

APLICAÇÃO DE UM LABORATÓRIO DE IMERSÃO EM VOO REMOTAMENTE OPERADO NO ENSINO DE ESTABILIDADE E CONTROLE DE AERONAVES

GUILHERME N. BARUFALDI*, MARCUS H. VICTOR JR.*, GUILHERME S. SILVA*, MAURÍCIO A. V. MORALES*, LUIZ C. S. GÓES*

**Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Praça Mal. Eduardo Gomes, 50
São José dos Campos, SP, Brasil*

Emails: guilherme.barufaldi@gmail.com, marcus@ita.br, soaresgss@ita.br, morales@ita.br, goes@ita.br

Abstract— This paper presents the application of a platform in at teaching control and dynamical systems theory to aeronautical engineering students, with emphasis on experiential education. The platform consists of a remote piloting station, for student and instructor, radio-controlled airplane (air model) and a first-person view camera (FPV). The goal is to provide students flight experience at a low cost, and help them to understand abstract concepts such as stability derivatives, modal coupling behavior and dynamic response. The ensemble was designed to be easily transported, assembled and prepared for operation.

Keywords— Experiential education, control laboratory, airplane stability and control, remotely piloted airplane, engineering education.

Resumo— Este trabalho apresenta a aplicação de uma plataforma voltada ao ensino de teoria de controle e sistemas dinâmicos para alunos de engenharia aeronáutica, com enfoque em educação experiencial. A plataforma consiste de um uma estação de pilotagem remota, para aluno e instrutor, aeronave rádio controlada e câmera de transmissão para voo em primeira pessoa (FPV). O objetivo é proporcionar, com baixo custo, a experiência de voo aos alunos e auxiliar a compreensão de conceitos abstratos, como derivadas de estabilidade, fenômenos de acoplamento modal e resposta dinâmica. O conjunto foi concebido de maneira a ser facilmente transportado, montado e aprontado para operação.

Palavras-chave— Educação experiencial, laboratório de controle, estabilidade e controle de aviões, avião remotamente pilotado, ensino de engenharia.

1 Introdução

Tradicionalmente, o ensino de disciplinas de teoria de controle e sistemas dinâmicos inicia-se entre o terceiro e o quarto anos de engenharia. Essas disciplinas são pautadas por extensivo uso de equações diferenciais e álgebra linear, e normalmente são consideradas demasiadamente abstratas pelos alunos. De fato, existem muitos conceitos difíceis de serem absorvidos e interpretados, como trajetórias no plano de fases, modos e parâmetros modais, entre outros. O ensino de estabilidade e controle de aeronaves baseia-se largamente nesses conceitos e, apesar de um avião ser um objeto bastante concreto para os alunos, conectar essas noções ao movimento da aeronave e suas características não é tarefa trivial.

No Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), onde a plataforma está sendo desenvolvida, a disciplina de estabilidade e controle de aeronaves é ministrada no quarto ano do curso de engenharia aeronáutica, e também é disponibilizada à pós-graduação, de maneira que os alunos inscritos já tenham passado pelas disciplinas básicas de controle. A experiência dos professores mostra que, mesmo já tendo estudado as noções fundamentais de sistemas dinâmicos, é comum que os alunos tenham dificuldade em interpretar os fenômenos básicos do voo em termos de parâmetros modais, gráficos de resposta no tempo e planos de

fase. Os problemas são ainda maiores quando é necessário projetar sistemas de controle. Embora os alunos tenham a capacidade de terminar os projetos, nota-se que é comum perderem a intuição física quando lidam com a planta em malha fechada. Essas dificuldades subsequentes criam um efeito “bola de neve” e, ao final do curso, muitos alunos tornam-se frustrados com a disciplina, sem conseguirem visualizar ou entender fisicamente o que ocorre com a aeronave.

Pelo menos nos últimos cinco anos, o grupo de profissionais envolvidos no preparo e condução da disciplina pode concluir que um dos principais problemas é o fato de os conceitos explicados nem sempre serem acompanhados por visualizações experimentais, que permitam tornar palpáveis essas noções. Essa conclusão foi feita observando-se a evolução de turmas que puderam realizar experimentos em aeronaves do Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo, da Força Aérea Brasileira, e com as equipes do ITA que participam da competição SAE *AeroDesign*®. É notável a diferença que experimentos com aeronaves reais faz no aprendizado. Outro fato que corrobora a conclusão do grupo de ensino é o sucesso da disciplina de projeto e construção de aeromodelos (PRJ-30), oferecida pelo Departamento de Projetos, criada para diminuir a distância entre teoria e prática.

