

DESENVOLVIMENTO DE UM CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE AERONAVES RÁDIO-CONTROLADAS

RAIMUNDO NONATO CORREIA NETO^{1*}; JOSELITO LIMA REIS JÚNIOR²;
LEONARDO MONTEIRO AMARAL³; FRANCISCO SÁVIO DO LIVRAMENTO VALE⁴

¹Graduando em Engenharia Mecânica, IFPI, Teresina-PI, r.correia17@hotmail.com;

²Graduando em Engenharia Mecânica, IFPI, Teresina-PI, joselitolima15@hotmail.com;

³Graduando em Engenharia Mecânica, IFPI, Teresina-PI, leomonteiro05@gmail.com;

⁴Graduando em Engenharia Mecânica, IFPI, Teresina-PI, saviolivramento@gmail.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: Este trabalho objetivou criar um *software* que analisa da estabilidade de aeronaves radio-controladas. O código computacional foi realizado com linguagem Fortran, utilizando o editor de textos *gedit*, além do compilador *gfortran*, ambos softwares *open source* (uso livre) no sistema operacional *Windows 10*. Apresenta a reunião das principais bibliografias voltadas ao estudo da estabilidade e controle. Realizou-se a padronização da simbologia nessas bibliografias o que garante a uniformidade das variáveis utilizadas. Os resultados são a produção de gráficos e tabelas que avaliam a estabilidade estática da aeronave, uma lista de *outputs* exigidos em avaliações aerodinâmicas e estruturais e a localização, nas três dimensões, do centro de gravidade. Concluímos que o *software* agiliza exponencialmente a produção e desenvolvimento da aeronave, realizando as devidas análises com eficácia e confiabilidade. Produzindo o que antes era feito de maneira árdua e demorada por membros da equipe.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade e controle, Estabilidade estática, Fortran, Aerodesign

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL CODE FOR THE STATIC STABILITY ANALYSIS OF RADIO CONTROLLED AIRCRAFT

ABSTRACT: This work aimed to create a software that analyzes the radio-controlled aircraft's stability. The computational code was made with Fortran language, using the text editor *gedit* as well *gfortran* compiler, both softwares are *open source* in operational system *Windows 10*. It shows the reunion of the mains bibliographies used to control and stability research. It was made the symbology's patronization in these bibliographies, it ensures the uniformity of the used variable. The results are the production of graphics and tables that calculate the airplane's static stability, a list with outputs for aerodynamic and structural ratings and show the gravity center's localization in three dimensions. We conclude that the software speeds up exponentially the production and development of the aircraft and realizing the appropriates analysis with effectiveness and reliability. The software produces it was made delayed by team members.

KEYWORDS: Stability and control, Static stability, Fortran, Aerodesign.

INTRODUÇÃO

No início do século XX, a comunidade aeronáutica já havia resolvido muitos problemas técnicos necessários para alcançar o voo motorizado de um sistema mais pesado que o ar. Um problema que estava além do alcance desses primeiros investigadores, é a falta de compreensão da relação entre estabilidade e controle, bem como a influência do piloto na dinâmica de voo. A maioria das ideias sobre estabilidade e controle vieram de experimentos com planadores não controlados. Através de tais experiências, foi rapidamente descoberto que, para um voo bem-sucedido o planador tinha que ser inerentemente estável (Nelson, 1998). Desde então a avaliação dos critérios de estabilidade e controle de uma aeronave tornaram-se tarefas essenciais para o sucesso de um projeto aeronáutico, haja vista a

necessidade de garantir a segurança nas aeronaves que são fundamentais na atualidade, para o transporte de passageiros e de cargas, tornando a locomoção ágil e eficaz.

O estudo de estabilidade não está restrito à grandes indústrias aeronáuticas ou profissionais da área. Estudantes de graduação desenvolvem aeronaves e vivenciam todo o processo de desenvolvimento de aeroplanos. A competição SAE Brasil AeroDesign proporciona o espaço adequado para que estudantes desenvolvam conhecimentos na área da Engenharia Aeronáutica, através de aplicações práticas e da competição entre equipes, realizando um projeto aeronáutico no qual aeronaves menores simulam aeronaves reais e que passa por fases como concepção, projeto detalhado, construção e testes.

