

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE
MESQUITA FILHO”**

**CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

GABRIEL PRIZIMICH DE ALMEIDA GAMERO VICO

**OTIMIZAÇÃO DA CAMPANHA DE ENSAIOS EM VOO DO PROCESSO DE
CERTIFICAÇÃO DE UMA AERONAVE LEVE ESPORTIVA**

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

GABRIEL PRIZIMICH DE ALMEIDA GAMERO VICO

**OTIMIZAÇÃO DA CAMPANHA DE ENSAIOS EM VOO DO PROCESSO DE
CERTIFICAÇÃO DE UMA AERONAVE LEVE ESPORTIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” como requisito para obtenção
de título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica

Orientador: Prof. Dr. Leandra Isabel de Abreu

Coorientador: Eng. João Henrique Amorim de Almeida

This work is licensed under the Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

V638o

Vico, Gabriel Prizimich de Almeida Gamero

OTIMIZAÇÃO DA CAMPANHA DE ENSAIOS EM VOO DO
PROCESSO DE CERTIFICAÇÃO DE UMA AERONAVE LEVE
ESPORTIVA / Gabriel Prizimich de Almeida Gamero Vico. -- São
João da Boa Vista, 2023

40 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de
Engenharia, São João da Boa Vista

Orientadora: Leandra Isabel de Abreu

Coorientador: João Henrique Amorim de Almeida

~~1. Aeronáutica. 2. Certificação. 3. Engenharia. I. Título.~~

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**OPTMIZAÇÃO DA CAMPANHA DE ENSAIOS EM VOO DO PROCESSO DE
CERTIFICAÇÃO DE UMA AERONAVE LEVE ESPORTIVA**

Aluno: Gabriel Prizimich de Almeida Gamero Vico
Orientador: Prof.^a Dr.^a Leandra Isabel de Abreu

Banca Examinadora:

- Leandra Isabel de Abreu (Orientadora)
- Aline Amorim de Almeida Fernandes (Examinadora)
- Vagner Candido de Sousa (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 047/2021)

São João da Boa Vista, 01 de fevereiro de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família por todo o amor e apoio incondicional que me deram durante toda a graduação. Agradeço especialmente aos meus pais, por terem sido meus principais incentivadores e por terem acreditado em mim desde o começo.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos, que foram minha fonte de inspiração e motivação durante todo este processo. Agradeço pela paciência, pelos conselhos e pelas risadas compartilhadas.

Quero expressar minha gratidão aos meus professores orientadores, pelo tempo e dedicação que disponibilizaram em me ajudar a desenvolver meu TCC. Agradeço pela orientação, pelos conselhos e pelas valiosas contribuições.

Agradeço também aos meus colegas de república, ViraCopos, por todas as noites de estudo e discussões e pela boa companhia e amizade.

Gostaria de dar uma menção especial para meus colegas de trabalho da Seamax, por todo o apoio e colaboração que me deram durante a pesquisa e elaboração do meu TCC. Agradeço pela oportunidade de poder trabalhar em um ambiente tão enriquecedor e pela amizade.

Agradeço a todos os que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse concluir este trabalho.

“A ciência pode nos divertir e fascinar, mas é a engenharia que muda o mundo.”

(Isaac Asimov)

RESUMO

Dentro do processo de certificação de uma aeronave, a campanha de ensaios em voo pode representar um dos maiores custos e tempo devido aos numerosos requisitos e tarefas envolvidas, bem como uma demanda de profissionais qualificados, infraestrutura adequada, ferramental e instrumentos para realização dos testes. Como prova de conceito, esse trabalho de graduação pretende modelar o processo de testes em voo, baseado nos requisitos de design e performance da categoria Leve Esportiva, aplicando as restrições e *inputs* necessários, utilizando técnicas de programação para analisar estratégias de sequenciamento, compatibilidade e alocação lógica. Com a modelagem e programação aplicada, simular um plano de testes em voo que resulte em uma otimização na relação tempo e custo, e assim apresentar uma referência de plano aos fabricantes de aeronaves leve esportivas.

Palavras-chave: Certificação de aeronaves; Testes em voo; Aeronave Leve Esportiva.

ABSTRACT

Within the certification process of an aircraft, the flight testing process can represent one of the highest costs and time due to the numerous requirements and tasks involved, as well as a demand for qualified professionals, adequate infrastructure, tools and instruments to carry out the tests. As a proof of concept, this work below intends to model the flight testing process, based on the design and performance requirements of the Light Sport category, applying the necessary restrictions and inputs, using programming techniques to analyze sequencing strategies, compatibility and allocation logical. With the modeling and programming applied, simulate a flight test plan that results in an optimization in terms of time and cost, and thus present a plan reference to light sport aircraft manufacturers.

Keywords: Aircraft certification; Flight tests; Light Sport Aircraft.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Seamax M22, ALE projetada e fabricada no Brasil	13
Figura 2	Períodos de teste de voo sub-ótimos médios	18
Figura 3	Algoritmo desenvolvido	20
Figura 4	Progressão do Algoritmo	25
Figura 5	Variação do número de testes por voo	27
Figura 6	Variação da quantidade de equipes de desenvolvimento	28
Figura 7	Comparação entre o algoritmo e o método de controle	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Aeronaves LSA aceitos no Brasil	12
Tabela 2	Padrões de consenso ASTM aceitos pela FAA – ALE	15
Tabela 3	Campanha de ensaios em voo de um ALE	16
Tabela 4	Dados dos ensaios	22
Tabela 5	Agenda final de voos	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LSA	<i>Light Sport Aircraft</i> (Aeronave Leve Esportiva)
ALE	Aeronave Leve Esportiva
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> (Administração Federal de Aviação)
VS	Velocidade de estol
VH	Velocidade máxima em voo nivelado com potência máxima contínua
Vmin	Velocidade mínima
PMD	Peso máximo de decolagem
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
CG	Centro de Gravidade
AFT	<i>After</i> (após)
FWD	<i>Foward</i> (frente)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Órgão estadunidense de normalização)

SUMÁRIO

1 OBJETIVO	11
2 INTRODUÇÃO TEÓRICA	12
2. 1 AERONAVE LEVE ESPORTIVA	12
2. 2 PROCESSO DE CERTIFICAÇÃO DA CATEGORIA ALE	14
2. 3 CAMPANHA DE ENSAIOS EM VOO DE UM LSA	16
3 METODOLOGIA	19
3. 1 FUNCIONAMENTO ALGORITMO	19
3. 2 RESTRIÇÕES IMPOSTAS	21
3.2.1 QUANTIDADE DE VOOS	21
3.2.2 COMPATIBILIDADE	21
3.2.3 PREDECESSORES	21
3.2.4 HORAS DE DESENVOLVIMENTO	21
3. 3 ENTRADAS DO ALGORITMO	22
3.3.1 DADOS DO PROJETO	22
3.3.2 DADOS DOS ENSAIOS	22
3. 4 ALGORITMO PARA COMPARAÇÃO	24
4 RESULTADOS	25
4. 1 PROGRESSÃO DO ALGORITMO	25
4. 2 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE TESTES POR VOO	26
4. 3 VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE EQUIPES DE DESENVOLVIMENTO	28
4. 4 RESULTADO OBTIDO	29
4. 5 COMPARAÇÃO COM O METODO DE CONTROLE	32
5 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
APÊNDICE A – CÓDIGO DESENVOLVIDO	36

1 OBJETIVO

Esse trabalho de graduação tem como objetivo desenvolver um algoritmo capaz de otimizar as tarefas de testes em voo aplicadas no processo de certificação uma aeronave da categoria Leve Esportiva, levando em consideração, o sequenciamento, a compatibilidade dos testes e suas restrições. Com isso, analisar a redução da relação custo e tempo, para que possa resultar em uma referência de planejamento do processo de ensaios em voo.

2 INTRODUÇÃO TEÓRICA

2. 1 AERONAVE LEVE ESPORTIVA

A aviação de ultraleve no Brasil teve seu início nos anos 80, esse tipo de aviação ficou extremamente popular, pois possuía um baixo custo de aquisição, operação e manutenção comparada a outras categorias [1]. Porém esse tipo de aeronave não se enquadrava em nenhuma categoria da norma de aviação. Em 2011 houve uma atualização das normas da ANAC, criando uma categoria para enquadrar esse tipo de aeronave.