Embora os experimentos realizados em voo se-

jam excelentes para o aprendizado, sua realização depende da disponibilidade de aeronaves, porém o alto custo inviabiliza a realização contínua. Assim, inspirado pelo sucesso obtido nas atividades práticas e experimentais, o grupo de ensino iniciou o projeto LIVRO (Laboratório de Imersão em Voo Remotamente Operado), para propiciar educação experiencial e reflexiva aos alunos (Torres and Morales, 2016).

A ideia do LIVRO é que os alunos possam instrumentar as aeronaves desenvolvidas na disciplina PRJ-30 e pilotá-las em voos experimentais de ensaio, de maneira que possam verificar a resposta dinâmica da aeronave e outros comportamentos. Para isso, o laboratório conta com câmeras *First Person View* (FPV), rádio controle e uma cabine de pilotagem. A vantagem desse modelo sobre um simulador de voo é trazer o aluno para situações reais, não só pela experiência prática, que envolve planejar, construir e implementar, mas também porque certos fenômenos são de difícil modelagem, e a simulação não é verdadeiramente representativa. Neste trabalho, serão mostrados os últimos desenvolvimentos do LIVRO, além da proposta de aplicá-lo especificamente no ensino de estabilidade e controle de aeronaves.

2 Educação experiencial e aprendizado reflexivo

Educação experiencial é uma filosofia pedagógica cuja essência é a defesa de que é fundamental para o estudante interagir com o ambiente ao seu redor, o educador e os outros estudantes, colocando em prática o conhecimento transmitido (Dewey, 1997). John Dewey, um dos mais influentes teóricos da educação do século XX, foi um entusiasta das escolas progressistas americanas, direcionadas ao ensino experiencial, e defendia a ideia de que a educação deveria ser baseada em experiências proporcionadas pelo professor, e não apenas em aulas teóricas.

Dentro do contexto da educação em engenharia, uma disciplina essencialmente prática, o laboratório é fundamental, de maneira que o ensino de engenharia sem o uso do mesmo é inconcebível (Krivickas and Krivickas, 2007). Além disso, é necessário que o aluno reflita consigo mesmo sobre o experimento e os resultados, assim como a conexão com a teoria. É necessário criar uma conscientização do que foi feito e aprendido, como propõem Campos e Moreno (Campos and Moreno, 2016).

Um exemplo de como o paradigma experiencial foi aplicado com sucesso é o curso de engenharia aeronáutica do Daniel Webster College, em Nashua, New Hampshire, Estados Unidos. Aulas de ensaios em voo são ministradas com um Cessna 172 SkyHawk, equipado com instrumentos de aquisição de dados. Os estudantes, junto com um instrutor de voo, realizam voos experimentais e

podem ter a experiência de um piloto de provas. Posteriormente, os estudantes analisam os dados adquiridos em voo (Sadraey et al., 2009). Este é um experimento completo em educação experiencial, que fornece um corpo de conhecimentos muito mais completo e motivante do que aquele fornecido apenas em sala de aula. Entretanto, os custos de hora de voo são consideravelmente altos.

3 Desafios comuns no ensino de estabilidade e controle de aeronaves

Alguns desafios no ensino da disciplina de estabilidade e controle de aeronaves são notórios. Apresentam-se aqui os mais frequentemente enfrentados pelos professores.

3.1 Compreensão da resposta dinâmica

Descrever o comportamento de um sistema a partir dos gráficos de resposta a *inputs* de controle no espaço de estados é certamente uma tarefa comum no ensino de sistemas dinâmicos e controle. Para a engenharia aeronáutica, a compreensão física da resposta é de suma importância, já que todo o movimento da aeronave deve ser compreendido por meio das variáveis de estado, se as únicas informações disponíveis forem resultados de simulações, o que é usual durante exercícios de projeto e análise (Torenbeek, 1982). Por meio de gráficos de resposta no tempo, do tipo encontrado na Fig. 1, os alunos devem ser capazes de interpretar os movimentos que ocorrem, assim como a qualidade da resposta da aeronave, isto é, se as oscilações são rápidas ou lentas, se as amplitudes são grandes ou pequenas, e se o amortecimento é satisfatório.

Para ajudar neste exercício de interpretação, pode se fazer uso de parâmetros modais, como amortecimento e frequência natural, mas esses conceitos também costumam ser considerados abstratos pelos alunos. O domínio da interpretação conceitual de gráficos deste tipo, bem como a avaliação crítica da qualidade da resposta é fundamental para se avaliar a qualidade de um projeto sob a óptica da mecânica do voo. Logo, qualquer ferramenta que auxilie os alunos a dominarem estes conceitos é de grande utilidade.