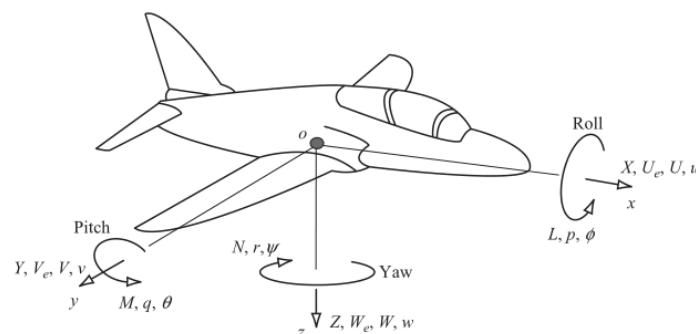
Sendo assim, este trabalho foi desenvolvido com o intuito de agilizar os cálculos relacionados à estabilidade estática, reunindo bibliografias usadas no embasamento teórico para desenvolver o software (EST_AND_CON.exe) escrito na linguagem de programação Fortran, como forma de obter os coeficientes de estabilidade estática e verificar os critérios de equilíbrio para uma aeronave rádio controlada, projetada pela equipe Sol do Equador-IFPI para a competição SAE BRASIL AeroDesign 2018 e futuras edições.

MATERIAL E MÉTODOS

A estabilidade estática de uma aeronave é comumente descrita como, a tendência de convergir à condição de equilíbrio inicial após uma pequena perturbação (Cook, 2007), a aeronave deve ter a característica de retornar à sua posição de equilíbrio após uma alteração em qualquer de seus ângulos de liberdade, logo a força resultante, bem como o momento resultante sobre o centro de gravidade da aeronave devem ser iguais a 0 (zero). Um avião que satisfaz esta exigência é dito estar em um estado de equilíbrio ou voando em uma condição de “Trim” (Nelson, 1998).

Conforme Da Silva et al. (2015), a estabilidade é uma das partes mais complexas no projeto de uma aeronave, sendo necessário a resolução de sistemas de equações diferenciais para a solução do problema. Pode-se classificar a estabilidade em: estática e dinâmica, sendo a estática o objeto de estudo do presente artigo. Por questões didáticas estabilidade estática ainda pode ser dividida em lateral, longitudinal e direcional, referentes aos eixos “x”, “y” e “z” definidos no sistema de coordenadas da aeronave, como mostrado na Figura 1.

Figura 1. Sistema de eixos de uma aeronave, e principais variáveis de posição, velocidade, força e momento (Cook, 2007).



Estabilidade estática analisa as forças e momentos restauradores produzidos pela aeronave, logo após uma perturbação, sem levar em conta o tempo e a forma que esse retorno ocorre. Uma forma de simplificação na análise estática, é separar individualmente cada componente da aeronave, quantificando as contribuições, e assim pode-se ter uma noção de quais partes contribuem negativamente ou positivamente para a estabilidade da aeronave, e por fim calcular os coeficientes de equilíbrio da aeronave por completo.

O desenvolvimento do código computacional foi realizado com linguagem Fortran, para isso foi utilizado o editor de textos *gedit*, além do compilador *gfortran*, ambos *softwares open source* (uso livre) no sistema operacional *Windows 10*.

A primeira etapa consistiu em reunir as principais bibliografias voltadas ao estudo da estabilidade de aeronaves: (Nelson, 1998), (Pamadi, 2004), (Perkins, 1949), (Raymer, 1992). A segunda etapa realizada consistiu na padronização dos símbolos, para garantir uma uniformidade das variáveis utilizadas. As fórmulas utilizadas estão divididas em lateral, longitudinal e direcional, mostradas nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1. Fórmulas com simbologia padronizada para análise da estabilidade estática lateral