A criação da categoria de Aeronave Leve Esportiva, de acordo com a ANAC [2], nasce da capacidade do setor privado de criar projetos em que o nível de segurança é algo inerente da engenharia utilizada pelo projetista, de tal maneira que não exista a necessidade do envolvimento do Estado em todo o processo de regulamentação, conhecida também como autorregulação regulada.

Com o menor envolvimento do Estado, foi possível criar uma categoria mais atrativa financeiramente, com aeronaves de diferentes propósitos, como desporto, meio de transporte particular, treinamento de pilotos privados e comerciais, dentre outros. Desde 2012, ano de implementação dessa categoria no Brasil, a ANAC aprovou 21 modelos [3] de ALE, conforme apresentado na Tabela 1..

Tabela 1 –Aeronaves LSA aceitos no Brasil.

MODELO	FABRICANTE	TIPO DE AERONAVE	PAÍS DE ORIGEM
AA-155	AEROÁLCOOL Tecnologia Ltda.	ASA FIXA - Terrestre	Brasil
A-22 LS (Somente Experimental)	AEROPRAKT	ASA FIXA - Terrestre	Ucrânia
ADVENTURE	TRIKE ÍCAROS – Indústria Aeronáutica Ltda.	PENDULAR -Terrestre	Brasil
ALTO TG 912	DIRECT FLY	ASA FIXA - Terrestre	República Checa
ASTORE	TECNAM Aircraft	ASA FIXA - Terrestre	Itália
CC11-160	Cub Crafters Inc.	ASA FIXA - Terrestre	Estados Unidos
CTLS	FLIGH DESIGN	ASA FIXA - Terrestre	Alemanha
HARMONY LSA	Evektor-Aerotechnik a.s.	ASA FIXA - Terrestre	República Checa
MONTAER MC01	MONTAER Aeronaves Ltda.	ASA FIXA - Terrestre	Brasil
P92 Eaglet/Eaglet NG	TECNAM Aircraft.	ASA FIXA - Terrestre	Itália
P92 Echo Light	TECNAM Aircraft.	ASA FIXA - Terrestre	Itália
P2002 Sierra de Luxe	TECNAM Aircraft.	ASA FIXA - Terrestre	Itália

P2008	TECNAM Aircraft.	ASA FIXA - Terrestre	Itália
REMOS GX	Remos Aircraft.	ASA FIXA - Terrestre	Alemanha
SEAMAX M-22	SEAMAX Aircraft Ltda.	ASA FIXA - Anfíbio	Brasil
SINUS	Pipistrel d.o.o. Ajdovscina	ASA FIXA - motoplano-dor	Eslovênia
SPORTSTAR MAX	Evektor-Aerotechnik a.s.	ASA FIXA - Terrestre	República Checa
SUPER PETREL LS	SCODA Aeronáutica.	ASA FIXA - Anfíbio	Brasil
FK 9 MkV ELA	FK LIGHTPLANES	ASA FIXA - Terrestre	Alemanha
VIMANASTEEL	RUPERT Indústria Aeronáutica Ltda.	ASA FIXA - Terrestre	Brasil
SLING LSA	The Airplane Factory (Pty) Ltd.	ASA FIXA - Terrestre	África do Sul

Atualmente no Brasil, de acordo com o RBAC 01, os limites máximos [4] impostos para uma aeronave ser considerada da categoria LSA são:

- 4 Assentos
- 185kt CAS(Vh)
- 61kt CAS (Vs)
- 1361kg (PMD)
- Hélice de passo fixo, ajustável no solo ou de passo variável
- Motor a pistão ou elétrico

Figura 1 – Seamax M22, ALE projetada e fabricada no Brasil.



Fonte: SEAMAX AIRCRAFT [5]

2.2 PROCESSO DE CERTIFICAÇÃO DA CATEGORIA ALE

As normas que ditam os principais requisitos de aeronavegabilidade necessárias para se certificar uma aeronave leve esportiva motorizada e com asas fixas, estão dispostas na ASTM F2245 [6]. Essas normas têm validade internacional, sendo reconhecidas pela ANAC, no Brasil [7], pela FAA, nos Estados Unidos [8] e em diversos outros órgãos reguladores de aviação pelo mundo.

A ASTM F2245 [6] tem suas especificações dispostas da seguinte maneira:

- Voo: Nesta seção são apresentados diversos requisitos de voo que a aeronave deve cumprir, como por exemplo, requisitos de velocidade, limites para distribuição de cargas, limites para parâmetros de velocidade e inclinação da hélice, desempenho em voo, controlabilidade e manobrabilidade, vibrações, controle e estabilidade no solo e na água e características de spray.

- Estrutura: Neste capítulo são apresentados os requisitos da estrutura para diversos casos de cargas, como por exemplo, cargas em geral, cargas provenientes do voo, cargas nas superfícies de controle, cargas em superfícies estabilizadoras, cargas em aletas externas ou *Winglets*, forças combinadas em superfícies estabilizadoras, cargas em superfícies de controle, cargas em solo, cargas na água e cargas em condição de pouso de emergências.

- *Design* e construção: Nesta parte a norma faz várias considerações sobre materiais de construção, métodos de fabricação, porcas auto travante, proteção dos elementos estruturais, acessibilidade de elementos críticos, sistemas de controle, cabine do piloto, sistema de indicação da velocidade do ar, sistema de medição do ângulo de ataque e aeronaves com flutuadores e cascos.

- Grupo motopropulsor: Aqui são descritos os requisitos e parâmetros para motores e hélices, instalação do grupo motopropulsor, sistema de combustível, sistema de óleo, sistema de indução, prevenção de incêndio e cabeamento da EPU.

- Equipamento necessário: Neste capítulo são descritos os equipamentos que a aeronave deve conter para que ela seja considerada aeronavegável.

- Informações e limitação operacionais: Nesta seção são descritas todos os adesivos e avisos que a aeronave deve conter.

- Manual de operação do piloto: Nesta parte a norma informa que cada aeronave deve conter um manual disponível nela.

Além dos requisitos de design e performance, ASTM F2245 [6], existem outras normas que são empregadas durante a certificação, como por exemplo, requisitos de produção, qualidade, manutenção etc. A FAA possui um documento [9] contendo todas as normas ASTM aceitas para a certificação de um ALE. Mais especificamente, a certificação de um avião na classe ALE, envolve as seguintes normas:

Tabela 2 – Padrões de consenso ASTM aceitos pela FAA - ALE

<i>Consensus Standard</i>	<i>Airplanes</i>
<i>Required Product Information</i>	F2745-15
<i>Wing Interface Documentation</i>	N/A
<i>[1] Design and Performance</i>	F2245-16C or F2245-20
<i>Design & Manufacture Spark Ignition Engines</i>	F2339-17 or F2339-19a
<i>Design & Manufacture of Reciprocating Compression Ignition Engines</i>	F2538-07a
<i>Design and Testing of Fixed-Pitch or Ground Adjustable Propellers</i>	F2506-13
<i>Airframe Emergency Parachutes</i>	F2316-12
<i>[2] Required Equipment</i>	F2245-16c
<i>[3] Quality Assurance</i>	F2972-15
<i>[4] Production Acceptance Tests</i>	F3035-13
<i>[5] Aircraft Operating Instructions (AOI) / Pilot Operating Handbook (POH)</i>	F2746-14 [Ref. F2245]
<i>Flight Training Supplement</i>	F2746-14
<i>[6] Maintenance and Inspection Procedures</i>	F2483-18
<i>[7] Identification and Recording of Major Repairs and Major Alterations</i>	F2483-18
<i>[8] Continued Airworthiness</i>	F3198-18
<i>[9] Manufacturer's Assembly Instructions [Kit builders only]</i>	F2563-16

Tendo em vista a complexibilidade das especificações dispostas na norma, o projeto de uma aeronave leve esportiva deve ter, em sua concepção, a sua missão bem definida e um amplo estudo voltado ao cumprimento dos requisitos descritos na norma. Esse estudo demanda um importante planejamento inicial e mão de obra qualificada.