3.2 Interpretação das derivadas de estabilidade e controle

As equações dinâmicas de corpo rígido (Nelson, 1997) constituem a base para as simulações da planta em voo. Entretanto, deve-se empregar um modelo de forças e momentos que seja capaz de representar coerentemente a aerodinâmica da aeronave. As equações (1), (2) e (3) descrevem o cálculo da sustentação L , arrasto D e força lateral Y , respectivamente, em que ρ é a densidade do ar, V a velocidade aerodinâmica verdadeira e S a área de referência da asa. Os coeficientes C_L ,

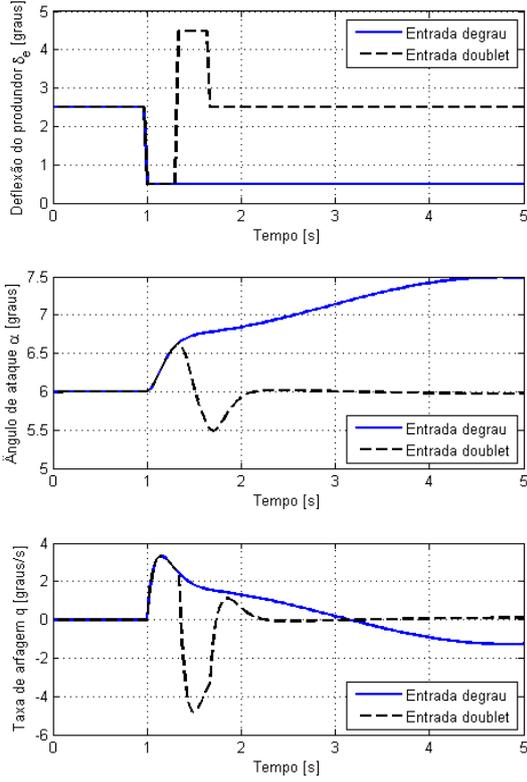


Figura 1: Resposta dinâmica típica de uma aeronave para entradas (*inputs*) tipo degrau e *doublet* no profundor. Variáveis de estado: ângulo de ataque (α) e taxa angular de arfagem (q).

C_D e C_Y são adimensionais, sendo denominados coeficientes de sustentação, arrasto e força lateral, respectivamente.

$$L = \frac{\rho V^2}{2} C_L S \quad (1)$$

$$D = \frac{\rho V^2}{2} C_D S \quad (2)$$

$$Y = \frac{\rho V^2}{2} C_Y S \quad (3)$$

Os coeficientes de força são, em geral, calculados por um modelo de primeira ordem, oriundo do desenvolvimento de um polinômio de Taylor em torno de um ponto de operação, com truncamento de ordens superiores. As equações (4), (5) e (6) representam esse modelo linear, em que os coeficientes C_i são denominados derivadas de estabilidade e controle; α é o ângulo de ataque da aeronave; β o ângulo de derrapagem; \bar{p} , \bar{q} e \bar{r} e são as velocidades angulares de rolamento, arfagem e guinada, adimensionalizadas; δ_p e δ_r e são

as deflexões de profundor e leme, respectivamente.

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_\alpha} \alpha + C_{L_q} \bar{q} + C_{L_{\delta_p}} \delta_p \quad (4)$$

$$C_D = C_{D_0} + k C_L^2 \quad (5)$$

$$C_Y = C_{Y_\beta} \beta + C_{Y_p} \bar{p} + C_{Y_r} \bar{r} + C_{L_{\delta_r}} \delta_r \quad (6)$$

As equações (7), (8) e (9) mostram o cálculo dos momentos aerodinâmicos, em que \underline{L} é o momento de rolamento; \underline{M} é o momento de arfagem e \underline{N} é o momento de guinada. Os coeficientes adimensionais C_l , C_m e C_n são denominados coeficientes de momento de rolamento, arfagem e guinada, respectivamente, em que b é a envergadura da asa e \bar{c} sua corda média aerodinâmica.

$$\underline{L} = \frac{\rho V^2}{2} C_l b S \quad (7)$$

$$\underline{M} = \frac{\rho V^2}{2} C_m \bar{c} S \quad (8)$$

$$\underline{N} = \frac{\rho V^2}{2} C_n b S \quad (9)$$

Os coeficientes de momento são calculados de maneira análoga aos de força, a partir das derivadas de estabilidade e controle para os momentos, conforme mostram as equações (10), (11) e (12), em que δ_a é a deflexão média dos ailerons.