| Bibliografia | Contribuição | Fórmula |
|--|----------------------------|--|
| Perkins | Asa | $C_{l\psi w} = \frac{C_{l\psi}}{\Gamma_w} \cdot \Gamma_w + \Delta C_{l\psi ts, w}$ |
| | Asa-fuselagem | $C_{l\psi wf} = +0,0006$ para asa alta |
| | | $C_{l\psi wf} = 0$ para asa média |
| | | $C_{l\psi wf} = -0,0008$ para asa baixa |
| | Estabilizador vertical | $C_{l\psi vt} = C_{L\alpha vt} \cdot \frac{S_{vt}}{S_w} \cdot \frac{z_{vt}}{b_w} \cdot \eta_{vt}$ |
| | Asa-estabilizador vertical | $C_{l\psi w, vt} = -0,00016$ para asa acima do EV |
| $C_{l\psi w, vt} = 0$ para asa reta com EV | | |
| $C_{l\psi w, vt} = +0,00016$ para asa abaixo do EV | | |
| Raymer | Diedro asa | $C_{l\beta \Gamma} = -\frac{C_{L\alpha w} \cdot \Gamma_w}{4} \cdot \frac{2 \cdot (1 + 2\lambda_w)}{3 \cdot (1 + \lambda_w)}$ |
| | Asa-fuselagem | $C_{l\beta wf} = -1,2 \cdot \frac{\sqrt{AR_w} \cdot z_w \cdot (h_{med, f} + w_{med, f})}{b_w^2}$ |
| | Enflechamento asa | $C_{l\beta w} = \frac{C_{l\beta w}}{C_L} \cdot C_{Lw}$ |

Tabela 2. Fórmulas com simbologia padronizada para análise da estabilidade estática longitudinal

| Bibliografia | Contribuição | Fórmula |
|--------------|--------------------------|--|
| Nelson | Asa | $C_{m0w} = C_{macw} + C_{L0w} \cdot \frac{x_{CG} - x_{AC}}{\bar{c}}$ |
| | | $C_{maw} = C_{L\alpha w} \cdot \frac{x_{CG} - x_{AC}}{\bar{c}_w}$ |
| | Estabilizador horizontal | $C_{m0ht} = C_{macht} \eta_{ht} \frac{S_{ht}}{S_w} - [C_{L0ht} + C_{L\alpha ht} \cdot (i_{ht} - i_w - \epsilon_0)] \eta_{ht} V_{ht}$ |
| Nelson | Fuselagem | $C_{mah} = -\eta_{ht} V_{ht} C_{L\alpha ht} \cdot \left(1 - \frac{d\epsilon}{d\alpha}\right)$ |
| | | $C_{m0f} = \frac{k_2 - k_1}{36,5 S_w \bar{c}} \sum_{x=0}^{x=l_f} w_f^2 \cdot (\alpha_0 w + i_f) \Delta x$ |
| | | $C_{maf} = \frac{1}{36,5 S_w \bar{c}} \sum_{x=0}^{x=l_f} w_f^2 \cdot \frac{\partial \epsilon_0}{\partial \alpha} \Delta x$ |

Tabela 3. Fórmulas com simbologia padronizada para análise da estabilidade estática direcional

| Análise estática direcional | | |
|-----------------------------------|---|---|
| Bibliografia | Contribuição | Fórmula |
| Nelson | Asa-fuselagem | $C_{n\beta wf} = -k_n k_{RI} \cdot \frac{S_{fs} l_{fs}}{S_w b_w}$ |
| | Estabilizador vertical | $C_{n\beta vt} = V_{vt} C_{L\alpha vt} \eta_{vt} \left(1 + \frac{d\sigma}{d\beta}\right)$ |
| Perkins | Asa | $C_{n\psi w} = -0,00006 \cdot \sqrt{\Lambda_c/2}$ |
| | Fuselagem | $C_{n\psi f} = \frac{0,96 \cdot K_\beta}{57,3} \cdot \frac{S_{fs}}{S_w} \cdot \frac{l_{fs}}{b_w} \cdot \left(\frac{h_{1/4, f}}{h_{3/4, f}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{w_{3/4, f}}{w_{1/4, f}}\right)^{1/3}$ |
| | Asa-fuselagem | $C_{n\psi wf} = -0,0002$ para asa alta |
| | | $C_{n\psi wf} = -0,0001$ para asa média |
| $C_{n\psi wf} = 0$ para asa baixa | | |
| Propulsão | $C_{n\psi p} = 1,5 \cdot \frac{\pi D_p^2 x_p N_p \frac{dC_{yp}}{d\psi}}{4 \cdot S_w b_w}$ | |

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram utilizados como exemplo demonstrativo dados reais da aeronave 2017 da equipe Sol do Equador, os dados são inseridos e compilados pelo programa. Após a execução do aplicativo "EST_AND_CON.exe", são gerados 7 arquivos de saída como mostrado na Figura 2.

