

# *Desenvolvimento de uma plataforma de teste de “Hardware-In-the-Loop” para aeronaves não tripuladas em missões cooperativas*

Thiago Oliveira de Araújo

PG/EAM - Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA  
São José dos Campos, Brasil  
thiago\_liveira@hotmail.com

Luis Carlos Sandoval Góes

PG/EAM - Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA  
São José dos Campos, Brasil  
goes@ita.br

**Resumo** — Nos dias atuais, o uso de aeronaves não tripuladas (Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT) tem sido cada vez mais intenso. A exigência de mercado no uso destas aeronaves tem tornado a pesquisa e desenvolvimento das mesmas mais extensas e, com isso o aumento da concorrência. Diversos segmentos de mercado demandam este tipo de veículo, pois se tornou uma ferramenta de trabalho para profissionais das áreas de topografia, agricultura, transporte, vigilância, dentre outras. Simulações “Hardware In the Loop” (HIL) são parte essencial na validação e testes de muitos sistemas em desenvolvimento, em especial veículos aéreos que ainda não devem se envolver em testes em voo ou quando estes testes ainda não podem ser realizados. A área de foco deste projeto de pesquisa é desenvolver uma plataforma de prototipagem rápida e testes HIL para pilotos automáticos a serem instalados em aeronaves não tripuladas de pequeno porte trabalhando em missão cooperativa, inserindo leis de controles desenvolvidas em um ambiente mais dinâmico e com ampla gama de dados de ambiente. O ambiente é constituído de dois computadores operando em rede ethernet e um hardware embarcado ATMEga2560 ligado a cada um deles. As leis de controle e estabilização das aeronaves multicóptero são implementadas neste hardware. A missão é do tipo líder-seguidor e o simulador de ambiente utilizado é o X-Plane. A plataforma é validada a partir de análises de dados de comunicação e comportamento da execução nas missões designadas. As análises revelam que a execução ocorre com pouco desvio do previsto e através da plataforma sugerida estas podem ser realizadas com sucesso.

**Palavras chave**— VANT, HIL, Testes, Missões Cooperativas

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente, em muitos casos, a forma mais eficiente de se desenvolver sistemas embarcados é conectando o sistema embarcado a uma planta real. Em outros casos, há a possibilidade de efetuar uma simulação de *Hardware In The Loop* (HIL), que tem se demonstrado eficiente [5]. Como métricas para esta eficiência pode-se citar alguns fatores como custo, duração, segurança e cumprimento dos objetivos de teste.

Neste sentido, há condições específicas que são buscadas pelos desenvolvedores e que justificam o uso de simulação (HIL), incluindo os seguintes:

- Melhorar a qualidade dos testes teóricos;
- Antecipação de descoberta de erros;
- Atender cronogramas de desenvolvimento com curto prazo de execução;
- Diminuir complexidade da planta para testes;
- Processo de desenvolvimento precoce em termos de fator humano, no caso de não haverem pessoas devidamente treinadas ainda para a operação do produto integrado;

Todos os fatores supracitados levam a necessidade de uma plataforma considerando algumas características que devem ser minimizadas durante o seu desenvolvimento, como:

- Complexidade de ação do sistema (complexidade das operações), podendo gerar a necessidade de testes com modificações em subsistemas de hardware ou reconfiguração do sistema constantemente.
- Custo, tanto pelo processo de desenvolvimento em si como pelo risco envolvido no processo de desenvolvimento de produto e na duração deste;
- Inserção de perturbações que não são fáceis de reproduzir no mundo real ou não são autorizadas de serem testadas em mundo real por ausência de regulamentação.

## II. HARDWARE IN THE LOOP

O uso extensivo de HIL tem sido aplicado a missões cooperativas em que, por exemplo, são planejados e executados testes para falhas que já são detectadas, isoladas e estudadas com maior profundidade e a antecipação de erros de projeto que diminuem os custos de desenvolvimento. Estes erros normalmente só iriam ser percebidos posteriormente, em uma outra fase de desenvolvimento, levando ao retrabalho e possível atraso no lançamento do produto no mercado [1] [8].