$$C_l = C_{l_\beta} \beta + C_{l_p} \bar{p} + C_{l_r} \bar{r} + C_{l_{\delta_a}} \delta_a \quad (10)$$

$$C_m = C_{m_0} + C_{m_\alpha} \alpha + C_{m_q} \bar{q} + C_{m_{\delta_p}} \delta_p \quad (11)$$

$$C_n = C_{n_\beta} \beta + C_{n_p} \bar{p} + C_{n_r} \bar{r} + C_{n_{\delta_a}} \delta_a + C_{n_{\delta_r}} \delta_r \quad (12)$$

A equação vetorial (13) mostra a dinâmica para o movimento do corpo rígido, e é função não linear das variáveis de estado \mathbf{x} e dos *inputs* de controle \mathbf{u} , constituídos conforme indicado nas equações (14) e (15), em que p , q e r são as componentes da velocidade angular expressas no referencial do corpo; ϕ , θ e ψ são os ângulos de Euler de inclinação lateral, arfagem e proa, entre os sistemas do corpo e inercial; x , y e z são as coordenadas do centro de gravidade da aeronave com relação ao sistema inercial; δ_t é a abertura da manete de potência do motor.

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (13)$$

$$\mathbf{x} = [V \ \alpha \ \beta \ p \ q \ r \ \phi \ \theta \ \psi \ x \ y \ z]^T \quad (14)$$

$$\mathbf{u} = [\delta_t \ \delta_p \ \delta_a \ \delta_r]^T \quad (15)$$

Embora os modelos lineares para os coeficientes de forças e momentos aerodinâmicos sejam simples de um ponto de vista matemático, sua interpretação física não é trivial (Etkin and Reid, 1995). Por exemplo, o coeficiente C_{l_β} indica a participação do ângulo de derrapagem da aeronave no momento de rolamento em função. Este comportamento revela, entre outras coisas, a tendência de a aeronave entrar em curva na presença de uma rajada de vento lateral, e tem grande

impacto na estabilidade látero-direcional da aeronave. Com uma aeronave em voo munida de câmeras, a visualização da reação da aeronave a comandos de leme, que provocam derrapagem, facilita enormemente a compreensão do efeito representado pelo coeficiente, bem como por seu sinal e magnitude.

3.3 Fenômenos de difícil modelagem

Outro desafio no ensino de mecânica do voo é descrever e qualificar fenômenos de difícil modelagem, como por exemplo estol, estol de ponta de asa, parafuso, entre outros. A compreensão desses fenômenos é crítica para o voo, pois estes podem resultar em perda de controle da aeronave e até mesmo acidentes (Stowell, 2007). Como em geral ocorrem em regimes transientes altamente não lineares, é muito difícil construir modelos matemáticos que permitam simular de maneira representativa o que de fato ocorre com a aeronave. Mesmo a utilização de túneis de vento, com experimentos custosos, não permite uma descrição completa do comportamento da aeronave nesse tipo de situação, especialmente de um parafuso.

O estol é caracterizado pela perda abrupta da sustentação da aeronave, depois que esta atinge o máximo coeficiente de sustentação possível. A entrada e saída de estol é um exercício básico nos cursos de pilotagem, tamanha a preocupação com o fenômeno. Entretanto, por falta de modelos adequados, os alunos de engenharia aeronáutica não são devidamente expostos ao fenômeno durante o curso teórico. Com o uso de uma aeronave rádio controlada, o exercício de estol pode ser feito a baixo custo e, se equipada com câmeras, a visualização pode ser feita inclusive em “primeira pessoa”, isto é, pelo ponto de vista que um piloto teria se estivesse no cockpit do avião. Além disso, as imagens e filmagens auxiliam enormemente a análise pós voo, em que a atividade reflexiva é exercida e os conceitos discutidos e fixados.

A Fig. 2 exibe uma sequência de imagens gravadas por uma câmera externa em um ensaio de estol com uma pequena aeronave elétrica construída pelos alunos para a competição SAE *Aero-Design*® Brasil. O estol revelou-se mais abrupto do que se pensava, de maneira que no mergulho de recuperação o avião abaixava muito mais o nariz do que o esperado. Este tipo de comportamento não poderia ter sido previsto pelos métodos computacionais usados pela equipe durante o projeto.