Com todas as normas empregadas ao projeto, pode-se dar início a campanha de certificação. É importante ressaltar que esse processo não é simples, vide a quantidade de requisitos que devem ser cumpridos e comprovados para a autoridade regulamentadora. O tempo médio para um processo de certificação ser finalizado é de 1 a 2 anos, dependendo da maturidade do projeto e do fabricante.

Os recursos necessários para viabilizar uma campanha de certificação podem variar de acordo com cada projeto, mas independente disso, o custo da certificação é sempre uma grande

parcela do valor total gasto no desenvolvimento de uma aeronave. Esse valor provém do gasto em mão de obra qualificada, produção de protótipos, *softwares*, instalações etc.

2. 3 CAMPANHA DE ENSAIOS EM VOO DE UM LSA

Os ensaios em voo têm um papel importante dentro da campanha de certificação, eles têm como principal objetivo a validação dos requisitos de aeronavegabilidade. Além disso os testes determinam informações importantes sobre o desempenho de voo das aeronaves e o seu nível de segurança.

Com o aumento crescente do nível da complexibilidade das aeronaves e dos seus sistemas, o período de ensaios em voo fica mais longo, mais complexo e mais caro, tornando-se cada vez mais a parcela mais crítica dentro de um processo de certificação.

Toda a pesquisa será baseada nos requisitos da norma ASTM F2245 [6], utilizando como premissa uma aeronave leve esportiva, 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 3, apresenta uma lista das principais tarefas de ensaio em voo, baseado na norma ASTM F2245, com requisitos de design e performance.

Tabela 3 – Campanha de ensaios em voo de um ALE

<i>High speed taxi</i>
<i>First flight</i>
<i>Acceleration tests</i>
<i>Engine cooling & behavior test</i>
<i>Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights</i>
<i>General flight control characteristics</i>
<i>Low speed handling characteristics (with mid CG) V_{min}: 1.1 VS</i>
<i>Stall (At limited CG position)</i>
<i>Static directional and lateral stability</i>
<i>Longitudinal control aft cg</i>
<i>Longitudinal control fwd cg</i>
<i>Trim (in the limited speed envelope)</i>
<i>Trim (in the limited speed envelope)</i>
<i>Directional and lateral control aft cg</i>
<i>Directional and lateral control fwd cg</i>
<i>Rate of roll</i>
<i>Static longitudinal stability aft cg</i>

<i>Static longitudinal stability fwd cg</i>
<i>Dynamic stability</i>
<i>Pre-stall assessment with wider CG envelope</i>
<i>Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope</i>
<i>Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope</i>
<i>Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration</i>
<i>Gliding characteristics with running and stopped engine</i>
<i>Take-off distance and ground roll</i>
<i>Climb</i>
<i>Landing distance and ground roll</i>
<i>Go-around and balked landing</i>
<i>Unusable fuel</i>
<i>Engine cooling test in a wider envelope</i>
<i>Max. operating altitude</i>
<i>Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration</i>
<i>Directional and lateral control in the whole envelope aft cg</i>
<i>Directional and lateral control in the whole envelope fwd cg</i>
<i>Spinning (1 turn/ 3 sec. spinning, what lasts more)</i>
<i>Propeller speed and pitch limitation</i>
<i>Dynamic stability at higher speeds aft cg</i>
<i>Dynamic stability at higher speeds fwd cg</i>
<i>Flutter tests, vibrations, buffeting (speeds to VD, completing the envelope)</i>
<i>Airspeed calibration</i>
<i>Trim aft cg</i>
<i>Trim fwd cg</i>
<i>Engine qualification test</i>

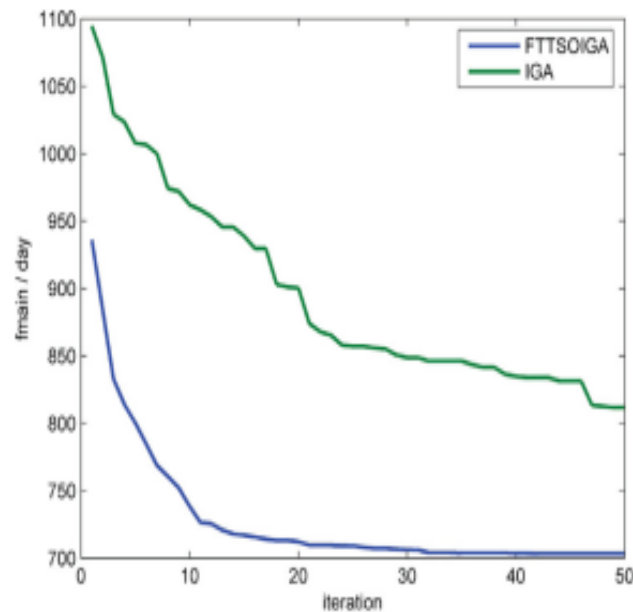
A organização e sequenciamento das tarefas de ensaio em voo é um processo complexo, que depende das características da própria aeronave, requisitos das tarefas, relações entre os ensaios e a estrutura disponível. Essa complexibilidade gera um problema de otimização não linear com múltiplas restrições.

O processo de ensaios em voo possui alta relevância aos fabricantes e projetistas aeronáuticos, pois sempre foi um dos itens mais complexos e custosos. Assim, durante a pesquisa bibliográfica, foi constatado outros trabalhos tratando desse tema e propondo métodos de otimização, com várias abordagens. Algumas pesquisas [10] utilizam como base o método de Algoritmos Genéticos [11], a fim de obter um sequenciamento, aplicando diversas 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 a seguir, apresenta o resultado obtido [10] de um cenário sub-ótimo para o sequenciamento de 80 tarefas com múltiplas restrições. Comparando a primeira iteração com o

resultado obtido pela última iteração é possível notar a redução drástica da quantidade de dias necessários para a realização dessas tarefas, chegando-se em um resultado de 703 dias ao fim de 50 iterações. O período de teste de voo é considerado um dos indicadores mais importantes para avaliar a eficiência do planejamento do teste de voo. (Shuangfei Xu, 2021)

Figura 2 – Períodos de teste de voo sub-ótimos médios



Fonte: Shuangfei Xu e outros, 2021 [10]

Existem também pesquisas [12] que realizam uma análise comparativa entre os métodos de Algoritmos Genéticos [11] e Programação Dinâmica [13] a fim de apresentar estratégias de otimização dos protocolos de testes em voo.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho está organizada da seguinte forma. Na seção 3.1, é apresentado o funcionamento básico do algoritmo. Na seção 3.2, são apresentadas todas as restrições impostas ao algoritmo baseadas nas tarefas dos ensaios em voo. Na seção 3.3, todas as entradas necessárias para o funcionamento do algoritmo são descritas. Na seção 3.4 descreve-se o método que será utilizado como métrica.

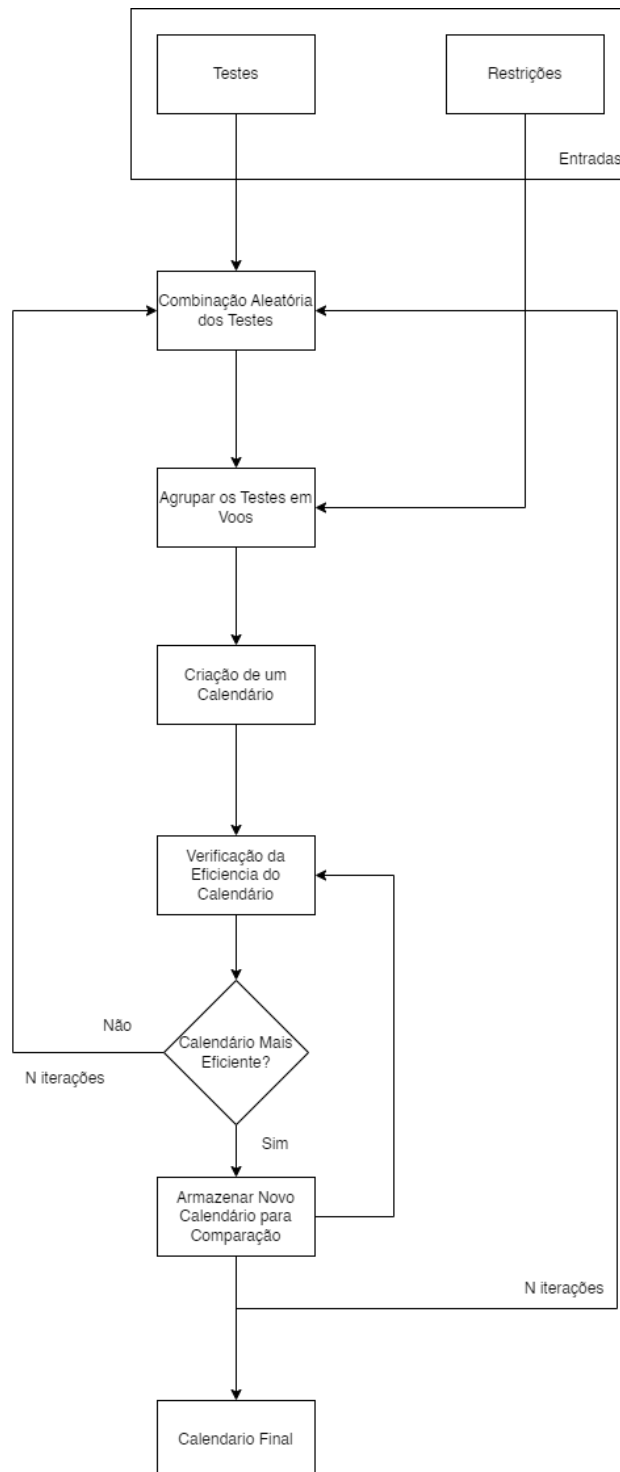
3.1 FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO

O algoritmo criado por esse trabalho foi implementado em *Python* [14] e possui a seguinte estrutura:

- 1- Os *inputs* são armazenados em vetores [15], contendo os testes e suas respectivas restrições;
- 2- A quantidade de iterações utilizadas é informada;
- 3- O vetor que armazena os testes é embaralhado de maneira aleatória [16];
- 4- Seguindo a nova ordem do vetor, os testes vão sendo ordenados nos voos, seguindo as restrições impostas nos *inputs*;
- 5- Com todos os testes alocados é criado um vetor contendo esse calendário provisório;
- 6- O calendário provisório é comparado com o melhor calendário já encontrado durante as iterações;
- 7- Se o calendário provisório é melhor do que o anterior, contendo menos dias de voos, o calendário provisório é armazenado, caso contrário nada ocorre;
- 8- A sequência do passo dois em diante é repetida n vezes, de acordo com o número de iterações já definida;
- 9- Cria-se um *output* contendo o melhor calendário encontrado.

Essa sequência está exemplificada na Figura 3:

Figura 3 – Algoritmo desenvolvido.



Fonte: Autor, 2023.

3.2 RESTRIÇÕES IMPOSTAS

3.2.1 QUANTIDADE DE VOOS

Baseando-se na norma [6], cada ensaio deve ser realizado de maneira a cumprir uma quantidade determinada de números de voos, para que o seu requisito possa ser comprovado. Como *input*, o algoritmo recebe um vetor contendo as quantidades de voo necessários para cada ensaio.

3.2.2 COMPATIBILIDADE

Cada ensaio de voo necessita de uma configuração específica da aeronave, um percurso determinado e manobras a serem cumpridas, devido a isso, nem todos os ensaios podem ser realizados no mesmo voo, por isso é importante determinar a compatibilidade de cada teste.

Para facilitar o funcionamento do algoritmo os testes foram armazenados em grupos de compatibilidade, sendo referenciados por um número alocado de maneira sequencial para cada grupo. Vale a pena ressaltar que alguns ensaios devem ser realizados sozinhos no voo, para esses testes foram alocados grupos exclusivos.

3.2.3 PREDECESSORES

Alguns ensaios possuem algum teste como pré-requisito, por exemplo, o primeiro voo necessita que todos os testes em solo já tenham sido realizados, para isso, cada teste foi correlacionado com os seus respectivos predecessores. Essa informação está armazenada em um vetor informado no input do algoritmo.

3.2.4 HORAS DE DESENVOLVIMENTO

Para a realização dos testes são necessárias algumas horas de desenvolvimento, estudo sobre o teste a ser realizado, preparação da aeronave e processamento dos dados obtidos em voo. O tempo gasto para a realização dessas tarefas está relacionado com a quantidade de equipes de desenvolvimentos, pela eficiência delas e pelo tipo de ensaio a ser realizado.

O algoritmo tem como entrada a quantidade de equipes e a quantidade demandada para que uma equipe conclua a fase de desenvolvimento de um determinado teste.

3.3 ENTRADAS DO ALGORITMO

3.3.1 DADOS DO PROJETO

Alguns parâmetros de entrada não dependem das normas, mas sim do projeto de certificação em si, são os seguintes dados:

- Quantidade máxima de testes realizados durante um único voo;
- Horas de um voo, entrada que pode depender de muitos fatores, mas tem como limite principal o tempo de voo máximo da aeronave;
- Quantidades de equipes de desenvolvimento disponíveis para o projeto;
- Horas de desenvolvimento por dia.

3.3.2 DADOS DOS ENSAIOS

Os dados de ensaio consistem nos testes, suas respectivas restrições (Quantidade de voos, Compatibilidade, Predecessores, Horas de desenvolvimento) e sua identificação.

Tabela 4 – Dados dos ensaios

ID	Test name	Quantidade de voos	Compatibilidade	Predecessores	Horas de desenvolvimento
1	High speed taxi	1	1	3	15
2	First flight	1	1	1	15
3	Acceleration tests	1	1	4	15
4	Engine cooling & behavior test	1	1	0	15
5	Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights	5	2	40	75
6	General flight control characteristics	7	2	40	105
7	Low speed handling characteristics (with mid CG) Vmin: 1.1 VS	1	2	40	15
8	Stall (At limited CG position)	2	105	40	30
9	Static directional and lateral stability	3	2	40	45
10	Longitudinal control aft cg	1	3	40	15
11	Longitudinal control fwd cg	1	4	40	15
12	Trim (in the limited speed envelope)	1	3	40	15
13	Trim (in the limited speed envelope)	1	4	40	15
14	Directional and lateral control aft cg	1	3	40	15
15	Directional and lateral control fwd cg	1	4	40	15
16	Rate of roll	1	4	40	15

17	Static longitudinal stability aft cg	1	3	40	15
18	Static longitudinal stability fwd cg	1	4	40	15
19	Dynamic stability	2	3	40	30
20	Pre-stall assessment with wider CG envelope	2	100	40	30
21	Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope	3	106	20	45
22	Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope	1	107	20	15
23	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration	4	101	28	60
24	Gliding characteristics with running and stopped engine	3	5	40	45
25	Take-off distance and ground roll	3	6	2	45
26	Climb	3	6	2	45
27	Landing distance and ground roll	3	6	2	45
28	Go-around and balked landing	2	6	27	30
29	Unusable fuel	2	104	40	30
30	Engine cooling test in a wider envelope	2	8	40	30
31	Max. operating altitude	1	8	40	15
32	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration	2	102	40	30
33	Directional and lateral control in the whole envelope aft cg	3	3	32	45
34	Directional and lateral control in the whole envelope fwd cg	3	4	32	45
35	Spinning (1 turn/ 3 sec. spinning, what lasts more)	2	9	40	30
36	Propeller speed and pitch limitation	2	10	40	30
37	Dynamic stability at higher speeds aft cg	2	3	40	30
38	Dynamic stability at higher speeds fwd cg	2	4	40	30
39	Flutter tests, vibrations, buffeting (speeds to VD, completing the envelope)	2	103	40	30
40	Airspeed calibration	2	11	2	30
41	Trim aft cg	2	3	40	30
42	Trim fwd cg	2	4	40	30
43	Engine qualification test	3	11	40	45

Vale ressaltar que, o algoritmo permite que os dados de cada teste sejam modificados de acordo com a necessidade da campanha de ensaios, desde que respeitem os requisitos.

3. 4 ALGORITMO PARA CONTROLE

Com o intuito comparativo, foi criado um algoritmo para ser utilizado como métrica, o seu funcionamento é muito similar com o desenvolvido por esse projeto, mas ao invés de tentar otimizar as tarefas, ele simplesmente as aloca seguindo a ordem em que estão dispostas, como uma pessoa faria de forma manual.

