

Análise de Métodos de Pesquisa Operacional para Redução do Tempo e Custo das Tarefas de Teste em Voo de Sistemas Aeroespaciais

João Henrique Amorim de Almeida¹, Cel. Dr. Fernando T. M. Abrahão²
Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – Os testes em voo do processo de certificação aeronáutica, além de complexos e demorados, representam um dos maiores custos devido a diversos elementos como: mão de obra qualificada, infraestrutura e recursos computacionais específicos. Estes são cruciais para garantir que os dados coletados estejam de acordo com os requisitos requeridos pelas autoridades de aviação. Os métodos de condução dos testes influenciam diretamente no planejamento. Com isso, este artigo analisa as tarefas de testes em voo, utilizando pesquisa operacional, aplicando os requisitos com as restrições e relações lógicas envolvidas para verificar a compatibilidade, sequenciamento, custo e análise qualitativa.

Palavras-Chave – Testes em voo, certificação aeronáutica, pesquisa operacional.

I. INTRODUÇÃO

A certificação é um processo paralelo e independente, muitas vezes feito depois do projeto. Anteriormente, a certificação consumia em média 25% do orçamento do programa, mas com o aumento da complexidade das aeronaves e sistemas modernos, pode variar de 50% a 75% do custo total do programa de desenvolvimento. Esse processo, tem duas fases cruciais, o planejamento e o cumprimento dos requisitos. O modo como o fabricante estabelece para conduzir a certificação irá definir o sucesso na relação tempo e custo sem perder os níveis de aeronavegabilidade requeridos pelas autoridades de aviação. (Digital Certification Management, SIEMENS, 2021)

Na SAE ARP 4754A – *Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems*, apresenta alguns modos de como verificar e validar o requisito, dentre eles a análise, demonstração, inspeção, teste e similaridade.

Os testes em voo e solo certamente são os modos de validação que necessitam de estratégias para reduzir custo e tempo do processo de certificação, pois ele é a maior fatia da porcentagem de custo do programa. Esses testes validam cálculos de velocidades, cargas, desempenho, performance, etc. Um dos problemas é que as tarefas envolvidas possuem uma gama de requisitos e diversas variáveis complexas.

Além disso, o planejamento e a realização das tarefas de teste em voo dependem principalmente da experiência dos especialistas e são implementados manualmente, de modo que o processo de planejamento se torna ineficiente, caro e demorado. Sendo assim, o período de testes em voo é considerado um dos indicadores mais importantes para avaliar a eficiência do planejamento do teste de voo. (Shuangfei Xu e outros, 2021)

Há pesquisas relacionadas em como otimizar o plano e execução dos testes em voo, em que apresentam técnicas de programação utilizando Algoritmo Genético e Sequenciamento, que encontrou cenário sub-ótimo com compatibilidade e sequenciamento aplicado, demonstrando um resultado de 80 tarefas em 703 dias com 50 iterações para o período de testes em voo. Foi considerado também sete restrições, que são: precedência, combinação de tarefas, restrição meteorológica, restrição de fabricação de aeronaves, aeronave alternativa, intensidade e integridade do teste de voo. A Figura 1 apresenta o resultado do melhor cenário com a aplicação das técnicas de Algoritmo Genético. (Shuangfei Xu e outros, 2021)

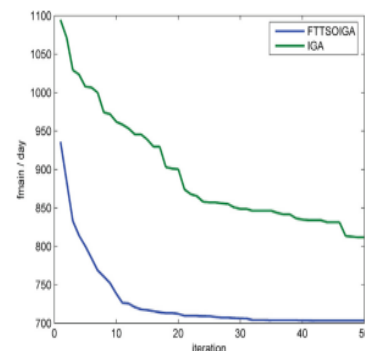


Fig. 1: Períodos de teste de voo sub-ótimos médios, Shuangfei Xu e outros, 2021.

Em (Cédric Seren e outros, 2006), os autores realizaram uma análise comparativa entre os métodos Algoritmo Genético e Programação Dinâmica, com o intuito de apresentar estratégias de otimização dos protocolos de voos de teste. Os resultados dessa análise apresentaram satisfatoriedade principalmente ao Algoritmo Genético, pois ele consegue resolver problemas de alta complexidade realizando *trade-off* entre a melhor solução e o cálculo do tempo necessário.

II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema é que as tarefas de testes em voo de sistemas aeroespaciais possuem elevados custos e tempo de realização. Isso devido a variáveis que vão além dos numerosos requisitos. Além disso, não existe uma regra ou método definido para o planejamento e execução dos testes. Assim, cada fabricante faz do modo em que sua equipe estabelece, e

quanto menos experiência ela tiver, maior a probabilidade de modos manuais, tornando um caminho mais longo e caro.