Existem basicamente três níveis de fidelidade comumente descritos na utilização em simulações HIL. Nos casos de alta fidelidade, vários sensores são utilizados para medir e gerar realimentação de dados para obter uma saída equivalente à desejada, como, por exemplo, no uso de GPS (*Global Positioning System*), onde o ambiente simulado recebe as coordenadas com uma cadência maior que o sistema real em que

rúídos atmosféricos existem e são modelados com abstrações no software ou hardware de simulação. Já em situações de média fidelidade, este mesmo sistema pode ainda ser mantido em simulação, enquanto que outros sistemas, como o de atuação das superfícies de uma aeronave ou cálculo de aceleração dos motores de um quadrotor podem ainda ser mantidos no hardware real e lidos por sensores reais. Bem como em um terceiro nível em que não é necessária tanta fidelidade cujos atuadores e motores bem como GPS e todo o ambiente de voo do sistema são abstraídos, com exceção do processador e alguns periféricos necessários para a comunicação em tempo real [1].

Um exemplo de montagem de HIL pode ser encontrado em [6] citado por [5]. A estrutura inclui os quatro módulos a seguir: módulo de hardware embarcado; módulo de controle de voo; módulo de estação terrestre e módulo de software de simulação. Os resultados obtidos no trabalho de [6] mostram que o sistema de simulação HIL construído diminui o custo em relação aos custos calculados pelos autores para outros tipos de plataforma, que acontecem em termos de desempenho total do sistema e em termos de requisitos verificados, além de eficiência de controle e segurança no voo. Em [2], o autor cita que para as fases de projeto de uma nova aeronave não tripulada seria interessante que algumas fases fossem desenvolvidas antes do primeiro voo, a saber:

- Projeto das leis de controle;
- Simulação numérica em ambiente MATLAB/Simulink;
- Software In The Loop;
- Hardware In The Loop;
- Teste em voo.

Então, seria possível não somente validar um sistema antes de um teste experimental em voo, como também projetar um hardware compatível com o software e evitar danos e desgastes nos equipamentos.

### III. ARQUITETURA DE SISTEMAS

Este trabalho propõe o uso do terceiro nível de integração e testes utilizando Hardware In The Loop como descrito na sessão II, desta forma será utilizado um hardware que contém o microcontrolador ATmega2560.

As aeronaves são de modelo do tipo quadróptero (quatro rotores) e aplicados na simulação utilizando X-Plane [9]. A distribuição geral de computadores em rede e hardware conectados é ilustrada na Fig. 1. Nesta plataforma dois computadores são utilizados e em cada um uma simulação Hardware In The Loop, o terceiro computador é necessário somente em caso de exibição da simulação da interação entre as duas aeronaves.

Nos projetos que utilizam missões cooperativas a dinâmica entre aeronaves é implementada seguindo comportamentos e reações a estes com ligações simples e em sua maioria locais desenvolvendo ideias, técnicas e ferramentas necessárias ao planejamento de missões cooperativas de modo a ter uma verificação da colaboração eficaz e atingimento dos objetivos da missão com menor perda [4]. Em [7] ainda, cita-se paradigmas de missão utilizando aprendizagem por reforço, por demonstração e transferindo aprendizado entre aeronaves como

meios de prover um tratamento para a execução da missão desejada em sistemas de robôs autônomos que tem que cooperar para o cumprimento da missão.

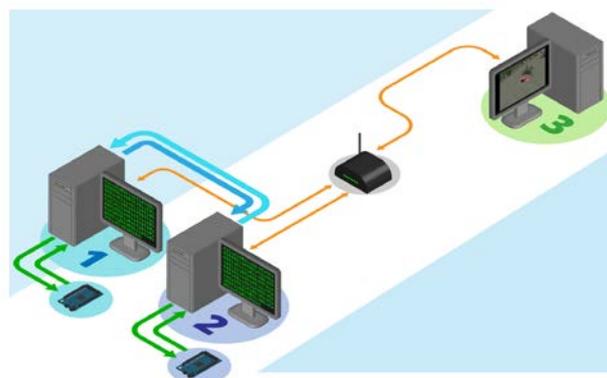


Fig. 1. Organização e distribuição de computadores e rede de comunicação entre eles – Montagem geral

Este trabalho limitar-se-á a algumas missões que podem exemplificar a utilização de Hardware In The Loop para aeronaves não tripuladas do tipo líder-seguidor e perseguição em círculo.