Os métodos tradicionais de organização de tarefas de teste de voo dependem principalmente da experiência dos especialistas em testes de voo e são realizados manualmente, de modo que o processo de planejamento geralmente é muito ineficiente e demorado. (Shuangfei Xu, 2021)

4 RESULTADOS

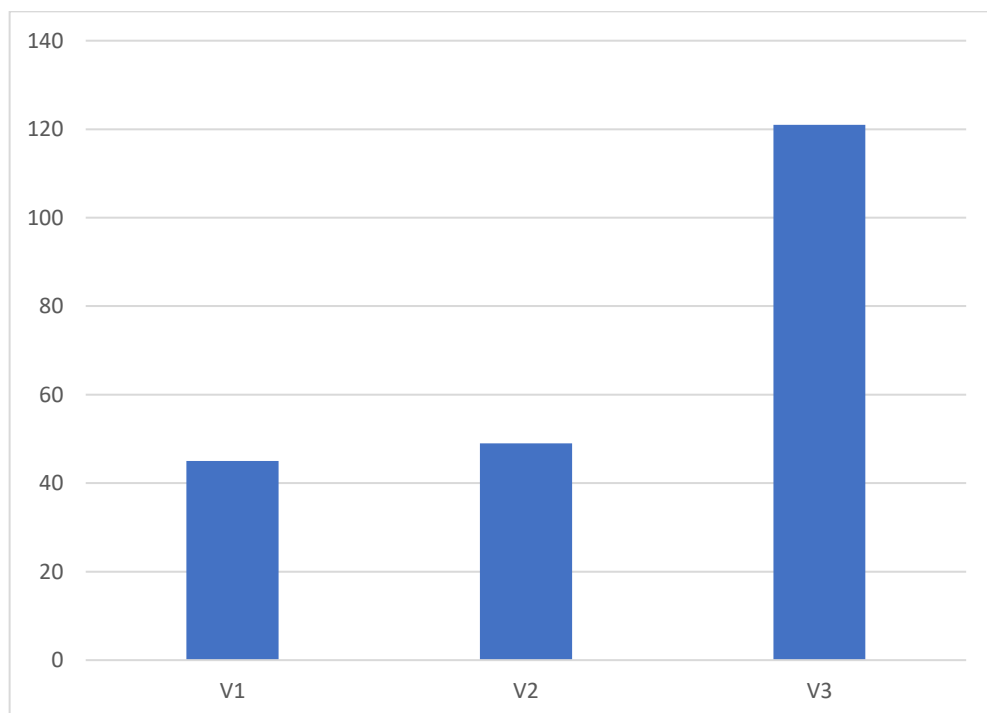
4.1 PROGRESSÃO DO ALGORITMO

As restrições impostas no algoritmo foram sendo implementadas a cada versão do código, a fim de facilitar a programação e criar um entendimento maior do impacto que cada restrição causa, assim identificando o ponto que pode causar um maior gasto financeiro. Elas foram implementadas da seguinte maneira:

- Versão 1: Compatibilidade;
- Versão 2: Compatibilidade, Predecessores;
- Versão 3 (Versão final): Compatibilidade, Predecessores, Horas de desenvolvimento;

A métrica utilizada para a comparação entre as versões, será a quantidade de dias totais gastos para realizar a campanha de ensaios.

Figura 4 – Progressão do Algoritmo.



Fonte: Autor, 2023.

Da versão um para a versão dois, podemos notar um pequeno aumento de complexibilidade, indo de 45 dias para 49, já a versão três apresenta um acréscimo significativo,

indo para 121 dias. Isso se deve principalmente ao fato de que considerando o tempo de desenvolvimento existirão alguns dias em que não será possível a realização de voos, pois as equipes estarão ocupadas com eventos de pré e pós testes.

Os elementos de pré-teste podem envolver:

- O estudo dos requisitos a serem comprovados;
- Planejamento do teste, isso pode incluir a definição dos objetivos, elaboração do plano de voo, determinação das equipes de suporte e de voo;
- Coordenação de recursos, podendo incluir, reservar instalações para o teste, solicitar a presença de equipes de resgate, notificar as autoridades reguladoras etc;
- Preparação dos equipamentos de medição que serão utilizados e sua devida calibração;
- Preparação da aeronave, realizar a inspeção pré-voo e deixar a aeronave na configuração desejada para o teste;
- *Briefing* do voo, os pilotos e a equipe de suporte devem se encontrar antes do voo para discutirem os objetivos do teste, a rota de voo, as especificações da aeronave e os procedimentos de emergência.

Os elementos de pós-teste podem envolver:

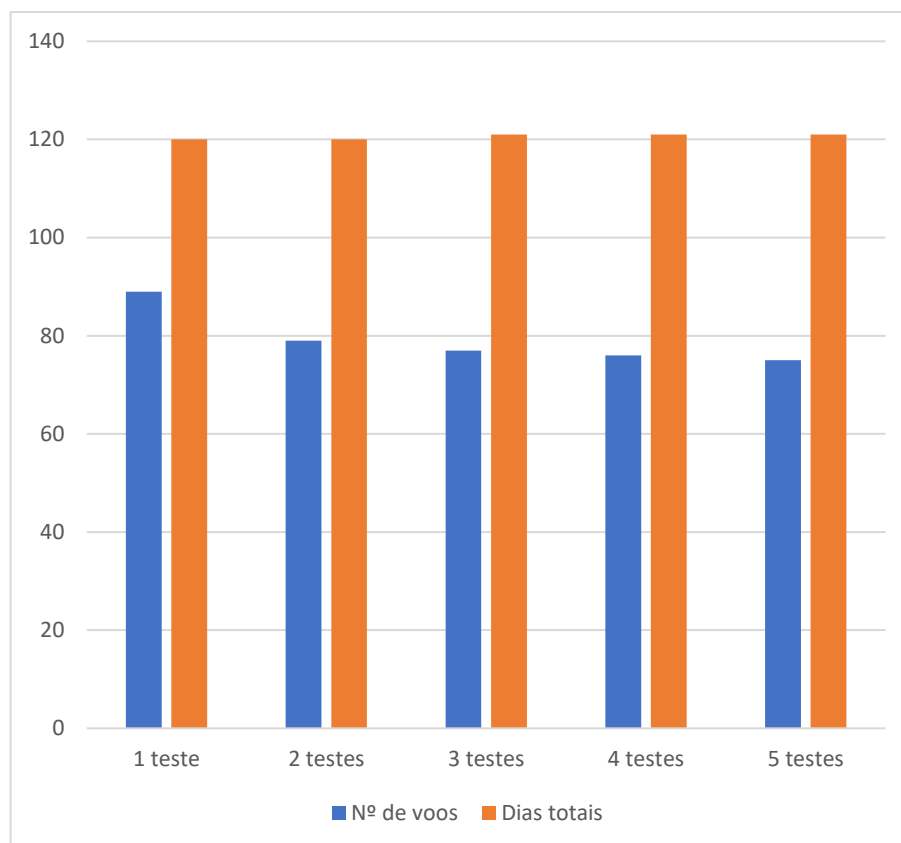
- Inspeção de pós voo da aeronave, verificar os elementos estruturais e a integridade em geral da aeronave;
- Processamento de dados, é necessário analisar todos os dados coletados durante o voo, incluindo dados de desempenho, dados de sistemas e dados de instrumentos;
- Realização de um relatório de teste;
- Atualização do registro da aeronave.

4.2 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE TESTES POR VOO

Um fator importante a ser avaliado é a quantidade de ensaios máximos que podem ser realizados em um único voo, pois isso pode acarretar uma diminuição significativa da quantidade de voos realizados, porém pode-se gerar uma sobrecarga para as equipes de desenvolvimento.

A fim de se avaliar o impacto da quantidade de ensaios realizados por voo, esse valor foi variado de 1 a 5, utilizou-se os totais de voos como métrica para comparação.

Figura 5 – Variação do número de testes por voo.



Fonte: Autor, 2023.

Com os dados obtidos, fica claro que o número de testes realizados por voo praticamente não impacta os dias totais da campanha de ensaios, porém a quantidade de voos é impactada significativamente, o que influencia no custo do projeto.