A Fig. 3 exibe uma sequência de imagens gravadas por uma câmera interna, voltada para a cauda do avião, em um ensaio de estol com uma aeronave de motor à combustão interna construída pelos alunos para a competição SAE *Aero-Design*® Brasil, na classe avançada. Observou-se que, no estol, a aeronave apresentava tendência de rolar para a esquerda, como é possível notar na

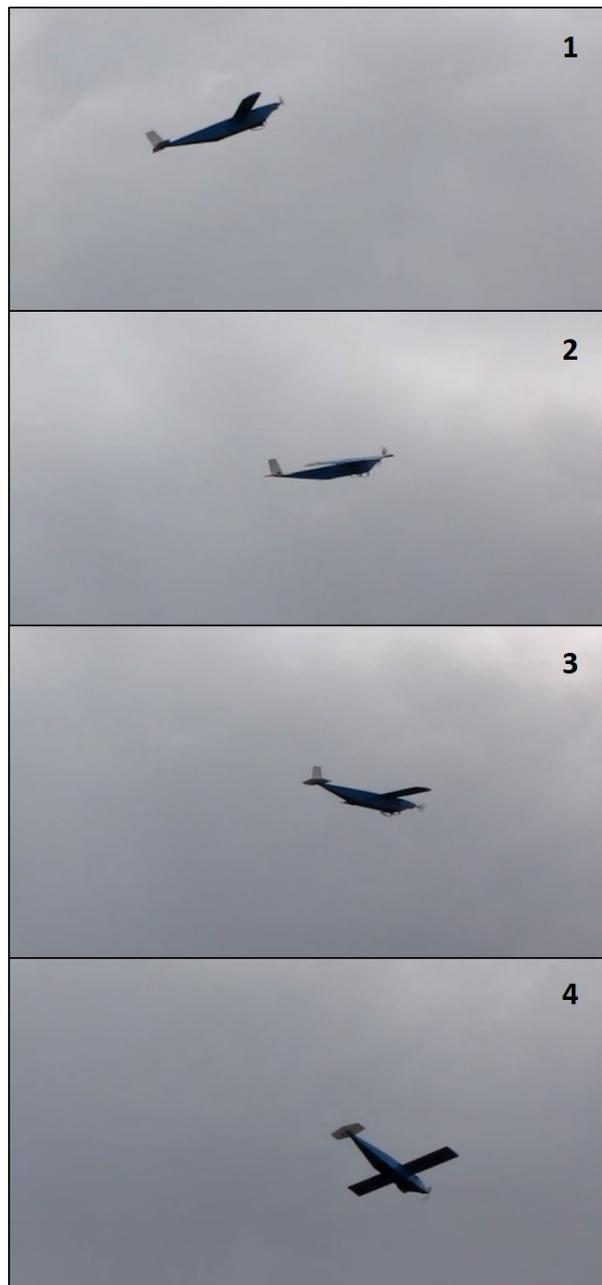


Figura 2: Sequência de imagens para um ensaio de estol de uma pequena aeronave, vista por câmera externa.

figura, pelo aumento da inclinação do horizonte. Novamente, este tipo de comportamento não poderia ter sido previsto pelos métodos computacionais utilizados.

Para fins didáticos, no entanto, ambos os exercícios foram bastante proveitosos para explicar o fenômeno. O entusiasmo dos alunos envolvidos também foi notável.

Outros tipos de fenômenos e manobras podem ser muito mais facilmente explicados por meio de ensaios em voo instrumentados, como por exemplo o parafuso, ou a mudança no comportamento do avião quando em efeito solo.