Com isso, esse artigo modela o processo de testes em voo, aplicando técnicas de pesquisa operacional como Programação Linear e *Python*, com o intuito de comparar um cenário com solução obtida por um processo manual e outro com as técnicas e estratégias programáveis com algoritmos considerando compatibilidade, sequenciamento, tempo e custo estimado envolvidos no processo.

Esse modelo matemático pretende resolver uma parte do problema do planejamento inicial das atividades, pois ainda desconsidera variáveis e abortivas advindas de fatores meteorológicos, fator humano, indisponibilidade das aeronaves, etc.

III. METODOLOGIA

Primeiramente foi realizado uma revisão da literatura na base de dados do *Scopus*. Em seguida foi realizado a introdução, definição do problema e objetivo.

Na sequência foi realizado uma análise dos requisitos para estruturar as tarefas a serem alocadas na modelagem. Os requisitos de voo de teste abordados nesse artigo são do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil - RBAC 23, *Certification Specification – CS 23, Federal Aviation Regulation – FAR 23*, e *ASTM F3264-18b Standard Specification for Normal Category Aeroplanes Certification* para aeronaves da categoria Normal.

Para a implementação do método de pesquisa operacional, será utilizado técnicas de programação linear com a função objetivo, que é minimizar o tempo e as múltiplas restrições, aliado a programação em Python na biblioteca *NumPy* e os módulos: *array*, *int*, *range*, *arange* e *random.shuffle*.

Será utilizado como premissa uma aeronave de nível 2 dos regulamentos citados, configuração para dois assentos, monomotor, instrumentação analógica, cabine não pressurizada, altitude de até 12.000 pés e velocidade de estol menor ou igual a 45 nós. A Tabela 1 apresenta uma lista das principais tarefas de testes para essa categoria de aeronave, em que é parte da modelagem.

Na sequência, será realizado uma apresentação dos resultados da análise comparativa dos cenários dos testes em voo, com a quantidade de tarefas resultantes, horas de voo e dias de voo. E por fim, uma conclusão sobre o resultado discutido baseado nas soluções apresentadas.

TABELA 1: TAREFAS DE TESTES EM VOO, AUTOR, 2022.

| Item | Flight Test Task |
|------|---|
| 1 | High speed taxi |
| 2 | First flight |
| 3 | Acceleration tests |
| 4 | Engine cooling & behavior test |
| 5 | Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration |
| 6 | General flight control characteristics |
| 7 | Low speed handling characteristics (with mid CG) Vmin: 1.1 VS |
| 8 | Stall (At limited CG position) |
| 9 | Static directional and lateral stability |
| 10 | Longitudinal control aft cg |
| 11 | Longitudinal control fwd cg |
| 12 | Trim (in the limited speed envelope) aft cg |
| 13 | Trim (in the limited speed envelope) fwd cg |
| 14 | Directional and lateral control aft cg |
| 15 | Directional and lateral control fwd cg |
| 16 | Rate of roll |
| 17 | Static longitudinal stability aft cg |
| 18 | Static longitudinal stability fwd cg |
| 19 | Dynamic stability |
| 20 | Pre-stall assessment with wider CG envelope |
| 21 | Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope aft cg |
| 22 | Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope fwd cg |
| 23 | Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration |
| 24 | Gliding characteristics with running and stopped engine |
| 25 | Take-off distance and ground roll |
| 26 | Climb |
| 27 | Landing distance and ground roll |
| 28 | Go-around and balked landing |
| 29 | Unusable fuel |
| 30 | Engine cooling test in a wider envelope |
| 31 | Max. operating altitude |
| 32 | Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration |
| 33 | Directional and lateral control in the whole envelope aft cg |
| 34 | Directional and lateral control in the whole envelope fwd cg |
| 35 | Spinning (1 turn/ 3 sec. spinning, what lasts more) |
| 36 | Propeller speed and pitch limitation |
| 37 | Dynamic stability at higher speeds aft cg |
| 38 | Dynamic stability at higher speeds fwd cg |
| 39 | Flutter tests, vibrations, buffeting (speeds to VD, completing the envelope) |
| 40 | Airspeed calibration |
| 41 | Trim aft cg |
| 42 | Trim fwd cg |
| 43 | Engine qualification test |

III. CONTEXTUALIZAÇÃO

Geralmente, o cumprimento dos requisitos dos testes divide-se em duas etapas, a de planejamento e a de implementação. Cada autoridade de aviação propõe a sua maneira no intuito de orientar os fabricantes. A *Federal Aviation Administration – FAA*, por exemplo, recomenda a utilização da *AC 23-8C – Flight Test Guide for Certification of Part 23 Airplanes*, que orienta através de um método padrão aos envolvidos nas tarefas de testes em voo do processo de certificação. No entanto, em cada etapa, obtêm-se diversas tarefas e entregáveis em que cada fabricante determina como irá cumprir, e isso se não planejado e implementado corretamente poderá influenciar diretamente no tempo e custo total do programa.