Analisando mais a fundo as quantidades de voo, pode-se perceber uma mudança maior do primeiro caso, com 89 voos, para o segundo, com 79 voos. Já os demais casos, não possuem uma melhora tão significativa sendo o terceiro caso com 77 voos, o quarto com 76 e o quinto caso com 75 voos.

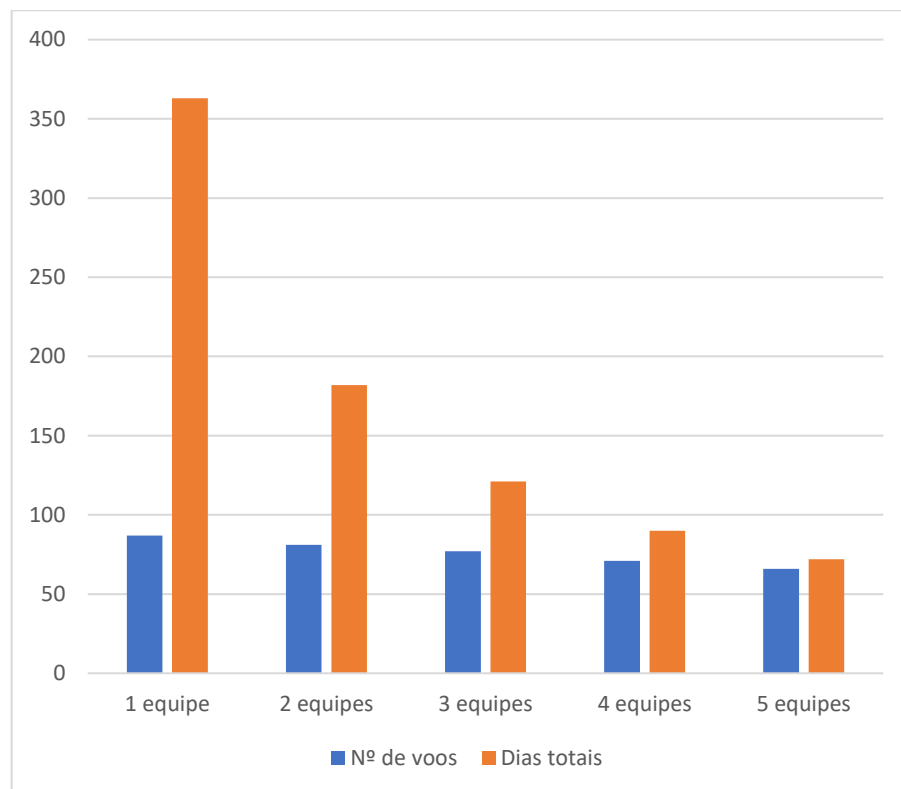
Levando em consideração as quantidades de voos realizadas em cada caso e o fato de que os ganhos deixam de ser significativos após o terceiro cenário, optou-se por realizar os ensaios utilizando o máximo de 3 testes por voo.

4.3 VARIAÇÃO DA QUANTIDADE DE EQUIPES DE DESENVOLVIMENTO

Um fator que impacta diretamente a quantidade total de dias de uma campanha de ensaios é a quantidade de equipes de desenvolvimento disponíveis. Essas equipes podem reduzir drasticamente o período de ensaios, mas isso pode acarretar um grande custo, é importante descobrir até que ponto vale a pena ou não contratar mais uma equipe de desenvolvimento.

Para avaliar o impacto da quantidade de equipes no projeto, a sua quantidade foi variada de 1 a 5, a quantidade de dias totais dias utilizada com métrica.

Figura 6 – Variação da quantidade de equipes de desenvolvimento.



Fonte: Autor, 2023.

O aumento da quantidade de equipes de desenvolvimento gera uma grande alteração nos dias totais de ensaio, principalmente nas primeiras variações. Nota-se também que a quantidade de dias totais tende a se igualar com a quantidade de número de voos.

4. 4 RESULTADO OBTIDO

Com todos os parâmetros definidos, o algoritmo nos gera uma agenda, informando cada teste em voo que deve ser realizada por dia.

Tabela 5 – Agenda final de voos.

Dia	Ensaio em voo
1	Desenvolvimento.
2	Engine cooling & behavior test, Acceleration tests, High speed taxi.
3	First flight.
4	Airspeed calibration.
5	Climb.
6	Climb.
7	Airspeed calibration.
8	Longitudinal control aft cg, Directional and lateral control aft cg, Trim (in the limited speed envelope) aft cg.
9	Longitudinal control fwd cg, Directional and lateral control fwd cg, Static longitudinal stability fwd cg.
10	Dynamic stability at higher speeds aft cg, Static longitudinal stability aft cg.
11	Trim fwd cg, Rate of roll, Trim (in the limited speed envelope) fwd cg.
12	Low speed handling characteristics (with mid CG) V_{min} , 1.1 V_S .
13	Dynamic stability at higher speeds fwd cg.
14	Unusable fuel.
15	Dynamic stability.
16	Unusable fuel.
17	Dynamic stability at higher speeds aft cg, Trim aft cg.
18	Trim fwd cg.
19	Spinning (1 turn/ 3 sec. spinning, what lasts more).
20	Take-off distance and ground roll.
21	Pre-stall assessment with wider CG envelope.
22	Spinning (1 turn/ 3 sec. spinning, what lasts more).
23	Max. operating altitude.
24	Stall (At limited CG position).
25	Trim aft cg, Dynamic stability.
26	Desenvolvimento.
27	Pre-stall assessment with wider CG envelope.
28	Landing distance and ground roll.
29	Take-off distance and ground roll.
30	Engine cooling test in a wider envelope.
31	Engine cooling test in a wider envelope.
32	Propeller speed and pitch limitation.

33	Flutter tests, vibrations, buffeting (speeds to VD, completing the envelope).
34	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration.
35	Dynamic stability at higher speeds fwd cg.
36	Flutter tests, vibrations, buffeting (speeds to VD, completing the envelope).
37	Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope fwd CG.
38	Take-off distance and ground roll.
39	Gliding characteristics with running and stopped engine.
40	Gliding characteristics with running and stopped engine.
41	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration.
42	Desenvolvimento.
43	Stall (At limited CG position).
44	Directional and lateral control in the whole envelope fwd cg.
45	Directional and lateral control in the whole envelope aft cg.
46	Propeller speed and pitch limitation.
47	Desenvolvimento.
48	Directional and lateral control in the whole envelope aft cg.
49	Directional and lateral control in the whole envelope aft cg.
50	Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope aft cg.
51	Desenvolvimento.
52	Desenvolvimento.
53	Engine qualification test.
54	Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope aft cg.
55	Directional and lateral control in the whole envelope fwd cg.
56	Desenvolvimento.
57	Static directional and lateral stability.
58	Engine qualification test.
59	Stall, wings level and turning flight (accelerated turning stalls), stall warning – wider envelope aft cg.
60	Desenvolvimento.
61	Desenvolvimento.
62	Landing distance and ground roll.
63	Landing distance and ground roll, Go-around and balked landing.
64	Desenvolvimento.
65	Go-around and balked landing.
66	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration.
67	Engine qualification test.
68	Desenvolvimento.
69	Climb.
70	Desenvolvimento.
71	Desenvolvimento.
72	Static directional and lateral stability.
73	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration.
74	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration.
75	Desenvolvimento.