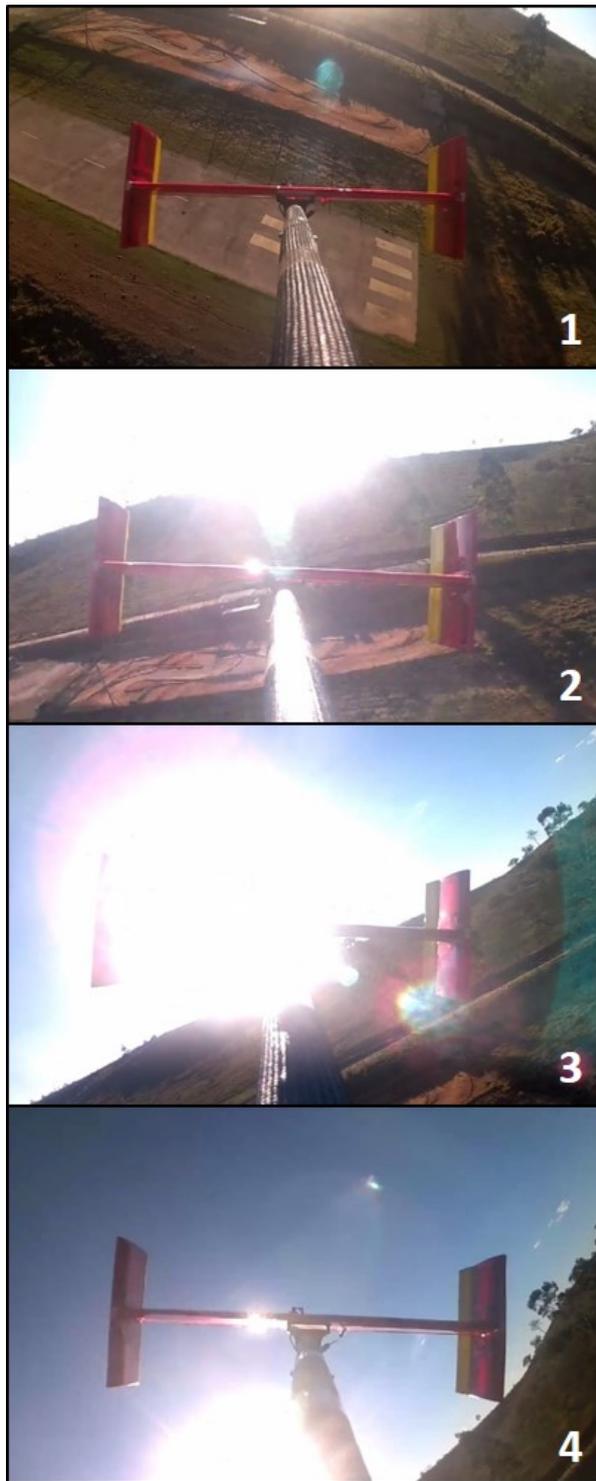


Figura 3: Sequência de imagens para um ensaio de estol de uma aeronave, vista por câmera interna apontada para a cauda.

4 O laboratório de imersão

As lições obtidas com a disciplina de projeto e construção de aeromodelos (PRJ-30) e também com as equipes da competição SAE *AeroDesign*® Brasil levaram à proposta do laboratório de imersão (LIVRO) por Torres e Morales (Torres and

Morales, 2016), com o objetivo de permitir aos alunos voar aeronaves rádio controladas por meio de uma cabine de pilotagem, equipada com comandos semelhantes aos de uma aeronave real, utilizando visão “em primeira pessoa” (FPV). A proposta é que, além de algumas aeronaves já previamente preparadas, os alunos possam adaptar *kits* de controle, câmera de transmissão e instrumentação para aquisição de dados nas aeronaves que eles mesmos desenvolveram na disciplina PRJ-30. O ensaio em voo dessas aeronaves traz motivação a ambos os cursos e permite que os alunos investiguem mais a fundo o que projetaram e construíram, levando-os a refletir sobre os conceitos ensinados e como esses se conectam aos veículos desenvolvidos.

A utilização de simuladores virtuais, como o *FlightGear*®, também foi considerada para uso nas disciplinas. Entretanto, apesar de propiciar um ensino mais dinâmico e agradável aos alunos, o simulador não permitiria representar as aeronaves de maneira fidedigna, pois os modelos de derivadas de estabilidade e controle obtidos durante a fase de projeto e análise são bastante rudimentares. Além disso, fenômenos com modelagem complexa não seriam simulados de maneira representativa. A ideia de utilizar uma aeronave real traz motivação aos alunos, e também a experiência de pilotagem, ao ar livre.



Figura 4: Primeiro protótipo da cabine de pilotagem, junto com uma aeronave preparada para voo. Foto retirada de (Torres and Morales, 2016).

A Fig. 4 mostra o primeiro protótipo da cabine de pilotagem. Trata-se de uma estrutura metálica, sobre a qual encaixam-se dois assentos lado-a-lado, unidade de processamento, rádio transmissor, monitor e comandos. Os mecanismos foram extraídos de uma aeronave C-95 Bandeirante desativada e gentilmente cedidos pela Força Aérea Brasileira. O conjunto pode ser observado em vista lateral na Fig. 5. Um dos requisitos do projeto é que a montagem do sistema seja simples, e também que o conjunto inteiro seja leve e compacto para ser transportado em um carro de pas-

seio.



Figura 5: Primeiro protótipo da cabine de pilotagem em vista lateral, com uma aeronave preparada para voo. Foto retirada de (Torres and Morales, 2016).