Além disso, conforme descrito nos capítulos anteriores, recentemente algumas instituições pelo mundo já vem pesquisando novas maneiras de otimizar o processo de testes em voo, devido à alta importância de garantir os melhores níveis de *safety* com uma relação tempo e custo que seja a mínima possível. Com isso, nesse artigo, também apresenta uma análise para se verificar novos modos que possam reduzir o tempo e conseqüentemente o custo dos meios de cumprimento das tarefas de voo de teste. Assim, as programações serão ferramentas de auxílio para implementar as restrições com as variáveis utilizando os algoritmos de

compatibilidade, sequenciamento, estimativa tempo, custo e análise qualitativa. A Figura 2 ilustra como esses quatro recursos estão envolvidos no processo de testes em voo.



Fig. 2: Recursos envolvidos no processo de testes em voo, autor, 2022.

Colocar um protótipo para o primeiro voo, exige alta maturidade da equipe, recursos computacionais de aquisição de dados calibrados, infraestrutura adequada, bem como outros suportes de ferramentais necessários. Além disso, quanto mais complexo for o projeto, e mais serviços comerciais ele pretender oferecer, mais requisitos ele deverá cumprir. Na própria Instrução Suplementar – IS 21.001 emitida em 2021 pela ANAC, apresenta quatro das principais restrições do processo de certificação, que são: novidade, complexidade, competência do requerente e severidade. Isso demonstra como a autoridade certificadora se preocupa para que, no final, o êxito da segurança seja alcançado.

IV. DISCUSSÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise dos métodos foi realizada a partir dos cenários 1 e 2, caracterizados respectivamente como C1 e C2. Para os dois cenários foram utilizadas 43 tarefas de testes em voo, com restrição de 5 horas de voo por dia.

O cenário C1 segue um método padrão da ordem dos requisitos no regulamento, de forma manual e sem uso de técnicas de programação.

O cenário C2 considera um método de planejamento e implementação, com a aplicação da programação linear com programação em *Python* na biblioteca *NumPy*, em que faz a iteração e combinação dos dados, sequenciamento com pré-requisitos, estimativa cronológica e custo previsto de horas trabalhadas. A Figura 3 apresenta o digrama de como ocorre a iteração até a geração de uma matriz definitiva.

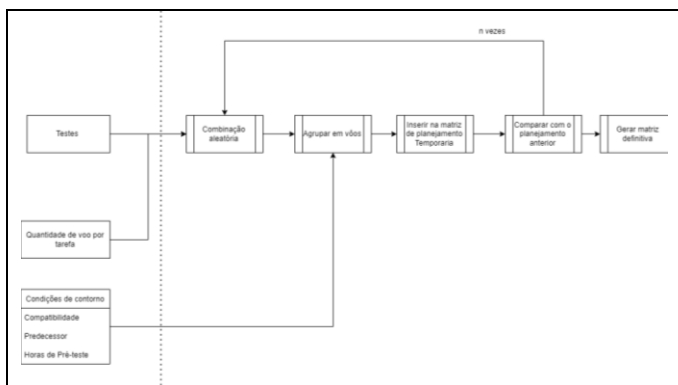


Fig. 3: Diagrama de iterações matriciais da programação dos testes em voo, autor, 2022.

As principais restrições para a compatibilidade de tarefas são: realizar três testes por voo, os voos complexos devem ser únicos e a configuração da variação do centro de gravidade com alguns testes sendo para frente e outros para trás, conforme requer o requisito aeronáutico. Para o recurso de sequenciamento, utilizou-se a restrição de precedência de tarefa. A Tabela 2 apresenta uma parte da modelagem de como a compatibilidade e sequenciamento foi gerado a partir das restrições estabelecidas.