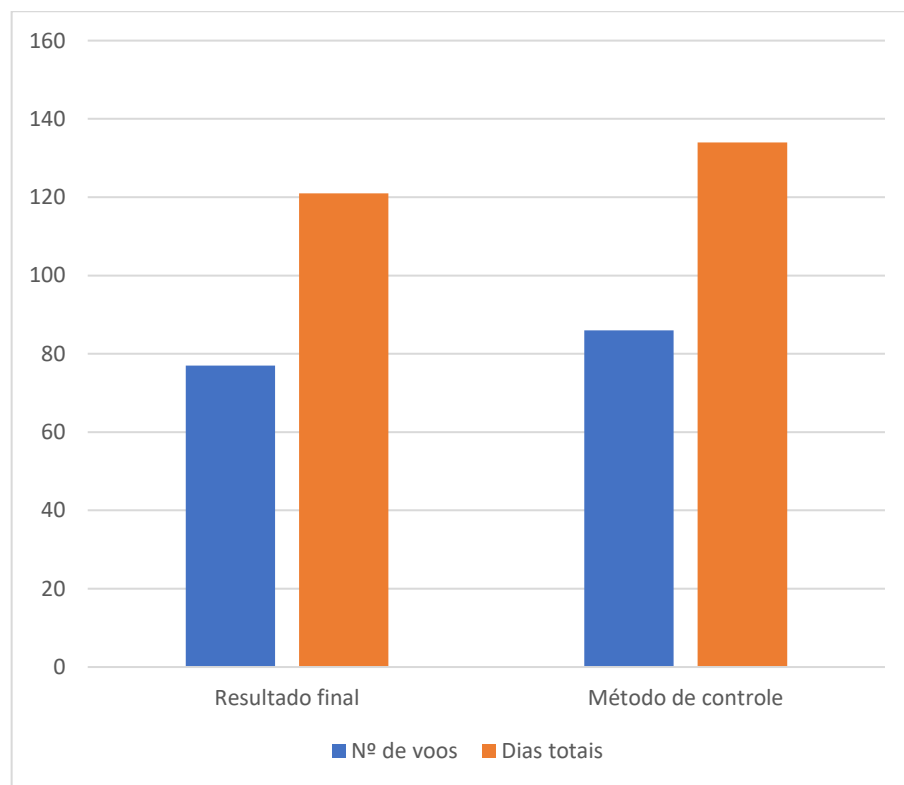
76	Gliding characteristics with running and stopped engine.
77	Desenvolvimento.
78	Desenvolvimento.
79	Envelope expansion flight and airspeed indicator calibration.
80	Static directional and lateral stability.
81	Directional and lateral control in the whole envelope fwd cg.
82	Desenvolvimento.
83	Desenvolvimento.
84	Desenvolvimento.
85	Desenvolvimento.
86	Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights.
87	Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights.
88	Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights.
89	Desenvolvimento.
90	Desenvolvimento.
91	Desenvolvimento.
92	Desenvolvimento.
93	Desenvolvimento.
94	Desenvolvimento.
95	Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights.
96	Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator initial calibration flights.
97	General flight control characteristics.
98	Desenvolvimento.
99	Desenvolvimento.
100	Desenvolvimento.
101	Desenvolvimento.
102	Desenvolvimento.
103	Desenvolvimento.
104	Desenvolvimento.
105	General flight control characteristics.
106	General flight control characteristics.
107	Desenvolvimento.
108	Desenvolvimento.
109	General flight control characteristics.
110	Desenvolvimento.
111	Desenvolvimento.
112	Desenvolvimento.
113	Desenvolvimento.
114	Desenvolvimento.
115	Desenvolvimento.
116	Desenvolvimento.
117	General flight control characteristics.
118	General flight control characteristics.
119	Desenvolvimento.
120	Desenvolvimento.
121	General flight control characteristics.

É interessante notar que existem muitos dias sem a realização de voos e alguns voos que não possuem três ensaios realizados nele. Isso ocorre devido a todas as restrições e parâmetros inseridos no algoritmo. O resultado possui 121 dias e 77 voos realizados.

4. 5 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DE CONTROLE

Comparando o resultado com o método de controle, temos os 77 voos para o código otimizado e 86 para o controle e para dias totais temos 121 dias e 134 dias respectivamente.

Figura 7 – Comparação entre o algoritmo e o método de controle.



Fonte: Autor, 2023.

Vale notar que esses dias e voos a menos no calendário otimizado pelo algoritmo refletem diretamente no valor gasto durante a campanha de ensaios, podendo gerar uma economia significativa de recursos para a empresa.

5 CONCLUSÕES E PROJETOS FUTUROS

Aplicando o algoritmo desenvolvido neste trabalho de graduação, foi possível chegar a uma agenda otimizada de ensaios em voo para uma ALE, levando em consideração o sequenciamento, a compatibilidade dos testes e suas restrições, gerando uma redução significativa de dias e voos da campanha de ensaio, comparada com o método de controle.

Além disso, foi possível constatar o impacto real causado pelas restrições impostas, pelas quantidades de ensaios realizados por voo e pela quantidade de equipes de desenvolvimento disponíveis.

Os resultados apresentados demonstraram uma efetividade na relação custo e tempo, podendo assim ser uma referência aos fabricantes e projetistas no planejamento e realização de uma campanha de ensaios em voo no processo de certificação.

Para trabalhos futuros, pode-se implementar algumas melhorias no algoritmo, como:

- Otimizar o processo de rearranjo do vetor com as tarefas, sair de um método aleatório e utilizar uma função mais eficiente.
- Algoritmo gerar duas agendas, a de voo e a agenda de desenvolvimento.
- Calcular o custo total gerado pela campanha de ensaio.
- Aumentar as restrições, para gerar um resultado mais próximo do real possível, utilizando por exemplo, fatores climáticos, fatores humanos, maturidade da equipe etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SIGNOR, Fernanda; ROMANO, Leonardo; HAUSEN, Roberto, 2018. A sistemática de processos para certificação de aeronaves LSA conforme normas da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)
- [2] AERONAVES leves esportivas. [S. l.], 11 jan. 2021. Disponível em: gov.br/anac/pt-br/assuntos/aerodesporto/aeronaves-leves-esportivas. Acesso em: 13 dez. 2022.
- [3] AERONAVES LEVES ESPORTIVAS NO BRASIL. [S. l.], 19 set. 2022. Disponível em: sistemas.anac.gov.br/certificacao/AvGeral/ProcessoH03/ALE_LSA.pdf. Acesso em: 13 dez. 2022.
- [4] RESOLUÇÃO Nº 686. [S. l.], 13 jul. 2022. Disponível em: anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/resolucoes/2022/resolucao-686. Acesso em: 13 dez. 2022.
- [5] SEAMAX AIRCRAFT. [S. l.]. Disponível em: seamaxaircraft.com. Acesso em: 13 dez. 2022.
- [6] ASTM F2245-16c, Standard Specification for Design and Performance of a Light Sport Airplane, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. Disponível em: www.astm.org.
- [7] Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Regulamento Brasileiro de Aviação Civil – RBAC 23: Requisitos de aeronavegabilidade: aviões categoria normal. Disponível em: anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-rbac/rbac/rbac-023/@@display-file/arquivo_norma/RBAC23EMD64.pdf.
- [8] 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/textidx?SID=685dc1ae97ae3f5e5569e47880fab01e&mc=true&node=pt14.1.23>.
- [9] FAA Accepted ASTM Consensus Standards - LSA. [S. l.], 25 abr. 2022. Disponível em: faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-07/StandardsChart.pdf. Acesso em: 13 jan. 2023.
- [10] Shuangfei Xu, Wenhao Bi, An Zhang, Zeming Mao, 2021. Optimization of flight test tasks allocation and sequencing using genetic algorithm.
- [11] Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, 1999. ALGORITMOS GENÉTICOS: PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES
- [12] Cédric Seren, François Bommier, Alain Bucharles, Laurent Verdier, Daniel Alazard, 2006. FLIGHT TEST PROTOCOL OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS
- [13] Programação Dinâmica. [S. l.]. Disponível em: ufjf.br/epd015/files/2010/06/ProgramacaoDinamica.pdf. Acesso em: 13 jan. 2023.
- [14] PYTHON. [S. l.]. Disponível em: python.org. Acesso em: 13 dez. 2022.
- [15] NUMPY.ARRAY. [S. l.]. Disponível em: numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.array.html. Acesso em: 13 dez. 2022.

[16] NUMPY.RANDOM.SHUFFLE. [S. l.]. Disponível em: numpy.org/doc/stable/reference/random/generated/numpy.random.shuffle.html. Acesso em: 13 dez. 2022.