Os arquivos "EST. DIR.", "EST. LAT.", "EST. LON.", apresentam os resultados individuais de cada fórmulas apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, também é gerado um arquivo para cada bibliografia aplicada no projeto. O arquivo "EST. EST. – GERAL" apresenta uma visão geral, mostrando os dados de entrada da aeronave e os respectivos coeficientes estáticos calculados, além disso, verifica se o avião atinge os critérios de estabilidade, o arquivo pode ser visto na Figura 3.

Figura 2. Arquivos gerados pelo programa.

| Nome | Tipo | Tamanho |
|-----------------------|--------------------|---------|
| 1 EST. DIR. - NELSON | Documento de Te... | 3 KB |
| 1 EST. DIR. - PERKINS | Documento de Te... | 3 KB |
| 1 EST. EST. - GERAL | Documento de Te... | 3 KB |
| 1 EST. LAT. - PERKINS | Documento de Te... | 2 KB |
| 1 EST. LAT. - RAYMER | Documento de Te... | 2 KB |
| 1 EST. LON. - NELSON | Documento de Te... | 3 KB |
| EST_AND_CON | Aplicativo | 91 KB |
| EST_AND_CON.F90 | Arquivo F90 | 31 KB |
| EXP EST | Arquivo PDF | 31 KB |

Figura 3. Arquivo geral (EST. EST. – GERAL) mostrando o valor quantitativo dos coeficientes e verificando as condições de estabilidade.

| ESTABILIDADE LATERAL: | | | |
|----------------------------|---------|-------|----------|
| PERKINS | | | |
| C 1 ψ | 0.0012 | | ESTÁVEL! |
| RAYMER | | | |
| C 1 β | -0.0052 | | ESTÁVEL! |
| ESTABILIDADE LONGITUDINAL: | | | |
| NELSON | | | |
| C m α | -0.0130 | | ESTÁVEL! |
| C m θ | 0.0419 | | ESTÁVEL! |
| ESTABILIDADE DIRECIONAL: | | | |
| NELSON | | | |
| C n β | 0.0008 | | ESTÁVEL! |
| PERKINS | | | |
| C n ψ | -0.0007 | | ESTÁVEL! |

Ainda é gerado o arquivo "EXP EST.pdf" onde se encontra os gráficos gerados pelo programa dos coeficientes de momento em relação ao ângulo de estudo. Como pode-se ver alguns exemplos nas Figuras 4, 5, 6 e 7.

Figura 4. Gráfico gerado pelo programa da análise de estabilidade estática lateral segundo (Perkins, 1949).

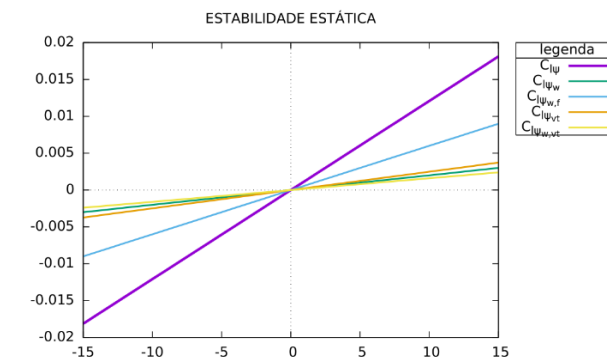


Figura 5. Gráfico gerado pelo programa da análise de estabilidade estática direcional segundo (Perkins, 1949).

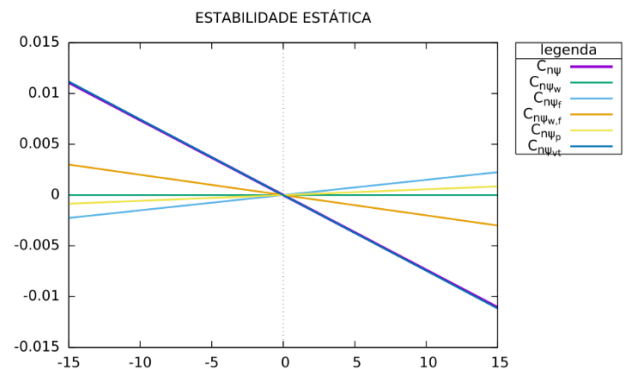


Figura 6. Gráfico gerado pelo programa da análise de estabilidade estática longitudinal segundo (Nelson, 1998).