TABELA 2: EXEMPLO DE UMA PARTE DA PROGRAMAÇÃO DO PLANO DE ENSAIOS EM VOO, AUTOR, 2022.

| Seq. | Teste em voo 1 | Teste em voo 2 | Teste em voo 3 | Horas de voo |
|------|---------------------------------------|---|--|--------------|
| 9 | 8- Stall (At limited CG position) | --- | --- | 5 |
| 10 | 10- Longitudinal control aft cg, | 37- Dynamic stability at higher speeds aft cg | 12- Trim (in the limited speed envelope) aft cg. | 5 |
| 59 | --- | --- | --- | --- |
| 69 | 27- Landing distance and ground roll, | 28- Go-around and balked landing | --- | 5 |

No teste de Sequência 9, por exemplo, devido à complexidade, apenas um teste poderia ser realizado. Na Sequência 10, houve compatibilidade de três ensaios em um mesmo teste. Já na Sequência 59, não houve nenhum teste, nesse caso, a programação aplicou a necessidade de planejamento dos testes. Na Sequência 69, apresentou uma compatibilidade de dois ensaios. A tabela 3 apresenta o resultado da aplicação dos algoritmos de sequenciamento e compatibilidade com as restrições da modelagem referenciadas na Tabela 1.

TABELA 3: SEQUENCIAMENTO E COMPATIBILIDADE DE TAREFAS DE TESTES EM VOO, AUTOR, 2022

| |
|---|
| Seq.3[4,3,1], Seq.4[2], Seq.6[5], Seq.7[7], Seq.8[30,31], Seq.9[8], Seq.10[10,37,12], Seq.11[7], Seq.12[23], Seq.13[43], Seq.14[29], Seq.15[8], Seq.16[11,19,16], Seq.17[36], Seq.18[12,17], Seq.19[42,38,18], Seq.20[34,13], Seq.22[31], Seq.23[39], Seq.24[24], Seq.25[23], Seq.26[41,19], Seq.27[39], Seq.29[20], Seq.30[20], Seq.31[15,42], Seq.32[22], Seq.33[37], Seq.34[4], Seq.35[41,19], Seq.36[29], Seq.38[36], Seq.39[35], Seq.41[9], Seq.42[14], Seq.43[43], Seq.46[21], Seq.47[26,27], Seq.50[26], Seq.52[26,27], Seq.55[24], Seq.56[14], Seq.57[9], Seq.60[34], Seq.61[33], Seq.62[9], Seq.64[25], Seq.65[25], Seq.66[24], Seq.69[27,28], Seq.70[28], Seq.73[21], Seq.74[25], Seq.75[32], Seq.77[21], Seq.78[43], Seq.80[34], Seq.84[23], Seq.85[23], Seq.86[23], Seq.92[5], Seq.93[5], Seq.95[5], Seq.101[5], Seq.102[5], Seq.107[6], Seq.113[6], Seq.114[6], Seq.119[6], Seq.125[6], Seq.126[6], Seq.131[6] |
|---|

A análise qualitativa foi realizada tarefa por tarefa com os resultados da programação, em que foi reorganizado para fazer uma revisão das alocações de tarefas predecessoras, tarefas únicas, intervalo de planejamento entre tarefas, estimativas para se obter uma proximidade de um plano de testes em voo e outros fatores para melhorar os arranjos otimizados pela programação, como alocação de mão de obra, em que foi codificado na programação como Equipe.

Para a estimativa cronológica, além da programação, foi utilizado uma referência de guias de certificação da *European Union Aviation Safety Agency - EASA* dos principais itens

para realização de um programa de testes em voo, conforme apresentado na Tabela 4.

TABELA 4: RECURSOS DO PROGRAMA DE TESTES EM VOO, AUTOR, 2022.

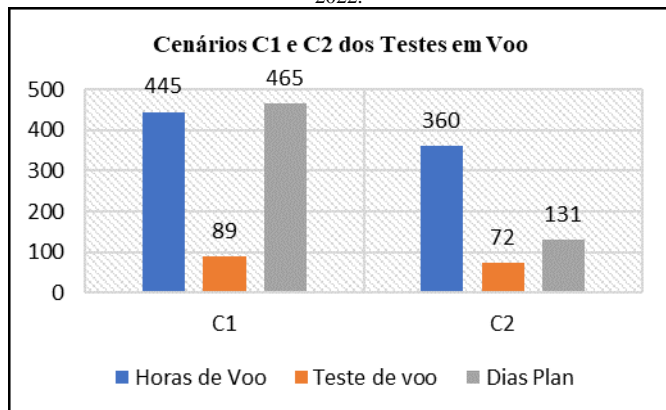
| Item | Programa de Teste de Voo = 3 x horas de voo |
|------|---|
| 1 | Métodos de teste de voo |
| 2 | Configuração do protótipo |
| 3 | Composição da equipe de teste de voo |
| 4 | Infraestrutura |
| 5 | Instrumentação e configuração de teste |
| 6 | Espaço aéreo do teste |
| 7 | Cronograma do teste de voo |
| 8 | Outputs do teste em voo |

Na estimativa de custo, utilizou-se a relação com tempo de horas de voo em cada tarefa e também a estimativa de tempo de planejamento com os recursos do programa.