As aeronaves devem ser equipadas com câmeras e outros dispositivos de visualização, para que o voo possa ser registrado e posteriormente analisado. A Fig. 6 exhibe uma aeronave equipada para voo, com instrumentos de aquisição de dados, câmera e fios de lã sobre o extradorso da asa para visualização do escoamento de ar. Os fios de lã são especialmente úteis para se visualizar o comportamento no regime de estol. A Fig. 7 exhibe o nariz da aeronave, onde estão situados os instrumentos de aquisição de dados, como GPS e unidade inercial, e também o controlador do motor elétrico.

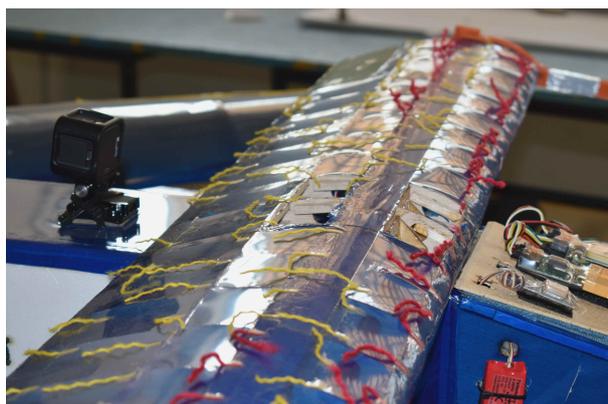


Figura 6: Detalhe de uma aeronave equipada com instrumentos de aquisição de dados, câmera e fios de lã sobre o extradorso da asa, para visualização do escoamento de ar.

A cabine de pilotagem, utilizada em conjunto com os instrumentos, permitirá que os voos sejam feitos com o espírito de um experimento científico, acrescentando motivação e emoção à atividade di-

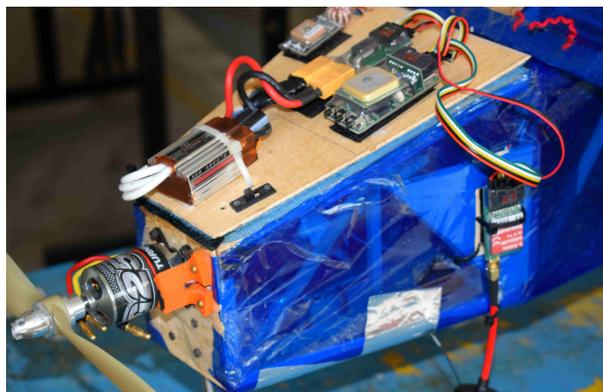


Figura 7: Detalhe do nariz da aeronave, onde foram instalados os instrumentos de aquisição de dados (GPS, unidade inercial) e o controlador do motor elétrico.

dática. Será possível também, nas análises pós voo, elucidar os significados físicos da resposta dinâmica, parâmetros modais, entre outros. Pois, além dos vídeos de voo, dados de sensores serão registrados, dispendo-se assim das devidas ferramentas de visualização para reforçar o ensino de dinâmica do voo e controle.

5 Desenvolvimento

A fim de explicar o funcionamento do LIVRO, considera-se a situação mais simples em que um aeromodelo está sendo controlado por um rádio-controle (RC). O RC em questão permite o acoplamento de um outro RC, sendo o primeiro referido como *Piloto* e o último como *Aluno*. O RC *Piloto* possui uma chave que habilita ou não o controle do *Aluno*, de modo que o aeromodelo pode ser controlado pelos dois RCs.

Em vez de haver um segundo RC (o *Aluno*) tem-se uma cabine simulando ser (emulando) um RC para o RC *Piloto*. Dessa cabine, originam-se sinais compatíveis com a entrada do RC *Piloto*, contudo seus sinais provêm de comandos físicos.

Por sua vez, a cabine possui comandos fisicamente duplicados, em que duas pessoas (instrutor e instruído) podem comandar o aeromodelo, conforme a necessidade da instrução. A duplicação dos sensores visa prover ao instruído a sensação do comando realizado pelo instrutor, de forma que ele perceba as minúcias dos movimentos exercidos durante uma pilotagem real.

Além da filosofia de controle exposta, há um sistema de visão em primeira pessoa (FPV) embarcado na aeronave, provendo o visual necessário aos presentes na cabine, por meio de um televisor ou tablet.