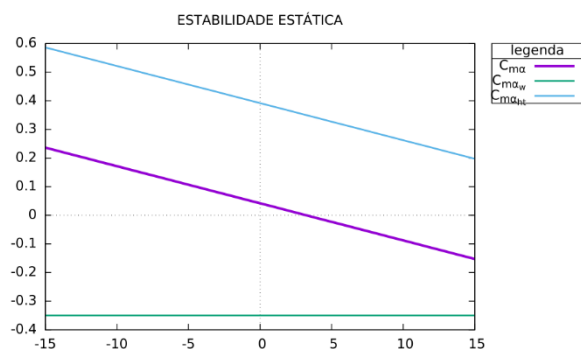
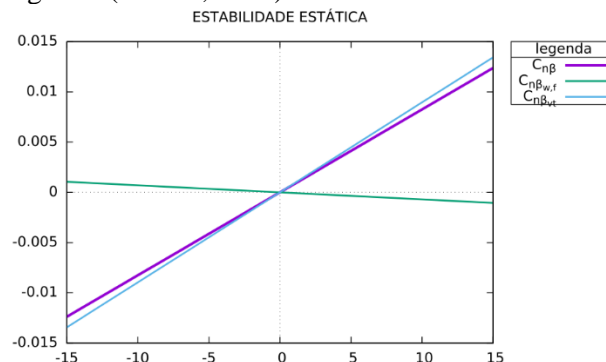


Figura 7. Gráfico gerado pelo programa da análise de estabilidade estática direcional segundo (Nelson, 1998).



CONCLUSÃO

A análise quanto à estabilidade da aeronave é uma etapa crucial no dimensionamento da mesma. Por conseguinte, devido ao fato dessa análise envolver uma série de critérios complexos, realizar esse estudo se tornar uma tarefa que demanda bastante tempo. Em vista disso, a utilização de softwares, como o desenvolvido em questão, facilita e abrevia exponencialmente o tempo empregado nesta fase do projeto. Dessa maneira, com o intuito de aperfeiçoar o programa visa-se a implementação futura de mais funcionalidades como a análise da estabilidade do ponto de vista dinâmico, a introdução da parte de controles, geração de gráficos dentre outros, visto que tais adições corroborariam de forma positiva no enriquecimento da aplicabilidade do software.

REFERÊNCIAS

- Cook, M. V. Flight dynamics principles: A linear systems approach to aircraft stability and control. 2nd ed. Elsevier. Miami, 2007. 468p.
- da Silva, L. A.; Carotenuto, A.; Cassol, F. Análise de estabilidade e controle de uma aeronave rádio-controlada destinada ao transporte de carga. In: Semana internacional de engenharia e economia FAHOR, 5, 2015, Horizontina, Rio Grande do Sul.
- Emmerick, M. C.; Rosado, V. O. G. Estabilidade dinâmica de uma aeronave rádio-controlada. Revista Ciências Exatas, v.23, n.2, p.1-17, 2017.
- Nelson, R. C. Flight stability and automatic control. 2nd ed. McGraw-Hill. New York. 1998. 441p.
- Pamadi, B. N. Performance, stability, dynamics and control of airplanes. 2nd ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics – AIAA. Virginia. 2004. 766p.
- Perkins, C. D.; Hage, R. E. Airplane performance, stability and control. 1st ed. Willey. 1949. 504p.
- Pimentel, P. A. M.; dos Santos, M. D.; Kieling, A. C.; de Queiroga, S. L. M.; de Freitas, B. M. Parâmetros das superfícies de controle para estabilidade longitudinal estática de um protótipo de aerodesign rádio-controlado. In: Congresso técnico científico da engenharia e da agronomia – CONTECC, 74, 2017, Belém, Pará.
- Raymer, D. P. Aircraft design: a conceptual approach. 2nd ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics – AIAA. Washington. 1992. 745p.
- Rodrigues, L. E. M. J. Modelo teórico para determinação dos critérios de estabilidade longitudinal estática. Revista Eletrônica AeroDesign Magazine, v.2, n.1, p.1-8, 2010.