A missão líder-seguidor pode envolver duas ou mais aeronaves como pode ser visto na Figura 6 onde pelo menos uma delas recebe configuração de líder, recebendo o planejamento da missão com o caminho (ou alvo) a ser seguido para o cumprimento desta, que pode ter sido previamente planejado e gravado ou pode ser calculado conforme o deslocamento da aeronave acontece e manejado em tempo real [10], enquanto que a aeronave seguidora receberá a posição da líder conforme o desenrolar da missão.

A perseguição em círculo é uma categoria de missão onde as aeronaves vão procurar e circundar, em fila, o ponto de interesse como demonstrado na Fig. 2, que neste caso pode ser uma aeronave ou veículo de interesse ou simplesmente um ponto determinado pela base de operações [10].

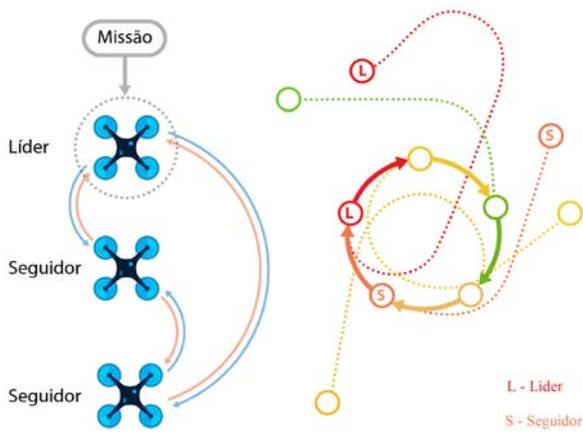


Fig. 2. Missões líder seguidor e orbitando em círculo.

Para este trabalho foi escolhido o simulador X-Plane para a implementação do ambiente de simulação por alguns motivos, a saber [3],

- PlaneMaker: A geometria da aeronave, dos elementos de configuração desta, os motores e hélices podem ser modelados com facilidade utilizando este software e a inserção de dados de motor e parâmetros desejados à aeronave são facilmente configurados. Este possui integração com o X-Plane.
- Certificação FAA: é possível simular condições realísticas de vento e turbulência com altíssima fidelidade, podendo ser eliminada a necessidade de voos reais para muitos testes que seriam necessários.
- Comunicação via UDP: toda a comunicação já tem uma interface e protocolo facilitado para a transmissão dos dados de voo entre aeronave e coleta de dados de ambiente dentre outros necessários ao desenvolvimento da plataforma.
- Desenvolvimento: Fácil integração com outros sistemas futuros (protocolo UDC), trazendo versatilidade e diminuindo custos por alta prontidão.

O modelo escolhido para a aeronave foi retirado de [5]. O sistema que implementa este controle da aeronave tem seu funcionamento em duas fases como demonstrado na Fig. 3, onde o índice  $i$  denota a  $i$ ésima aeronave sendo controlada, o sinal de referência é  $\bar{r}(i)$ , que no caso do líder são as coordenadas de alvo e no seguidor é a posição do líder e o sinal de atitude da aeronave é  $r(i)$ . O sistema calcula o torque dos motores,

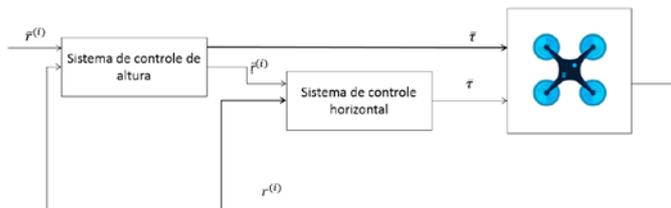


Fig. 3. Diagrama representativo do sistema de controle da aeronave.

#### IV. RESULTADOS

O percurso pode ser observado na Fig. 4. Enquanto a aeronave líder, que recebeu as coordenadas de missão previamente e consegue calcular a aceleração para um percurso linear, percorre o trajeto como visto na Fig. 5, a aeronave seguidora tem uma perda no rastreo deste caminho e tem um suave deslocamento na rota a ser seguida. O 'X' marca o início do percurso, a primeira fase de voo é atingir a altitude de missão, depois seguir até o ponto de alvo e depois executar o pouso.