5.1 Aquisição dos sinais de controle

Projetou-se um sistema de aquisição que lê os sinais analógicos diretamente dos comandos físicos (potenciômetros posicionados nos comandos) e entrega sinais codificados ao RC *Piloto*. Os sinais analógicos a serem lidos são em número de quatro, correspondendo aos quatro controles: profundor, ailerons, leme e motor. Uma vez lidos, são convertidos em formato digital e entregues ao RC *Piloto* em uma modulação por posição de pulso (PPM - Pulse Position Modulation). O RC utilizado foi o Futaba modelo T7CAP e o sistema de aquisição utilizado foi o Arduino Duemilanove.

O software desenvolvido para o Arduino realiza a tarefa de leitura de suas portas analógicas e a posterior transformação em sinal PPM. Para uma correta interpretação do sinal PPM pelo RC *Piloto*, oito canais por mensagem devem ser enviados. Assim, embora haja quatro comandos sendo lidos fisicamente, enviam-se oito sinais para manter a coerência do protocolo de comunicação utilizado pelo RC.

5.2 Cabine de instrução

A cabine de instrução foi concebida para comportar os assentos do instrutor e instruído, bem como dos pedais, manches e manetes. As dimensões seguiram o paradigma de possibilitar o transporte no porta malas de um carro de passeio, deixando todo o LIVRO portátil. A duplicação dos comandos foi possibilitada pelo acoplamento mecânico entre os pares de controles, por meio de roldanas e cabos de aço, bem como o uso de alavancas.

A Fig. 8 permite abstrair o funcionamento do laboratório e identificar seus principais componentes.

6 Conclusões

O ensino de controle e sistemas dinâmicos pode ser tornado mais didático e menos abstrato com o emprego da educação experiencial. Trazer aos estudantes novas formas de visualizar o que de fato ocorre ao sistema analisado é imprescindível para a educação de engenharia contemporânea mas, mais do que isso, é fundamental levar o estudante ao mundo real, para que ele possa refletir sobre a teoria que aprende em sala de aula, e também para que possa se motivar. Esta é a proposta do LIVRO.

Apesar de o laboratório ainda estar em fase experimental, as lições aprendidas com os ensaios em voo de aeromodelo demonstram a viabilidade e o potencial do conceito. A cabine de pilotagem e os comandos serão aprimorados para ficarem mais leves e mais fáceis de transportar. Os aviônicos de solo também serão aprimorados, para que a cabine fique ainda mais parecida com um cockpit real de uma aeronave.



Figura 8: Diagrama do laboratório. A foto da cabine foi retirada de (Torres and Morales, 2016).

Cogita-se ainda utilizar o laboratório no ensino de outras disciplinas, como desempenho, aerodinâmica e projeto. Em uma área tão interdisciplinar quanto a engenharia aeronáutica, a integração de disciplinas e sistemas deve ser pensada desde o início, e a possibilidade de se usar uma ferramenta didática que mostre o pleno funcionamento do produto é bastante empolgante, para alunos e professores.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenadoria de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (CAPES) pelo financiamento das bolsas de estudo dos alunos envolvidos, e à Turma de 1961 do Instituto Tecnológico de Aeronáutica pela generosa doação que possibilitou a compra de equipamentos. Agradecimentos especiais a João Paulo Amorim Torres e a todo o apoio do ITA.

Referências

- Campos, P. R. B. and Moreno, U. F. (2016). Proposta de uma nova taxonomia do domínio psicomotor para laboratório de engenharia num enfoque reflexivo, *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática*, Vitória, Espírito Santo, pp. 1971–1976.
- Dewey, J. (1997). *Experience and Education*, 1st edn, New York.
- Etkin, B. and Reid, L. (1995). *Dynamics of Flight: Stability and Control*, 3rd edn, Hoboken.

- Krivickas, R. and Krivikas, J. (2007). Laboratory instruction in engineering education, *Global Journal of Engineering Education* **11**(2): 191–196.
- Nelson, R. C. (1997). *Flight Stability and Automatic Control*, 2nd edn, New York.
- Sadraey, M., Joyce, D., O'Donnell, J. and Bertozzi, N. (2009). Flight test education at undergraduate level in realization of cdio initiatives, *5th International CDIO Conference*, Singapore.
- Stowell, R. (2007). *The Light Airplane Pilot's Guide to Stall/Spin Awareness*, 1st edn, Ventura.
- Torenbeek, E. (1982). *Synthesis of Subsonic Airplane Design*, Dordrecht.
- Torres, J. P. A. and Morales, M. A. V. (2016). Remotely operated flight immersion laboratory: A low cost alternative for the aeronautical engineering undergraduate courses, *Anais do IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, IEEE, Abu Dhabi, United Arab Emirates.