Após a programação foi obtido um resultado onde pode-se comparar os dois métodos. Nessa comparação foi constatado que os dois garantem o cumprimento mínimo de *safety* requerido pelas autoridades de aviação civil.

No entanto, o Cenário 2 apresentou uma redução de horas de teste, dias de testes e conseqüentemente os custos do programa da campanha de ensaios em voo. Isso, devido aos recursos alocados e programados, gerando estratégias para se obter um caminho mais curto e vantajoso financeiramente. A Tabela 5 apresenta as diferenças dos cenários C1 e C2.

TABELA 5: RESULTADO DOS CENÁRIOS C1 E C2 DOS TESTES EM VOO, AUTOR 2022.



Houve uma redução de 17 tarefas de testes em voo e menos 85 horas da aeronave em voo. A estimativa cronológica apresentou uma redução de 334 dias, totalizando em 131 dias, contando o planejamento e a realização dos testes. Esses dias devem ser realocados enquadrando apenas 8 horas por dia e cinco dias semanais, e com isso, o plano pode ficar entre seis e sete meses. Essa redução dos dias, se dá pela alocação de equipes e recursos envolvidos no planejamento. Na programação não considerou fatores meteorológicos, problemas de fator humanos ou outras variáveis que podem interromper a realização do plano de testes.

V. CONCLUSÃO

Com o resultado da análise sobre os cenários, conclui-se que, o modelo C2 utilizando técnicas de programação, apresentou maior eficiência quando comparado ao modo manual C1. Essa eficiência pode ser avaliada através da

minimização da relação tempo e custo das tarefas de testes em voo com as restrições envolvidas.

Além disso, mostrou estratégias utilizando recursos de compatibilidade, sequenciamento e análise qualitativa dos testes com as estimativas cronológicas. Essas estratégias podem auxiliar no planejamento e implementação do processo de testes em voo em um programa de certificação.

Para pesquisas futuras, pode-se analisar novas restrições de outros requisitos, premissas de aeronaves mais complexas e outras variáveis contendo mais tarefas, como: meteorológicas, número de protótipos, quantidade e qualificação das equipes, detalhamento de custos, infraestrutura, análise de riscos, etc.

Os dados completos da modelagem e programação estão disponíveis em: <https://www.aerologlab.ita.br/datafiles.html>

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] Cristiane, M.Z.S, (INPE), Guilherme M.S, (DCTA/IFI), Marcelo, L.O.S, (INPE), (2018) Sumarização do Processo de Certificação de Tipo da Aeronáutica Brasileira.
- [2] Shuangfei Xu, Wenhao Bi, An Zhang, Zeming Mao, 2021. Optimization of flight test tasks allocation and sequencing using genetic algorithm.
- [3] Cédric Seren, François Bommier, Alain Bucharles, Laurent Verdier, Daniel Alazard, 2006. FLIGHT TEST PROTOCOL OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS.
- [4] SAE – Aerospace International Goup, 2010. ARP 4754A - Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems
- [5] Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Regulamento Brasileiro de Aviação Civil – RBAC 23: Requisitos de aeronavegabilidade: aviões categoria normal. Disponível em: www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbac-rbac/rbac-023/@@display-file/arquivo_norma/RBAC23EMD64.pdf.
- [6] Federal Aviation Administration (FAA). Code of Federal Regulations, Title 14: Federal Aviation Regulation: Airworthiness Standards: Normal Category Airplanes – FAR 23. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/textid?SID=685dc1ae97ae3f5e5569e47880fab01e&mc=true&node=pt14.1.23>.
- [7] European Aviation Safety Agency – (EASA). Certification Specifications for Normal Category Aeroplanes – CS 23. Disponível em: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/cs-23_amendment_5_-_amc_gm_to_cs-23_issue_3_0.pdf.
- [8] Siemens Digital Industries Software, 2021. Digital certification management. Disponível em: <https://resources.sw.siemens.com/en-US/white-paper-airworthiness-digital-certification-management>
- [9] Federal Aviation Administration (FAA). AC 23-8C – Flight Test Guide for Certification of Part 23 Airplanes, disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_23-8C.pdf
- [10] Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). IS 21.001 - Orientações sobre certificação de tipo. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is-21-001>
- [11] American Society for Testing and Materials ASTM - Standard Specification for Normal Category Airplane Certification F3264-18b. Disponível em: <https://www.astm.org/f3264-18b.html>