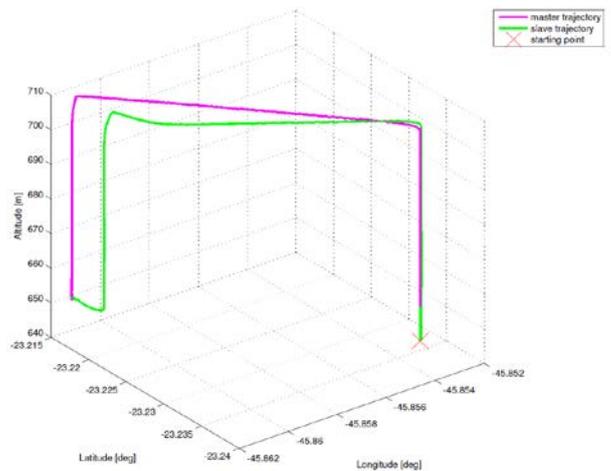


Fig. 4. Organização e distribuição de computadores e rede de comunicação entre eles – Montagem geral

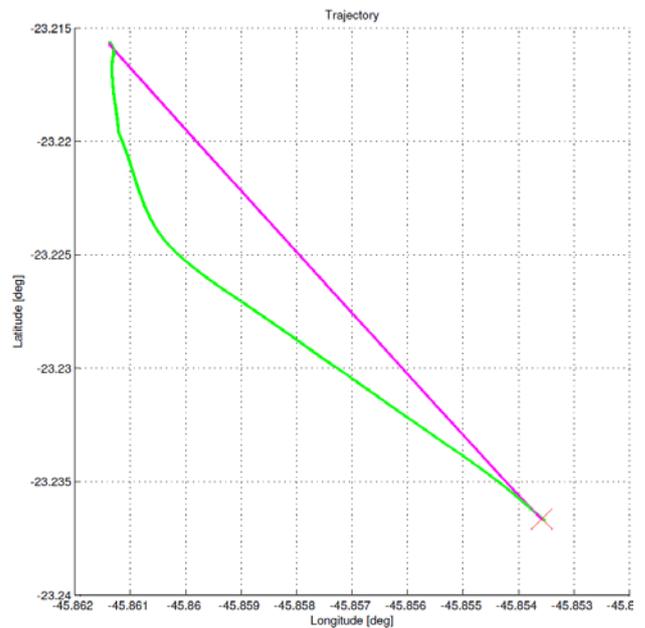


Fig. 5. Percurso tridimensional das aeronaves (Líder Seguidor)

O percurso da segunda missão pode ser observado na Fig. 6; Enquanto a aeronave líder, que recebeu a missão previamente consegue fazer um movimento circular bem contido e calcular a

aceleração para um percurso mais fechado durante o círculo, a aeronave seguidora tem uma perda no rastreamento deste caminho como visto na Fig. 7 devido a sua margem de segurança inserida para a missão e o círculo fica deslocado dos 5 metros previstos, tendo um suave deslocamento na rota à ser seguida.

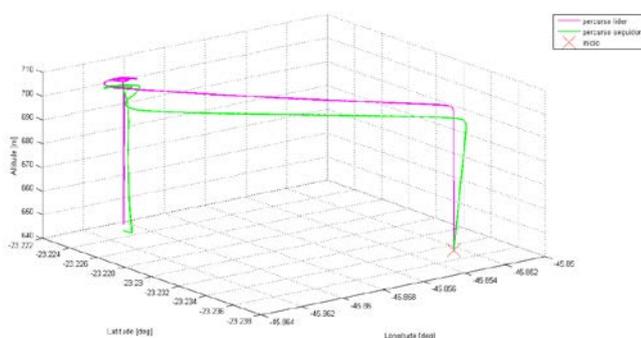


Fig. 6. Percurso tridimensional das aeronaves (Líder Seguidor)

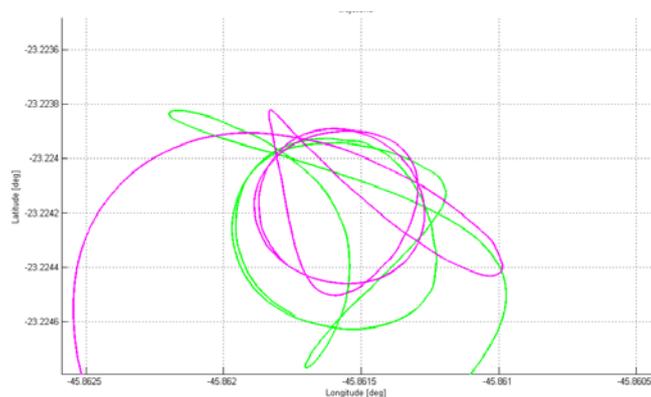


Fig. 7. Percurso tridimensional das aeronaves (Perseguição em círculo)