APÊNDICE A – CÓDIGO DESENVOLVIDO

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

it = 100 #iteracoes
max_testes = 3 #quantidade maxima de testes por voo
horas_voo = 5 #Horas máximas de voo da aeronave
horas_p_dia = 8 #Horas de desenvolvimento por dia
equipe = 3 #Quantidade de equipes de desenvolvimento

qnt_voos = np.array(
[1,1,1,1,5,7,1,2,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2,2,3,1,4,3,3,3,3,2,2,2,1,2,3,3,2,2,2,2,2,2,2,3] )
#quantidade de voos por teste -- baseado na planilha
compatibilidade = np.ar-
ray([1,1,1,1,2,2,2,105,2,3,4,3,4,3,4,4,3,4,3,100,106,107,101,5,6,6,6,6,104,8,8,102,3,4,9,10
,3,4,103,11,3,4,11]) #Compatibilidade de cada teste -- baseado na planilha
pre_requisito = np.ar-
ray([3,1,4,0,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,40,20,20,28,40,2,2,2,27,40,40,40,
40,32,32,40,40,40,40,40,2,40,40,40]) #pre requisitos
horas_pesquisa = np.ar-
ray([15,15,15,15,75,105,15,30,45,15,15,15,15,15,15,15,15,30,30,45,15,60,45,45,45,45,30,3
0,30,15,30,45,45,30,30,30,30,30,30,30,30,45]) #horas de pesquisas ncessarias para iniciar
o teste
horas_pesquisa = 1* horas_pesquisa
dic = {1 : 'High speed taxi', 2 : 'First flight', 3 : 'Acceleration tests', 4: 'Engine
cooling & behavior test', 5: 'Airspeed indicator, Altitude indicator and AOA indicator ini-
tial calibration flights', 6: 'General flight control characteristics', 7: 'Low speed han-
dling 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: 'Longi-
tudinal 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: 'Di-
rectional and lateral control fwd cg', 16: 'Rate of roll', 17: 'Static longitudinal stabil-
ity 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 (ac-
celerated 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 character-
istics 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 alti-
tude', 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', 0: '---'}

```

```

n_testes = len(compatibilidade) +1 #quantidade de testes, sem contar repeticoes

soma_teste = np.sum(qnt_voos) #soma das quantidades de voos bruta

planejamento = np.zeros((soma_teste*100,max_testes)) #vetor para armazenar o planejamento

testes_bruto = np.zeros(soma_teste) #criando um vetor com todos os testes contendo suas re-
peticoes
teste = 1
cont = 0
for i in range (0,n_testes-1):
    qnt = qnt_voos[i]
    testes_bruto[cont:cont+qnt] = teste
    cont = cont+qnt
    teste +=1

voo_ant = soma_teste*10000 #variavel para controle da melhoria

grafico_melhoria = np.zeros(it)
cont = 0
for j in range(0,it): #for para gerar as iteracoes definidas pelo usuario
    horas_equipe = np.zeros(equipe)
    planejamento_temp = np.zeros((soma_teste*100,max_testes)) #armazenamento temporario da
variavel, para comparacao posterior
    testes_bruto_copy = np.copy(testes_bruto) #armazenamento temporario da variavel
    voo = 0 #posicao no vetor planejamento
    linha = 0 #posicao no vetor planejamento
    np.random.shuffle(testes_bruto_copy) #embaralhando o vetor contendo os testes
    voo_faltantes = np.copy(qnt_voos)

    while len(testes_bruto_copy) > 0: #loop para posicionar os testes dentro do vetor pla-
nejamento temp

        linha = 0
        flag_pesquisa = 0
        ##### Encaixando o primeiro teste do voo seguindo as restrições

        if int(len(testes_bruto_copy)) == 1 or int(len(testes_bruto_copy)) == 0: #caso
exista apenas mais um teste a ser realizado
            flag_pesquisa = 0
            a = 0
            for z in range(0,equipe):
                if horas_equipe[z] >= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[a])-1]):
                    flag_pesquisa = z +1

```

```

        if flag_pesquisa != 0:
            planejamento_temp[voo,linha] = int(testes_bruto_copy[a]) #posicionando o
primeiro teste no vetor
            voo_faltantes[int(testes_bruto_copy[a])-1] -= 1 #debitando dos voos faltan-
tes
            horas_equipe[flag_pesquisa-1] -= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[a])-1]) - horas_p_dia
            testes_bruto_copy = np.delete(testes_bruto_copy, a) #tirando o teste ja po-
sicionado

        else:
            for b in range (0,len(testes_bruto_copy)):
                flag_pesquisa = 0
                for z in range(0,equipe): #Verificando se a tarefa já tem as horas de pes-
quisa nescessarias
                    if horas_equipe[z] >= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[b])-1]):
                        flag_pesquisa = z +1

                if int(pre_requisito[int(testes_bruto_copy[b]-1)]) == 0 and flag_pesquisa
!= 0:
                    #print('sem restrição')
                    a = b
                    planejamento_temp[voo,linha] = int(testes_bruto_copy[a]) #posicionando
o primeiro teste no vetor
                    voo_faltantes[int(testes_bruto_copy[a])-1] -= 1 #debitando dos voos
faltantes
                    horas_equipe[flag_pesquisa-1] -= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[a])-1]) - horas_p_dia
                    testes_bruto_copy = np.delete(testes_bruto_copy, a) #tirando o teste ja
posicionado
                    break

                else:
                    #print('com restrição')
                    if int(voo_faltantes[int(pre_requisito[int(testes_bruto_copy[b]-1))]-
1]) == 0 and flag_pesquisa != 0:
                        #print('liberado')
                        #print(b)
                        a = b
                        planejamento_temp[voo,linha] = int(testes_bruto_copy[a]) #posicio-
nando o primeiro teste no vetor
                        voo_faltantes[int(testes_bruto_copy[a])-1] -= 1 #debitando dos voos
faltantes
                        horas_equipe[flag_pesquisa-1] -= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[a])-1]) - horas_p_dia
                        testes_bruto_copy = np.delete(testes_bruto_copy, a) #tirando o
teste ja posicionado
                        break

```

```

##### Encaixando os demais testes do voo seguindo as restrições

for i in range(1,max_testes): # encontrando os proximos testes no mesmo voo, veri-
ficando a compatibilidade e que não sejam testes repetidos

    for k in range (0,len(testes_bruto_copy)):
        flag = 0
        flag_comp = 1
        flag_pre = 0
        flag_pesquisa = 0

        for h in range(0,max_testes): #verificando se o teste não é repetido no
mesmo voo

            if int(testes_bruto_copy[k]) == int(planejamento_temp[voo,h]):
                flag = 1

            if compatibilidade[int(planejamento_temp[voo,0]-1)] == compatibili-
dade[int(testes_bruto_copy[k] - 1)]: #verificando a compatibilidade dos testes
                flag_comp = 0

            for z in range(0,equipe):
                if horas_equipe[z] >= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[k])-1]):
                    flag_pesquisa = z + 1

            if int(pre_requisito[int(testes_bruto_copy[k]-1)]) == 0: #verificando os
pre requisitos

                #print('não contem restrição')
                flag_pre = 1
            else:
                #print('contem restrição')
                if int(voo_faltantes[int(pre_requisito[int(testes_bruto_copy[k]-1))]-
1]) == 0:

                    flag_pre = 1
                    #print('restrição superada')

            if flag_comp == 0 and flag != 1 and flag_pre ==1 and flag_pesquisa != 0:
                planejamento_temp[voo,i] = int(testes_bruto_copy[k])
                voo_faltantes[int(testes_bruto_copy[k])-1] -= 1
                horas_equipe[flag_pesquisa-1] -= int(horas_pesquisa[int(testes_bruto_copy[k])-1]) - horas_p_dia

```

```

        testes_bruto_copy = np.delete(testes_bruto_copy, k)
        break
    voo += 1
    #print(horas_equipe)
    for x in range(0, equipe):
        horas_equipe[x] += horas_p_dia

    if voo <= voo_ant: # comparando o planejamento atual, com o melhor planejamento anterior
        planejamento = np.copy(planejamento_temp)
        voo_ant = voo

    grafico_melhoria[cont] = voo_ant
    cont +=1

#Calculo de numeros de Voos
n_voos = 0
for i in range(0, voo_ant):
    if planejamento[i,0] != 0 :
        n_voos += 1

print(f"Totais de voos: {n_voos}")
print(f"Dias totais: {voo_ant}")

#print(grafico_melhoria)
eixo_x = np.arange(0, it)
plt.plot(eixo_x, grafico_melhoria)

#Print resultado
for i in range(0, voo_ant):
    print(i+1, end=": ")
    for k in range(0, max_testes):
        if k != max_testes-1:
            print(dic[planejamento[i,k]], end=", ")
        else:
            print(dic[planejamento[i,k]], end="")
    print('.')

```