuldades em representar a resposta real, principalmente quando se utiliza uma entrada de excitação coletiva, devido à influência dos movimentos de arfagem e rolagem na altitude e a erros associados a medida do sensor de ultra-som. Quanto à entrada de excitação individual, o modelo ARX segue a tendência e o módulo da resposta real, porém o modelo caixa branca parece estar deslocado. Isso se deve ao fato de haver um tempo morto de aproximadamente 0.3s na resposta real da variação da altitude.

Uma possível sequência deste trabalho, conforme mencionado anteriormente, seria usar um sensor de força e torque nos três eixos, e assim determinar as forças e torques exercidos na aeronave em função da excitação, obtendo assim um modelo correspondente aos dois primeiros blocos da Figura 3, ou seja, o Modelo de Baixo Nível da aeronave.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à CAPES, ambos do Brasil, e à SPU, da Argentina, pelo suporte financeiro concedido a este projeto. Prof. Brandão também agradece à Universidade Federal de Viçosa e à FAPEMIG, por viabilizarem sua participação neste trabalho.

Referências

- Ahmed, B., Pota, H. R. and Garratt, M. (2010). Flight control of a rotary wing uav using backstepping, *International Journal of Robust and Nonlinear Control* **20**(6): 639–658.
- Brandao, A. S., Pizzeta, I. H. B., Carelli, R. and Sarcinelli-Filho, M. (2012a). Modelagem e controle não linear subatuado de um quadrotor: Parte 1, *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Campina Grande, PB, pp. 449–454.

- Brandao, A. S., Pizzeta, I. H. B., Carelli, R. and Sarcinelli-Filho, M. (2012b). Modelagem e controle não linear subatuado de um quadrotor: Parte 2, *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Campina Grande, PB, pp. 3102–3109.
- Castillo-Garcia, P., Lozano, R. and Dzul, A. E. (2005). *Modeling and Control of Mini-Flying Machines*, Advances in Industrial Control, Springer.
- Kim, S. K. and Tilbury, D. M. (1998). Mathematical modeling and experimental identification of a model helicopter, *Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, pp. 203–213.
- Koo, T. J. and Sastry, S. (1999). Differential flatness based full authority helicopter control design, *Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, USA, pp. 1982–1987.
- Pizetta, I. H. B., Brandão, A. S., Sarcinelli-Filho, M. and Carelli, R. (2012). Uma plataforma hardware-in-the-loop para vants de asas rotativas, *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*, SBA, Campina Grande, PB, pp. 3565–3570.
- Tournier, G. P., Valenti, M., How, J. P. and Feron, E. (2006). Estimation and control of a quadrotor vehicle using monocular vision and moir patterns, *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, AIAA, pp. 2006–6711.