## REFERENCES

- [1] A HANGAL, Swaroop; TAK, Bharat; ARYA, Hemendra. Distributed Hardware-In-Loop Simulations for multiple Autonomous Aerial Vehicles. In: AIAA MODELING AND SIMULATION TECHNOLOGIES CONFERENCE, 2015, Kissimmee. Proceedings. Reston: Aiaa Scitech, 2015. Disponível em: <<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-0151>>. Acesso em: 25 ago. 2015.
- [2] CASTRO, Davi Ferreira de. Ambiente de Simulação SIL para sistemas de controle de formação em posição para múltiplos. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- [3] CASTRO, Davi Ferreira de. Ambiente de Simulação SIL para sistemas de controle de formação em posição para múltiplos. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2014 apud MUTTER, F. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOPS ON ENGINEERING OF COMPUTER-BASED SYSTEMS, 18., 2011, Las Vegas. Model-Driven In-the-Loop Validation: Simulation-Based Testing of UAV Software Using Virtual Environments. Las Vegas: Ieee, 2011. 292 p.
- [4] JONES, Phillip J. COOPERATIVE AREA SURVEILLANCE STRATEGIES USING MULTIPLE UNMANNED SYSTEMS.2009. 123 f. Tese (Doutorado) - Curso de Philosophy In The School Of Electrical And Computer Engineering, Georgia Institute Of Technology, Atlanta, 2009. Disponível em: <[https://smartech.gatech.edu/.../jones\\_phillip\\_j\\_200905\\_phd.pdf](https://smartech.gatech.edu/.../jones_phillip_j_200905_phd.pdf)>. Acesso em: 05 jul. 2016.
- [5] MENDES, Alessandro Correa. ANALYSIS AND COMPARISON OF REAL FLIGHTS UAVS WITH SIMULATED FLIGHT. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.
- [6] ODELGA, M et al. A Setup for multi-UAV hardware-in-the-loop simulations. In: WORKSHOP ON RESEARCH, EDUCATION AND DEVELOPMENT OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS, 2015, Cancun. A Setup for multi-UAV hardware-in-the-loop simulations. Cancun: Ieee, 2015. p. 204 - 210. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7441008&isnumber=7440980>>. Acesso em: 14 maio 2016. apud Guowei Cai et al, Design and implementation of a hardware-in-the-loop simulation system for small-scale UAV helicopters. In: IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL), 2008, pp.29-34.
- [7] SHAH, Shital et al. Aerial Informatics and Robotics Platform. Washington: Microsoft Research, 2017. Disponível em: <<https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2017/02/aerial-informatics-robotics-TR.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2017.
- [8] WASZNIOWSKI, Libor; HANZÁLEK, Zdenek; DOUBRAVA, Jirí. Aircraft Control System Validation via Hardware-in-the-Loop Simulation. Journal of Aircraft, [s.l.], v. 48, n. 4, p.1466-1468, jul. 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). DOI: 10.2514/1.c031229.
- [9] X-PLANE. User Manual for X-Plane Products. Disponível em: <[http://xplanet.com/wpengine.com/files/manuals/X-Plane\\_10\\_Desktop\\_manual.pdf](http://xplanet.com/wpengine.com/files/manuals/X-Plane_10_Desktop_manual.pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- [10] YANG, Huixin; YANG, Tao; ZHANG, Weihua. Review on cyclic pursuit in Spacecraft Formation Flying. Proceedings Of 5th International Conference On Recent Advances In Space Technologies - Rast2011, [s.l.], jun. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/rast.2011.5966902>. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=5966902&isnumber=5966798>>. Acesso em: 19 maio 2016. Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," IEEE Transl. J. Magn. Japan, vol. 2, pp. 740-741, August 1987 [Digests 9th Annual Conf. Magnetism Japan, p. 301, 1982].